

Panorama 2013 du marché du cobalt

Rapport public

BRGM/RP-63626-FR

Mai 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service Public du BRGM 2013

A.-S. Audion, C. Hocquard, J.-F. Labbé
avec la collaboration de
J.-J. Dupuy

Vérificateur :

Nom : Jean-Jacques DUPUY

Date : 17 Juin 2014

Signature :



Approbateur :

Nom : Jean-Claude GUILLANEAU

Date : 17/06/2014

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008

Mots-clés : Cobalt, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Industrie, Politiques publiques.

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

Audion A.S., Hocquard C., Labbé J.F., avec la collaboration de **Dupuy J.J.** (2014) - Panorama mondial 2013 du marché du cobalt. Rapport public. BRGM/RP-63626-FR, 155 p., 45 fig., 33 tabl.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

LE COBALT

Le cobalt (Co) est l'élément n° 27 du tableau de Mendeleïev. C'est un métal de transition voisin du fer et du nickel. C'est un élément peu abondant de l'écorce terrestre (25 à 29 ppm).

La production de cobalt raffiné est estimée à 86,1 kt en 2013 (vs 79,3 kt en 2012), sous forme de métal ou de composés. La majorité est d'origine minière, et 6 à 20 % serait d'origine secondaire¹.

Le prix du cobalt au LME a été de 27,3 US\$/kg en moyenne en 2013. Le cobalt a donc représenté un marché mondial de l'ordre de 2,35 milliards US\$ en 2013.

Propriétés et usages

Le cobalt pur est un métal de couleur gris-argenté de densité et de dureté moyennes, qui fond à 1 495 °C. C'est un métal ferromagnétique. Il a le point de Curie le plus élevé des éléments connus, à 1 111 °C. Cette propriété explique la large utilisation de cet élément dans les aimants permanents et dans les supports d'enregistrement magnétique.

Il est stable dans l'air et dans l'eau à température ordinaire et ne s'oxyde qu'à chaud.

Le cobalt est un oligo-élément essentiel aux êtres vivants. Il entre dans la composition de la vitamine B12. Il n'a de toxicité qu'à des doses dépassant largement les doses d'exposition usuelles.

Les usages du cobalt se répartissent de la manière suivante :

- batteries rechargeables : 38 % ;
- superalliages : 20 % ;
- carbures cémentés et outils diamantés : 10 % ;
- catalyseurs : 9 % ;
- céramiques et émaux (pigments) : 8 % ;
- aimants permanents : 5 % ;
- agent séchant et pneumatiques : 3 % ;
- autres : 7 %.

¹ Les estimations de la part d'origine secondaire est assez variable selon les sources. Plusieurs raffineries importantes utilisent comme intrants des concentrés et produits intermédiaires d'origine minière ainsi que des scraps secondaires, mais ne publient pas le détail des origines de leur production.

Dans les batteries rechargeables, le cobalt entre dans la composition des cathodes des batteries de type Ni-Cd (0,1 à 0,6 kg Co par kWh), Ni-MH (0,6 kg Co par kWh) et surtout les batteries LCO, la part des batteries Li-ion avec cathode au cobaltate de lithium (jusqu'à 1 kg Co par kWh)².

La part relative des cathodes en cobaltate de lithium est en baisse, mais, en raison de la très forte croissance du volume total de batteries Li-ion produites, et de la présence de cobalt dans diverses cathodes mixtes, la demande en cobalt correspondante devrait continuer à connaître une croissance soutenue. Cette demande a crû de plus de 9 % par an en moyenne sur la période 2005-2012 et devrait continuer à croître de plus de 8 % par an d'ici 2025.

Les superalliages sont des alliages réfractaires utilisés principalement dans les parties chaudes des turboréacteurs pour l'aéronautique, des turbines à gaz des centrales électriques à gaz et diverses applications industrielles, automobiles, militaires, etc. Ils sont surtout à base de nickel, allié avec des proportions variables d'autres métaux dont le cobalt (jusqu'à 30 % Co). D'autres alliages durs, à cobalt dominant, sont utilisés par exemple dans la robinetterie nucléaire, ou pour la fabrication de prothèses orthopédiques.

Le cobalt est utilisé comme matrice des carbures cémentés et outils diamantés utilisés pour la découpe, l'usinage, ou les taillants des engins travaux publics.

Le cobalt est utilisé comme catalyseur pour diverses réactions dans les industries chimiques et pétrochimiques (désulfuration des hydrocarbures, fabrication de précurseurs au téréphtalate de polyéthylène, procédé Fischer-Tropsch pour la synthèse d'hydrocarbures liquides à partir de charbon, de gaz ou de biomasse, etc.).

L'usage historique de composés du cobalt comme pigment (bleu, vert) perdure dans les industries des céramiques et des émaux.

Le cobalt est utilisé dans la fabrication de divers types d'aimants permanents (AlNiCo, Sm-Co, Fe-Cr-Co) et pour les supports d'enregistrement magnétique (disques durs, bandes magnétiques).

Il est utilisé, sous forme de carboxylates, comme agent siccatif pour les peintures et les encres, et comme promoteur d'adhésion caoutchouc-acier dans les pneumatiques.

Du cobalt sous forme de sulfate ou de carbonate est utilisé en complément alimentaire pour le bétail et en particulier les ruminants, dans la panse desquels il favorise la synthèse bactérienne de la vitamine B12. Il peut aussi être dispersé comme un engrais dans les prairies destinées à être pâturées.

² Les accumulateurs Li-ion utilisent pour la cathode un oxyde mixte de lithium et d'un autre métal : cobalt (cobaltate de lithium, LiCoO_2), manganèse (spinelle de manganèse-lithium, LiMn_2O_4), nickel (LiNiO_2) ou de plusieurs autres métaux ($\text{Li}(\text{Co},\text{Ni},\text{Al},\text{Mn})\text{O}_2$), ou encore du phosphate de lithium et de fer (LiFePO_4), sans cobalt

Parmi les autres usages plus marginaux, on pourra citer :

- la production de cobalt-60, isotope instable et radioactif longtemps utilisé en radiothérapie ainsi que pour la stérilisation et l'irradiation des aliments ;
- le rôle d'adjuvant dans les bains d'électrolyse du cuivre dans les procédés SX-EW ;
- l'anodisation de l'aluminium en teintes bronze à noires ;
- les matrices de fabrication des diamants synthétiques ;
- la joaillerie du platine, dans laquelle l'ajout d'un peu de cobalt (5 %) facilite la gravure fine.

Consommation

La consommation de cobalt aurait été de 72 à 74 kt en 2012³. La plupart des analystes s'attendent à une poursuite de la croissance de la demande de 5,5 à 6 % dans les prochaines années.

Substituabilité

Des solutions alternatives au cobalt existent pour les cathodes des batteries rechargeables, et en particulier des batteries Li-ion, mais le cobalt garde des avantages inégalés pour les batteries des appareils nomades.

Les aimants permanents au cobalt peuvent être substitués, dans de nombreux cas, par des aimants NdFeB, mais le néodyme n'est pas moins critique que le cobalt.

Pour les autres usages, lorsque le cobalt continue à être utilisé, c'est généralement parce que c'est ce métal qui assure la meilleure performance pour l'usage recherché. Il n'est pas substituable dans ses superalliages et autres alliages sans perte de performances. De même il reste le métal le plus performant comme matrice des carbures cémentés et pour les enregistrements magnétiques.

Ressources

L'abondance moyenne du cobalt dans la croûte terrestre est estimée entre 25 et 29 ppm selon les auteurs, légèrement inférieure à celle de terres rares telles que le néodyme ou l'yttrium. Il est deux fois moins abondant que le cuivre et deux fois et demi plus abondant que le plomb.

Il existe principalement quatre types de gisements à partir desquels du cobalt peut être extrait dans le monde :

³ L'information sur le niveau de la demande mondiale en cobalt diverge selon les sources : le Cobalt Development Institute (CDI, 2013) estime la consommation mondiale de cobalt à environ 72 kt en 2012 vs 76,5 kt en 2011, soit une baisse de 5,9 %. Darton Commodities Ltd (janv.2013) estime cette consommation à 73,9 kt en 2012 vs 69,2 kt en 2011, soit au contraire une hausse de 6,8 %.

- gisements stratiformes de cuivre avec cobalt subordonné (Copperbelt de RDC et Zambie) ;
- gisements magmatiques de cuivre-nickel sulfurés avec cobalt et platinoïdes subordonnés (Norilsk en Russie, Sudbury au Canada, etc.) ;
- gisements de nickel latéritique à cobalt subordonné (Nouvelle-Calédonie, Cuba, etc.) ;
- gisements hydrothermaux à cobalt dominant (Maroc).

Certains « tailings » (rejets de laverie) d'anciennes mines de cuivre sont retraités pour en récupérer le cobalt.

Enfin, il existe des concentrations de cobalt dans les nodules polymétalliques et certains encroûtements des fonds océaniques, mais ils ne sont pas exploitables dans les conditions actuelles.

Les réserves mondiales identifiées sont évaluées par l'USGS à 7,2 Mt de cobalt contenu, dont près de la moitié dans la Copperbelt (3,4 Mt en RDC et 0,3 Mt en Zambie), le reste étant distribué dans des pays variés (Australie, Cuba, Canada, Russie, Nouvelle-Calédonie, Brésil, Chine, etc.). Les ressources terrestres répertoriées sont évaluées à 25 Mt et les ressources sous-marines potentielles à 120 Mt Co (USGS, févr.2014).

Les réserves totales identifiées à ce jour correspondent à 84 ans de production minière au rythme de 2013 ou 32 ans au rythme de croissance récent et anticipé de la demande de 5,8 % par an. Les ressources terrestres correspondraient à 178 ans de production minière au rythme de 2013, et 43 ans au rythme de 5,8 % de croissance annuelle. Mais l'exploration minière et les travaux de certification continuent à permettre d'accroître ces ressources et réserves.

Ressources en France

La France métropolitaine ne dispose pas de gisements de cobalt ni de contextes géologiques favorables à leur existence. Il existe quelques contextes favorables en Guyane, mais leur potentiel est probablement minime et n'a pas été évalué. Ils sont par ailleurs pour l'essentiel situés dans la partie sud de la Guyane, soustraite à l'exploration minière par le SDOM.

En Nouvelle-Calédonie, il existe une géologie très favorable à l'existence de minéralisations en nickel et cobalt latéritique, développées par altération supergène sur les péridotites ophiolitiques qui forment de grands massifs dans le Sud et sur la côte Ouest de la Grande Terre.

Le nickel y est exploité depuis 1874. La Nouvelle-Calédonie fournit, selon les années, 6 à 8 % de la production minière mondiale de nickel, avec, selon les filières, du cobalt récupéré en sous-produit. La production minière néocalédonienne de cobalt valorisé s'est montée à 3,43 kt Co en 2013, soit près de 4 % de la production minière mondiale.

Les réserves en nickel de la Nouvelle-Calédonie sont évaluées à 12 Mt, soit 16 % des réserves mondiales, et celles en cobalt à 200 kt, soit 2,8 % des réserves mondiales et 58 ans de production au rythme de 2013.

Production

Le cobalt primaire est à environ 67 % un sous-produit des mines de cuivre (Copperbelt, RDC et Zambie), et à 31 % un sous-produit des mines de nickel-cuivre sulfurés (Russie, Canada, Australie) et de nickel latéritique (Nouvelle-Calédonie, Cuba, Philippines, Australie, PNG, Madagascar, etc.).

Seules, la mine de Bou Azzer (Maroc) et l'unité de retraitement des tailings de Kasese (Ouganda) produisent du cobalt en substance principale.

En raison du statut de sous-produit du cobalt, du fait qu'il n'est pas toujours valorisé au niveau des sites miniers et des défauts de transparence de la filière, les statistiques de production minière sont estimées de manière très variable d'une source à l'autre. Selon les sources, la production minière de cobalt aurait été de 82 à 110 kt en 2012.

La R.D. du Congo domine largement la production minière mondiale (environ 55 % de la production mondiale en 2012) avec sa voisine la Zambie, deuxième producteur mondial. Les autres producteurs significatifs sont la Chine, l'Australie, Cuba, le Brésil, le Canada, la Nouvelle Calédonie et la Russie. Cette répartition a évolué à partir de 2013 avec l'arrivée puis la montée en puissance progressive de nouveaux producteurs : Madagascar (Ambatovy), la Papouasie-Nouvelle-Guinée (Ramu), les Philippines (Coral Bay).

Dans sa chaîne de production, le cobalt n'est que partiellement isolé sur ou à proximité des sites miniers. Nombre de mines expédient des concentrés de cuivre-cobalt, des mattes de nickel-cobalt ou des alliages de cuivre-cobalt (« alliage blanc ») pour être traités dans des unités métallurgiques ou raffineries situées dans d'autres pays.

La production de cobalt sous forme raffinée (métal ou composé) a été de 79,13 kt de cobalt contenu en 2012, et 86,14 kt en 2013⁴.

La Chine domine désormais largement la production mondiale de cobalt raffiné (41,3 %), suivie par la Finlande (12,3 %). Au total, l'Union Européenne compte pour près de 18 % de la production mondiale (Finlande + Belgique + France). La France produit de l'ordre de 350 t de cobalt raffiné sous forme de chlorure (raffinerie d'Eramet à Sandouville), soit 0,4 % de la production mondiale, à partir de mattes issues de la production minière néocalédonienne.

⁴ Selon les chiffres publiés par le CDI et Darton Commodities en 2014, auxquels a été ajoutée la production secondaire étatsunienne, par souci de cohérence. En effet, les productions belges, chinoises, canadiennes de cobalt raffiné, et probablement d'autres, intègrent des productions secondaires.

La production minière de cobalt aurait crû en moyenne d'environ 7,4 % par an entre 1993 et 2012, et celle de cobalt raffiné de 6,8% par an sur la même période, avec une très forte croissance de la production chinoise à partir de 2002.

Recyclage

En raison de son prix relativement élevé, le cobalt est largement recyclé lorsque cela est possible (chutes de fabrication, et divers produits en fin de vie : batteries, carbures cémentés, catalyseurs, etc.). En revanche, les usages du cobalt pour les pigments, les carboxylates (siccatisifs et adhésifs), l'agriculture et la pharmacie sont dispersifs et ne permettent pas la récupération du cobalt.

Peu de statistiques explicites de production secondaire sont disponibles. Le PNUE⁵ estime le taux de recyclage du cobalt en fin de vie à 68 %. L'estimation du contenu des approvisionnements en cobalt issu du recyclage est très variable selon les sources (32 % selon le PNUE, 2011, mais seulement 5 % selon Roskill, févr. 2014).

Le recyclage des produits en fin de vie restera largement insuffisant pour alimenter le marché compte tenu de sa croissance.

Prix

Depuis février 2010, le cobalt est coté au London Metal Exchange (LME), la bourse des métaux de Londres. Mais une grande partie des échanges de cobalt, sous diverses formes de métal ou de composés, continue à se faire par contrats entre acheteurs et vendeurs, éventuellement par l'intermédiaire de négociants. Divers périodiques spécialisés, comme Metal Bulletin ou Metal-pages publient des fourchettes de prix d'échanges indicatifs.

Les prix du cobalt ont été très volatils dans la période 2002-2008, atteignant un record de 112,4 US\$/kg en mars 2008. Ils ont chuté au deuxième semestre 2008, comme ceux de la quasi-totalité des métaux. Ils ont un peu remonté en 2009 jusqu'à 52,4 US\$/kg. Ils ont ensuite baissé jusqu'à un nouveau minimum fin 2012 (22 à 24 US\$/kg en novembre-décembre 2012), et se sont légèrement raffermis, irrégulièrement, au cours de l'année 2013 et atteignaient 33,6 US\$/kg en mars 2014. Mais ces prix restent inférieurs à ce qu'ils ont été pendant l'essentiel de la période 2004-2012.

Le marché du cobalt est excédentaire depuis 2009 et devrait le rester en 2014 et 2015, pour devenir déficitaire en 2016. Il est en effet attendu une poursuite de la croissance de la demande de près de 6 % par an, alors que la croissance de la production n'est attendue qu'aux environs de 3 %/an.

⁵ Programme des Nations Unies pour l'Environnement. Allwood & Sonneman in Graedel *et al.*, UNEP, 2011.

Les acteurs français

Il n'y a pas d'exploitation minière en France métropolitaine, mais il y a une production minière de cobalt associé au nickel en Nouvelle-Calédonie :

- la Société Le Nickel (SLN), filiale à 56 % d'Eramet, exploite plusieurs sites en Nouvelle-Calédonie. Dans son usine pyrométallurgique de Doniambo, elle produit du ferronickel (filière dans laquelle le cobalt n'est pas récupéré) et des mattes sulfurées à Ni-Co envoyées pour raffinage à l'usine d'Eramet de Sandouville (76), où sont produits du nickel raffiné et du chlorure de cobalt (300 à 350 t de Co contenu par an) ;
- la société Vale-Nouvelle-Calédonie (VNC), filiale à 74 % de la société brésilienne Vale, exploite les gisements de Goro, traités par lixiviation acide sous pression. La production a démarré en 2011. VNC a produit 16,3 kt Ni et 1,12 kt Co en 2013 et vise une capacité de 57 kt Ni et 4,5 kt Co par an ;
- pour mémoire, les sociétés Nickel Mining Company (NMC) et Koniambo Nickel SAS, qui exploitent des gisements de nickel latéritique, destinent leurs minerais à la production de ferronickel, sans récupération du cobalt.

Plusieurs autres sociétés néocalédoniennes exploitent des minerais latéritiques. Certaines livrent une partie de leur minerai à l'usine de SLN de Doniambo. Le reste est surtout exporté directement vers l'Australie et le Japon. Une partie du cobalt contenu est valorisé (1,77 kt de cobalt contenu dans les minerais exportés vers l'Australie en 2013, selon la DIMENC⁶).

Diverses entreprises sont impliquées dans la production d'intermédiaires contenant du cobalt (alliages et superalliages, carbures cémentés, etc.) et le recyclage du cobalt et de ses dérivés en France (Eurotungstène, Eramet et ses branches Aubert & Duval et Erasteel, Oric, Hexametal, Aérométal, Récupyl, SNAM, etc.).

Saft produit divers types d'accumulateurs (Li-ion, Ni-MH et Ni-Cd) pouvant contenir du cobalt, et ASB Group produit des piles thermiques au lithium, dont les cathodes peuvent contenir un peu de cobalt.

Quelques sociétés françaises ou implantées en France produisent ou commercialisent des aimants permanents AlNiCo, Sm-Co et Nd-Fe-B dont certains sont dopés au cobalt : Euromag, First Magnetic France, Emile Maurin, Braillon Magnetics, etc.

Axens produit des catalyseurs au cobalt. Praxair MRC SAS fabrique des cibles de pulvérisation en cobalt ou alliages de cobalt pour l'électronique. OMG Borchers France fabrique des additifs au cobalt. Des implantations de l'allemand Merck en France produisent divers pigments, additifs et composés chimiques au cobalt.

Plus en aval, de très nombreux secteurs industriels utilisent indirectement du cobalt, comme composants de superalliages (secteurs aérospatiaux et militaires), comme catalyseur (secteurs chimiques et pétroliers), comme composant de batteries (très nombreux secteurs industriels, et en particulier l'industrie automobile qui s'oriente vers

⁶ Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de Nouvelle-Calédonie.

des véhicules hybrides ou électriques), sous forme de carboxylate comme adhésif (fabricants de pneumatiques et tous leurs utilisateurs), comme siccatif (fabricants de peintures, vernis et résines), comme pigment (peintures, céramiques, etc.), comme composant des carbures cémentés pour tout ce qui est découpe et usinage de métaux et pour les travaux publics, comme composant de certains types d'aimants permanents, comme complément alimentaire pour le bétail, etc. La liste des utilisateurs est très longue.

De plus, une grande partie de l'économie française, et en particulier tout son secteur tertiaire, utilise – et est devenue dépendante de l'utilisation – des ordinateurs portables et divers autres appareils nomades (téléphones, tablettes, etc.), dont la grande majorité est alimentée par des batteries au lithium à cathode au cobalt. De même une grande partie des citoyens utilisent de tels appareils.

Commerce extérieur

Les douanes identifient six nomenclatures contenant explicitement du cobalt :

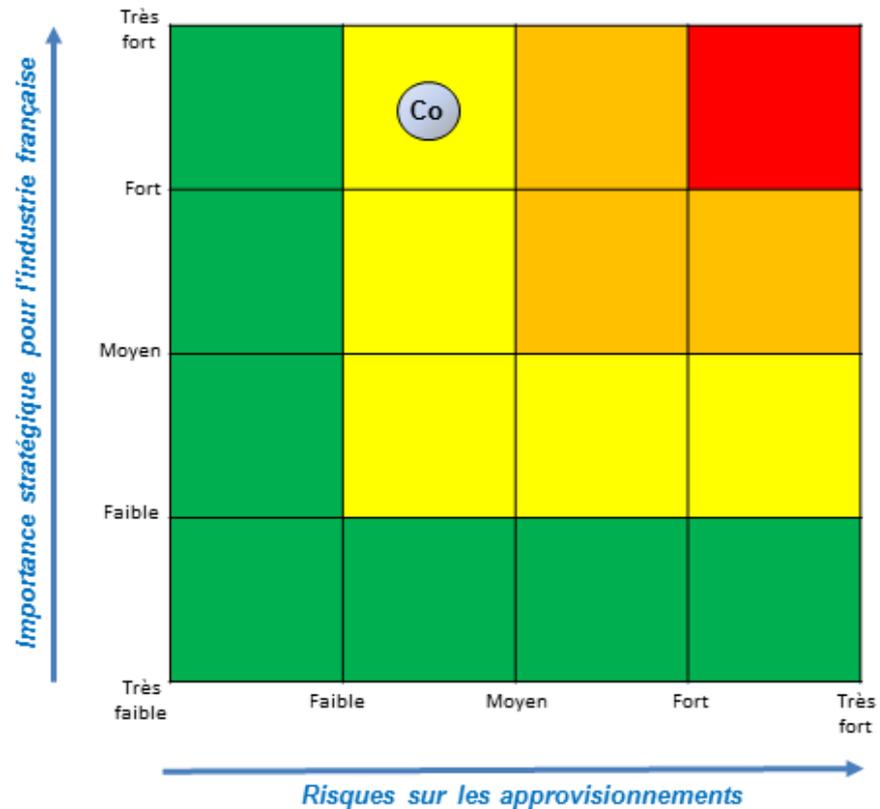
- minerais de cobalt et leurs concentrés ;
- oxydes et hydroxydes de cobalt ; oxydes de cobalt du commerce ;
- chlorure de cobalt ;
- mattes de cobalt et autres produits intermédiaires de la métallurgie du cobalt ; cobalt sous forme brute ; poudres de cobalt ;
- déchets et débris de cobalt (sauf cendres et résidus contenant du cobalt) ;
- ouvrages en cobalt.

Les composés étant documentés en tonnage brut, sans qu'en soient spécifiées les teneurs (concentrés, mattes), il est difficile d'en déduire un bilan massique des échanges de cobalt, et donc une consommation française apparente. De plus, la source du cobalt raffiné en France (raffinerie d'Eramet à Sandouville) provient d'importations qui ne figurent pas dans les nomenclatures ci-dessus, puisque ce cobalt est extrait de matière importée sous la nomenclature des mattes de nickel.

En valeur, la grande majorité des postes sont déficitaires, et le cumul des six nomenclatures ci-dessus représente des déficits du commerce extérieur en valeur de 38,0 M€ en 2010, 50,3 M€ en 2011, 38,3 M€ en 2012, et 26,5 M€ en 2013.

Criticité

**EVALUATION DE LA CRITICITE DU COBALT
(Synthèse)**



Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité



Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)



Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

Sommaire

Résumé	5
1. Introduction.....	23
1.1. DÉFINITIONS	23
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	24
1.3. SOURCES DES DONNÉES.....	24
2. Le cobalt.....	27
2.1. DONNÉES DE BASE	27
2.2. HISTORIQUE	28
2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	29
2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	29
2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ.....	30
3. La demande : usages et consommation	33
3.1. USAGES DU COBALT PAR FILIÈRES	33
3.1.1. Batteries d'accumulateurs électriques	34
3.1.2. Superalliages	43
3.1.3. Autres alliages de haute performance au cobalt.....	44
3.1.4. Carbures cémentés et outils diamantés	44
3.1.5. Catalyseurs au cobalt.....	46
3.1.6. Pigments.....	49
3.1.7. Aimants permanents	50
3.1.8. Les siccatifs pour peintures et adhésifs pour pneumatiques (carboxylates de cobalt)	51
3.1.9. Électronique.....	52
3.1.10. Agriculture, médecine	53
3.1.11. Radiothérapie	54
3.1.12. Autres usages.....	54
3.2. USAGES DU COBALT PAR COMPOSÉS	55
3.3. CONSOMMATION	56
3.3.1. Évolution récente de la consommation.....	56
3.3.2. Perspectives d'évolution de la demande	58

3.4. SUBSTITUTIONS.....	60
4. L'offre : ressources et production mondiale.....	61
4.1. LES SOURCES DE COBALT	61
4.1.1. Abondance du cobalt dans l'écorce terrestre.....	61
4.1.2. Minéraux et minerais.....	62
4.1.3. Principaux types de gisements.....	63
4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES.....	68
4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en cobalt	68
4.2.2. Les gisements de cobalt dans le monde.....	70
4.2.1. Les gisements et ressources de cobalt en France.....	77
4.3. PRODUCTION	80
4.3.1. Statistiques de production courante	80
4.3.2. Évolution historique de la production.....	90
4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION.....	92
4.4.1. Extraction minière	92
4.4.2. Concentration, minéralurgie	93
4.4.3. Métallurgie	93
4.5. RECYCLAGE	97
4.5.1. Taux et potentialités de recyclage	97
4.5.2. Règlementation européenne	99
4.6. LES LIMITES DE L'OFFRE OU DE LA DISPONIBILITÉ.....	99
4.6.1. Le ban des exportations de minerais bruts de la RDC.....	99
4.6.3. L'accroissement de la demande chinoise	100
4.6.4. Règlementation REACH.....	101
4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DÉSTOCKAGES	102
4.7.1. États-Unis	102
4.7.2. Japon.....	103
4.7.3. Corée du Sud.....	103
4.7.4. Chine	103
4.7.5. LME	103
4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION.....	103
5. Prix du cobalt	105
5.1. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX	105
5.2. ÉVOLUTION HISTORIQUE DES PRIX	106

6. La filière industrielle	109
6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERS DE COBALT	109
6.1.1. Producteurs miniers en Nouvelle-Calédonie	109
6.1.2. Producteurs miniers en UE28	112
6.1.3. Producteurs miniers opérant dans la Copperbelt (RDC et Zambie)	112
6.1.4. Producteurs miniers dans le reste du Monde	118
6.2. LES AUTRES PRODUCTEURS DE COBALT RAFFINÉ (MÉTAL ET COMPOSÉS)	123
6.2.1. Producteur de cobalt raffiné en France	123
6.2.2. Producteurs de cobalt raffiné dans le reste de l'Union Européenne (UE28)	123
6.2.3. Producteurs de cobalt raffiné dans le reste du Monde.....	124
6.3. LES PRINCIPAUX TRANSFORMATEURS, FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES ET RECYCLEURS DE COBALT EN FRANCE	126
6.3.1. Métallurgie	126
6.3.2. Recyclage et valorisation	128
6.3.3. Fabricants de batteries d'accumulateurs	129
6.3.4. Fabricants d'aimants permanents	131
6.3.5. Fabricants de cibles de pulvérisation	133
6.3.6. Fabricants de composés chimiques du cobalt pour diverses applications.....	133
6.3.7. Fabricants de catalyseurs	134
6.4. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX	134
6.4.1. Aéronautique, espace et Défense	134
6.4.2. Énergie, Transports	136
6.4.3. Pneumatiques.....	136
6.4.4. Constructeurs automobiles	137
6.4.5. Industrie pétrolière	137
6.4.6. Prothèses orthopédiques	137
6.4.7. Secteur pharmaceutique	138
6.4.8. Alimentation animale.....	139
6.4.9. Sources radioactives.....	139
6.4.10. Verrerie et céramique.....	139
7. Commerce extérieur de la France.....	141
8. Criticité	149
Bibliographie.....	150

Liste des figures

Figure 1 - Position du cobalt (Co) dans le tableau périodique des éléments.....	27
Figure 2 - Utilisations antiques du bleu de cobalt.....	28
Figure 3 - Structure de la cobalamine (vitamine B12), avec R = CN, OH, CH3 ou 5-désoxyadénosyl (source : Wikimedia Commons).	31
Figure 4 : Répartition de la consommation de cobalt en 2012 par usages dans le monde (à gauche) et en Chine (à droite) (Darton Commodities, 2013).	33
Figure 5 - Comparaison des capacités massiques d'accumulation d'énergie pour différents types de batteries.	36
Figure 6 - Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion (© Angerer et al., 2009, adapté)....	37
Figure 7 - Évolution des ventes de batteries Li-ion par secteur d'utilisation entre 2000 et 2012 (adapté d'après Pillot, Avicenne Energy, 2013).	40
Figure 8 - Évolution des parts des matériaux actifs de cathode pour batteries Li-ion, selon Pillot (2013), et estimation de la quantité de cobalt contenu.....	41
Figure 9 - Prévision à 2025 de l'évolution des parts des matériaux actifs de cathode pour batteries Li-ion, selon Pillot (2013), et estimation de la quantité de cobalt contenu.....	42
Figure 10 - Répartition des usages du carbure de tungstène par filière industrielle (source : Monier et al., 2010, d'après ITIA, 2008).	46
Figure 11 - Schéma du procédé GTL utilisant le procédé Fischer-Tropsch.....	48
Figure 12 - Pigments de bleu de cobalt (bleu royal à gauche, bleu vert à droite) (www.artantiquequebec.com).....	49
Figure 13 - Architecture d'un pneu radial ceinturé (www.michelintransport.com).....	51
Figure 14 - Schéma simplifié d'un disque dur.	53
Figure 15 - Évolution récente (2008-2013) et prévisionnelle (2014-2017) de la consommation globale en cobalt, selon Formation Metals Inc (nov.2013) se référant à CRU et CDI.	57
Figure 16 - Évolution récente (2008-2013) et prévisionnelle (2014-2017) de la consommation globale en cobalt, selon Mining Journal et DMM Advisory Group (déc.2013) se référant à CRU.	58
Figure 17 - Prévisions largement dépassées d'évolution de la demande en cobalt qui avait été établies par Öko-Institut en 2008 et publiée en 2009, et confrontation avec les consommations observées en 2010 et 2013.	59
Figure 18 - Évolution de la consommation mondiale de cobalt depuis 2000 et perspectives d'évolution d'ici 2016 (sources : Darton Commodities et CDI), avec évolution de la production depuis 1968 (sources : USGS, CDI et Darton Commodities)....	59
Figure 19 - En haut : érythrite (à gauche) et skutterudite (à droite) de Bou-Azzer (Maroc) ; en bas : Carrollite de Kambove (RDC). Photos J.F. Labbé.	63
Figure 20 - Coupe schématique des latérites nickélicifères de Nouvelle-Calédonie.....	66

Figure 21 - Répartition des réserves minières en cobalt répertoriées à fin 2013 (USGS).	69
Figure 22 - Localisation des principaux gisements mondiaux à cobalt en fonction de leur typologie et de leurs ressources en cobalt contenu (BRGM, 2014 ; SNL, 2014).	71
Figure 23 - Localisation des principales exploitations minières de cobalt (BRGM, 2014 ; SNL, 2014).	72
Figure 24 - Les gisements de nickel latéritique exploités en Nouvelle-Calédonie (© DIMENC, www.dimenc.couv.nc).	79
Figure 25 - Schéma des flux de cobalt dans l'Union Européenne (© RPA, Commission Européenne).	86
Figure 26 - Répartition indicative de la production minière de cobalt en 2012.	87
Figure 27 - Répartition indicative de la production de cobalt raffiné par pays en 2013.	90
Figure 28 - Évolution indicative de la production minière de cobalt de 1990 à 2013.	91
Figure 29 - Évolution de la production de cobalt raffiné de 1990 à 2013.	92
Figure 30 - Schéma simplifié des principaux processus d'extraction du cobalt (non exhaustif).	96
Figure 31 - Évolution du prix du cobalt depuis janvier 2002 (Metal-Pages, LME).	106
Figure 32 - Évolution historique du prix du cobalt depuis 1915.	107
Figure 33 - Exploitation minière de Tiébaghi (© www.sn1.nc).	109
Figure 34 - La filière nickel-cobalt d'Eramet (© www.eramet.com).	110
Figure 35 - L'usine hydrométallurgique de Vale-Nouvelle-Calédonie, à l'extrême sud de la Nouvelle-Calédonie (© www.vale.nc).	111
Figure 36 - Principaux gîtes de cuivre-cobalt de la Copperbelt (© Jébrak & Marcoux, 2008)... ..	113
Figure 37 - Destination des exportations congolaises de minerais et concentrés de cobalt (en haut) et de produits intermédiaires (en bas) (source : Bedder, Roskill, 2013, d'après Global Trade Atlas).	116
Figure 38 - Sacs de concentrés et cathodes de cobalt prêts à rejoindre la Chine via l'Afrique du sud (3 000 km en dix jours) (© International Mining, juillet 2008). ..	117
Figure 39 - Estimation de la répartition des revenus des opérations russes de Norilsk Nickel en 2011 (Oakdene Hollins, 2012).	122
Figure 40 - Valorisation par hydrométallurgie par Récupyl du zinc, du manganèse, du cobalt et du lithium à partir de piles et d'accumulateurs (www.recupyl.fr).	129
Figure 41 - Modèles de batteries proposés par Saft (www.saftbatteries.com).	130
Figure 42 - Schéma d'une pile thermique et modèle de pile proposé par ASB Group (www.asb-group.com).	131
Figure 43 - Aimants Alnico (à gauche) et Sm-Co (à droite) proposés par Euromag (www.euromag-magnets.com).	132
Figure 44 - Prothèses orthopédiques de marle (© www.marle.fr).	138
Figure 45 - Synthèse de la criticité du cobalt.	149

Liste des tableaux

Tableau 1 - Les principaux isotopes du cobalt.	28
Tableau 2 - Comparatif des performances des principaux types de batteries.	35
Tableau 3 - Avantages et inconvénients des matériaux de cathode pour batteries Li-ion.....	38
Tableau 4 - Contenu en cobalt des différents types de batteries Li-ion. Source : http://batteryuniversity.com ; Avicenne Energy (2013).....	38
Tableau 5 - Évolution récente et prévisionnelle future de la demande en cobalt pour les batteries rechargeables (© Darton Commodities Ltd, janv. 2014).	42
Tableau 6 - Composition (en %) de divers superalliages (www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html).	43
Tableau 7 - Quelques compositions type de carbures cémentés à base de WC liés par du cobalt (Source : Cobalt Development Institute, 2006).....	45
Tableau 8 - Quelques composés de cobalt les plus courants et leurs usages principaux.....	56
Tableau 9 : Abondance moyenne des éléments de la croûte terrestre.....	61
Tableau 10 - Principaux minéraux de cobalt (http://webmineral.com , www.mindat.org).	62
Tableau 11 - Estimation de teneurs moyennes des encroûtements cobaltifères sous-marins publiées par l'Autorité Internationale des Fonds marins (International Seabed Authority, ISA, www.isa.org.jm).	68
Tableau 12 - Répartition des réserves en cobalt répertoriées à fin 2013 (USGS).....	69
Tableau 13 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Afrique.	73
Tableau 14 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Asie et en Océanie.	74
Tableau 15 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Europe, Russie et Amériques.....	75
Tableau 16 - Quelques nouveaux projets miniers susceptibles de produire du cobalt dans les prochaines années.....	76
Tableau 17 - Les trois indices de nickel de France métropolitaine ayant eu une petite production historique parmi les onze indices répertoriés par le BRGM dans SigMinesFrance.....	77
Tableau 18 - Productions mondiales annuelles récentes de cobalt selon différentes sources : production minière (à gauche) et production de cobalt raffiné (à droite).....	82
Tableau 19 - Productions minières annuelles récentes de cobalt de la R.D. du Congo, selon différentes sources.....	83
Tableau 20 - Comparaison des productions minières annuelles canadiennes de cobalt selon le site Internet de la NR-Can et selon les organismes extérieurs.	84
Tableau 21 - Les producteurs de cobalt raffiné (sources : CDI / Darton Commodities et USGS).	89

Tableau 22 - Estimation du contenu en métaux, dont le cobalt, des téléphones et ordinateurs portables (traduit et adapté d'un tableau intitulé « Urban mining potential », Umicore, 2011).....	98
Tableau 23 - Déstockage annuel brut du stock de défense étatsunien de cobalt, selon l'USGS (1996 à 2014).	102
Tableau 24 - Quelques prix du cobalt publiés par Metal Bulletin et Metal Pages mi-mars 2014.	105
Tableau 25 - Principales parts détenues par Gécamines dans les exploitations de cuivre-cobalt en RDC.....	114
Tableau 26 - Nuancier de produits standards proposés par Hexametal et leur composition en cobalt (www.hexametal.com).....	127
Tableau 27 - Composition de superalliages pour aubes monocristallines développés à l'Onera, en % massiques (Caron P. et Lavigne O., 2011).....	136
Tableau 28 - Composition de superalliages pour disques développés à l'Onera, en % massiques (Locq D. et Caron P., 2011).....	136
Tableau 29 - Utilisation de carbonate basique de cobalt dans les prémix destinés à l'alimentation animale fabriqués par SAFE (source : échange direct avec SAFE).....	139
Tableau 30 - Statistiques françaises d'import-export de produits bruts et intermédiaires de cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr	143
Tableau 31 - Statistiques françaises d'import-export de certains composés pouvant contenir (ou non) du cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr	146
Tableau 32 - Statistiques françaises d'import-export de mattes de nickel cobaltifères.	147
Tableau 33 - Statistiques françaises d'import-export de mattes de carbure de tungstène.....	147

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2013 n° 2101125281 relative aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, signée le 26 août 2013 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et le BRGM.

1.1. DÉFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales, que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

- **Criticité** : cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la (les) matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

- **Gisement** : concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable.
- **Indice ou prospect** : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.
- **Minéral/minéraux** : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.
- **Minerai** : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.
- **Minéralisation** : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.

- **Primaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage.
- **Potentiel géologique** : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.
- **Réserves** : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.
- **Ressource** : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction de la quantité et du détail des travaux réalisés.
- **Secondaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée par la Direction des Géoressources du BRGM. La complexité, l'opacité de la filière, la rareté de la documentation ainsi que le temps limité disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie du cobalt n'est pas toujours transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

Le cobalt fait partie des quatorze substances minérales considérées comme particulièrement critiques dans le cadre de l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne (« Critical Materials for the E.U. ») publiée le 30 juillet 2010 par la Commission Européenne dans le cadre de l'Initiative Matières Premières.

1.3. SOURCES DES DONNÉES

Le présent rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) (Shed, 2011, 2012, 2013) ;
- le document « Cobalt Market Review 2012-2013 », une étude spécialisée sur le cobalt publiée par Darton Commodities Ltd en janvier 2013 ;

- le document « The economics of cobalt, 11th edition 2007 », une étude spécialisée sur le cobalt publiée par Roskill Information Services Ltd en janvier 2007 ;
- le document « Cobalt » publié par le British Geological Survey (BGS) en 2009 ;
- la documentation en ligne du « Cobalt Development Institute » (CDI) (www.thecdi.com) ;
- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne de juin 2010 ;

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude, et en particulier les sites Internet des sociétés productrices ou consommatrices.

2. Le cobalt

2.1. DONNÉES DE BASE

Le cobalt, de symbole chimique Co, est un métal de transition proche du fer. Il occupe la 27^{ème} position dans le tableau de Mendeleïev (entre le fer et le nickel), dans la colonne 9 au-dessus du rhodium (Rh) et de l'iridium (Ir). Sous sa forme élémentaire, obtenue uniquement après raffinage, c'est un métal de couleur gris-argenté.

- symbole : Co ;
- numéro atomique : 27 ;
- masse atomique : 58,93 ;
- abondance dans la croûte terrestre : 25 à 29 ppm selon les auteurs (25 à 29 g/t).

Le tableau périodique des éléments est présenté ci-dessous. Le cobalt (Co) est encerclé en rouge. Les éléments sont classés par périodes et groupes.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides															
Lanthanides :			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides :			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figure 1 - Position du cobalt (Co) dans le tableau périodique des éléments.

Le cobalt ne possède qu'un seul isotope naturel stable, ^{59}Co , mais 22 isotopes artificiels radioactifs ont été synthétisés. Le tableau 1 ci-après liste ceux de ces isotopes qui ont une demi-vie d'au moins plusieurs jours. Les autres isotopes artificiels du cobalt sont très instables, avec une demi-vie de quelques heures au maximum. L'isotope radioactif ^{60}Co est fréquemment utilisé comme source de rayons gamma, par exemple dans le domaine médical (radiothérapie) ou pour la stérilisation alimentaire.

Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
⁵⁶ Co	artificiel	77,27 j
⁵⁷ Co	artificiel	271,79 j
⁵⁸ Co	artificiel	70,86 j
⁵⁹ Co	100 %	stable
⁶⁰ Co	artificiel	5,2714 ans

Tableau 1 - Les principaux isotopes du cobalt.

2.2. HISTORIQUE

Les composés du cobalt sont connus depuis l'Antiquité où ils étaient utilisés comme pigment bleu pour colorer les verres, poteries et céramiques. Le « bleu de cobalt » a ainsi été retrouvé dans des sculptures égyptiennes et des bijoux perses datant du III^e millénaire avant J.C., dans les ruines de Pompéi (détruite lors de l'éruption du Vésuve en 79 av. J.C.). En Chine, on le trouve dans des verres datant des dynasties Tang (618-907) et Ming (1368-1644).



Figure 2 - Utilisations antiques du bleu de cobalt.

à gauche : Vase de Portland (Rome, daté de 5-25 ap. J.C.) ; à droite : modèle d'un bateau romain en verre (Aquileia, Italie, 1-50 ap. J.C.) (©www.britishmuseum.org)

Le mot « cobalt » est dérivé de l'allemand « kobold » qui désigne une créature légendaire du folklore germanique cousine des gobelins. Ce terme était utilisé par les mineurs de l'Erzgebirge (Saxe) car les premières tentatives de fusion de ses minerais pour en valoriser l'argent et le nickel ont été des échecs, donnant par fusion un matériau cassant ou simplement des poudres (oxydes de cobalt II) qu'ils ne savaient pas traiter. Les mineurs croyaient donc que le minerai était ensorcelé.

Le cobalt fut isolé en 1735 par le chimiste suédois Georg Brandt. Il démontrera quelques années plus tard que c'est ce métal qui est à l'origine de la couleur bleue obtenue par coloration du verre avec le minerai, alors que cette teinture était auparavant attribuée au bismuth ou à l'arsenic.

Les premières mines dédiées à l'exploitation du smalt, un pigment bleu utilisé comme pigment à partir d'un minerai de smaltite (variété de skuttérudite $(\text{Co,Fe,Ni})\text{As}_{2-3}$) se développèrent entre le XVI^e et le XVIII^e siècles en Norvège, Suède, Saxe et Hongrie. Pendant le XIX^e siècle, l'entreprise norvégienne Blaafarveværket assurait près de 80 % de la production mondiale de bleu de cobalt, avant que le marché mondial ne s'élargisse grâce à la découverte de cobalt dans les minerais de Nouvelle Calédonie (1864), de l'Ontario au Canada (1904) et du Katanga au Congo alors Belge (1914). Dès lors, les mines européennes ont décliné et la production mondiale s'est tournée vers la Copper Belt (désormais en République Démocratique du Congo et en Zambie).

En 1938, l'isotope radioactif cobalt 60 fut découvert par John Livingood et Glenn Seaborg à l'Université de Berkeley en Californie.

Un historique très détaillé et très complet est publié par le Cobalt Development Institute (CDI, www.thecdi.com).

2.3. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Le cobalt pur, obtenu sous forme élémentaire Co uniquement après raffinage, est un métal de couleur blanc-gris argenté. Ses principales propriétés physiques sont les suivantes :

- densité : 8,9 ;
- dureté Mohs : 5,0 ;
- point de fusion : 1 495 °C ;
- point d'ébullition : 2 927 °C.

Le cobalt est un élément ferromagnétique qui possède le point de Curie⁷ le plus élevé des éléments connus, à 1 111 °C. Cette propriété explique la large utilisation de cet élément dans les aimants permanents, principalement les aimants Alnico (aluminium, nickel, cobalt), Sm-Co (samarium, cobalt) et Nd-Fe-B (néodyme, fer, bore), ainsi que dans les supports d'enregistrement magnétique.

2.4. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le cobalt est stable dans l'air et dans l'eau à température ordinaire. Il s'oxyde à chaud en Co_3O_4 , qui se transforme en CoO au-delà de 900 °C. Il réagit avec la plupart des acides pour former des sels bivalents (CoSO_4 , $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, CoCl_2 , etc.). Il forme aussi des sulfures, carbonates, halogénures, hydroxydes et toute une gamme de composés organiques et inorganiques, dont beaucoup ont des applications industrielles. Ses degrés d'oxydation les plus communs sont 0 (cobalt métal), +2 et mixte +2/+3 (comme

⁷ Le **point de Curie**, ou température de Curie, est la température à laquelle un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique perd son aimantation spontanée.

dans Co_3O_4). Il a une valence de +1 dans quelques composés complexes, et on lui connaît aussi des valences de -3 à +4.

2.5. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ

Le cobalt est un oligo-élément essentiel aux êtres vivants. Il entre dans la composition de la vitamine B12, également appelée cobalamine. Elle est essentielle au fonctionnement du cerveau (synthèse de neurotransmetteurs), du système nerveux (maintien de la gaine de myéline) et à l'hématopoïèse (formation des cellules sanguines). Elle intervient également comme coréacteur dans un grand nombre de réactions métaboliques, notamment dans la synthèse de l'ADN et de l'ARN, des acides gras et dans la production d'énergie.

La cobalamine n'est pas synthétisée directement par les animaux ou les végétaux mais seulement par fermentation bactérienne. Pour l'homme, un apport extérieur, provenant de l'alimentation, est donc nécessaire. Les œufs, les abats et les crustacés sont particulièrement riches en vitamine B12 (en moyenne 658 μg pour 100 g d'œuf dur, 74 μg pour 100 g de foie d'agneau ou encore 65 μg pour 100 g d'accras de morue d'après la table de composition nutritionnelle Ciquel (ANSES, 2012)).

L'apport journalier recommandé par l'Union européenne pour un adulte est de 2,5 μg de vitamine B12 (Directive 2008/100/CE).

Sachant que la teneur en cobalt de la vitamine B12 est de l'ordre de 4,5 % (varie légèrement selon le radical R, cf. fig. 4), et en prenant l'hypothèse de 7 milliards d'humains prenant quotidiennement la dose recommandée, cela représenterait une consommation totale d'environ 0,8 kg de cobalt par jour, soit au maximum⁸ 290 kg de cobalt par an pour l'humanité entière. L'essentiel de ce cobalt provient de l'alimentation naturelle et ne concerne donc pas le marché du cobalt (sauf indirectement par les compléments alimentaires pour le bétail), mais on voit que l'enjeu maximum, si ces 290 kg de cobalt devaient être prélevés sur le marché du cobalt, serait de quatre millièmes de ce marché de 72 kt/an.

À l'opposé, une surexposition au cobalt peut avoir des risques sur la santé humaine. Ils peuvent découler des propriétés chimiques de l'élément et de ses composés, ou des propriétés radiotoxiques de son isotope radioactif le cobalt 60.

L'inhalation de cobalt métallique, qui peut toucher des personnes travaillant dans l'industrie des métaux durs, peut provoquer une pathologie respiratoire non maligne. Elle peut se traduire par des rhinites, des conjonctivites, de l'asthme, des pneumopathies qui peuvent évoluer vers la fibrose pulmonaire, voire vers l'insuffisance respiratoire chronique dans des cas extrêmes. Un risque de cancers broncho-pulmonaires a également été décrit, rapporte l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, Moulin *et al.*, 2001).

⁸ La réalité est bien moindre puisque les 7 milliards d'humains ne sont pas tous adultes.

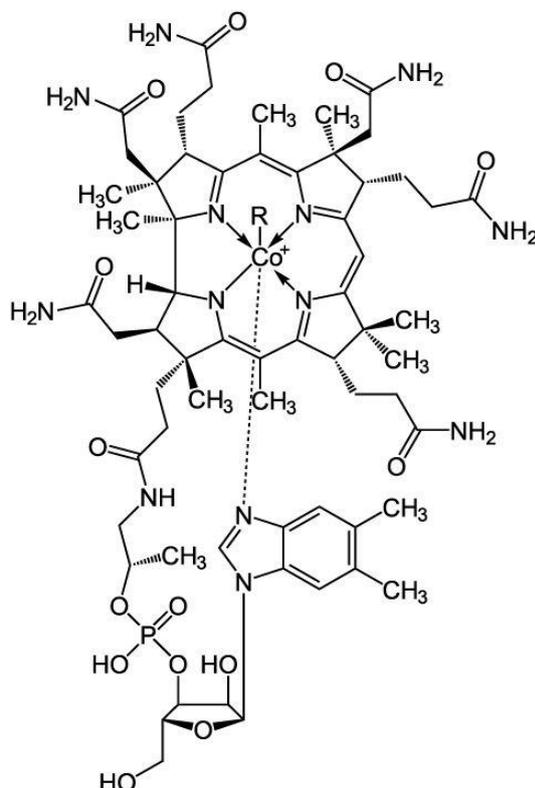


Figure 3 - Structure de la cobalamine (vitamine B12), avec R = CN, OH, CH3 ou 5-désoxyadénosyl (source : Wikimedia Commons).

Il existe peu de données concernant les effets sur l'homme des surexpositions au cobalt et à ses composés en dehors de l'industrie des métaux durs. Ses sels et oxydes, comme l'élément métallique, sont sensibilisants et peuvent produire une dermatite allergique. Des intoxications aiguës peuvent également donner un syndrome irritatif des voies respiratoires. De rares cas d'effets sur la glande thyroïde ont également été décrits (Moulin *et al.*, 2001). De plus, au milieu des années 1960, des cas d'intoxications (nausées et vomissements, et quelques cas mortels de cardiomyopathies) ont été observés chez de forts consommateurs de bière dont l'agent utilisé pour stabiliser la mousse était du cobalt (pratique désormais abandonnée). Mais des études complémentaires ont montré la forte intervention d'une composante alcoolique dans ces troubles cardiaques (Bisson *et al.*, 2006).

Une des sources d'exposition humaine nouvelle et récente est l'introduction dans le corps de prothèses avec un alliage au cobalt (de hanche en particulier) qui peut conduire à une augmentation du taux de cobalt sanguin après insertion de la prothèse. Leur usure libère des particules nanométriques qui diffusent dans le corps via la lymphe et le système vasculaire, avec de possibles réactions locales indésirables dans les tissus mous entourant la prothèse. Il est démontré que les particules nanométriques de cobalt sont plus toxiques que les particules micrométriques.

Le Centre International pour la Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le cobalt et ses composés dans le groupe 2B : « l'agent est peut-être cancérigène pour l'homme ». Le cobalt métal en présence de carbure de tungstène est, quant à lui, classé 2A (« l'agent est probablement cancérigène pour l'homme »). La dose létale médiane (DL_{50} , qui représente la quantité nécessaire à entraîner la mort de 50 % des individus testés) a été définie expérimentalement chez le rat entre 91 mg/kg (fluorure de cobalt) et 317 mg/kg (carbonate de cobalt), ce qui place les composés du cobalt comme « modérément toxiques » suivant l'échelle de Hodge et Sterner (Bisson *et al.*, 2006).

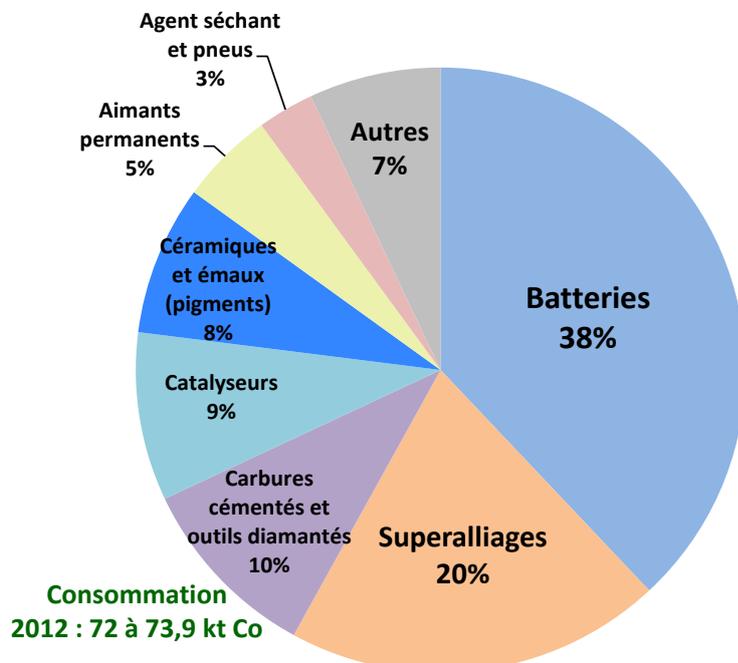
Une forte exposition au cobalt 60, radioactif, peut également avoir des conséquences sur la santé humaine : stérilité, chutes de cheveux, vomissements, hémorragies, coma et même entraîner la mort (Van der Voet *et al.*, 2013). Cet isotope est cependant uniquement fabriqué en laboratoire et utilisé dans des lieux autorisés pour le traitement de certains cancers (radiothérapie) ou pour la stérilisation alimentaire.

3. La demande : usages et consommation

3.1. USAGES DU COBALT PAR FILIÈRES

Le cobalt est principalement utilisé dans les batteries rechargeables (Li-ion, Ni-MH et Ni-Cd) où il entre dans la composition des cathodes (38 % de la consommation mondiale de cobalt en 2012). Il entre également dans la conception de superalliages destinés en particulier à l'aérospatiale et aux centrales électriques terrestres au gaz, ou de certains alliages pour prothèses orthopédiques. Il est utilisé comme matrice des carbures cémentés et outils diamantés utilisés entre autres pour la découpe et l'usinage. Environ 9 % de sa demande est à destination des industries chimiques et pétrochimiques où il est utilisé comme catalyseur pour diverses réactions. Son usage historique de pigment (bleu, vert, etc.) perdure dans les industries des céramiques et des émaux. Le cobalt est également utilisé dans la fabrication d'aimants permanents (AlNiCo, Sm-Co, Fe-Cr-Co), pour les supports d'enregistrement magnétique, comme agent siccatif pour les peintures et les encres, comme promoteur d'adhésion caoutchouc-acier dans les pneumatiques. Il est aussi utilisé comme complément alimentaire pour les animaux ou encore comme mordant pour l'industrie des textiles.

Répartition des usages du cobalt dans le monde en 2012 *(source : Darton Commodities Ltd)*



Répartition des usages du cobalt en Chine en 2012 *(source : Darton Commodities d'après Antaïke)*

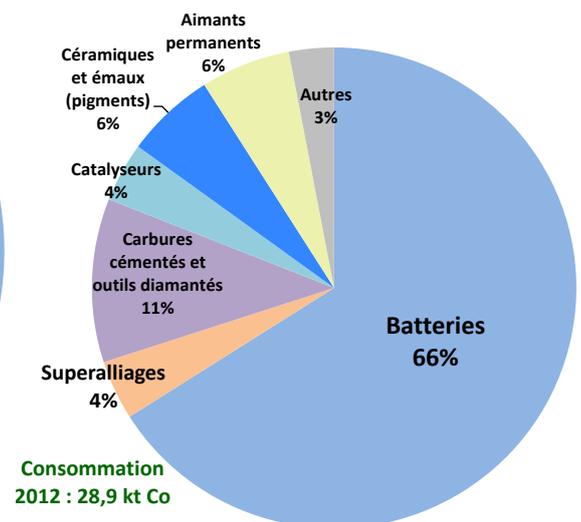


Figure 4 : Répartition de la consommation de cobalt en 2012 par usages dans le monde (à gauche) et en Chine (à droite) (Darton Commodities, 2013).

L'information sur le niveau de la demande mondiale en cobalt diverge selon les sources : le Cobalt Development Institute (CDI, 2013) estime la consommation mondiale de cobalt à environ 72 kt en 2012 vs 76,5 kt en 2011, soit une baisse de 5,9 %. Darton Commodities Ltd (2013) estime cette consommation à 73,9 kt en 2012 vs 69,2 kt en 2011, soit au contraire une hausse de 6,8 %.

Dans le passé, la demande en cobalt était dominée par l'industrie chimique. Désormais, la croissance de la demande mondiale de cobalt est tirée par les batteries lithium-ion pour les appareils électroniques portables (ainsi que l'outillage électrique portable par substitution des batteries Ni-MH), puis progressivement par la croissance attendue de la demande en batteries lithium-ion pour les véhicules électriques et hybrides, et peut être plus encore pour le stockage de l'électricité des énergies renouvelables intermittentes.

3.1.1. Batteries d'accumulateurs électriques

Le principal secteur de consommation du cobalt est désormais celui des batteries rechargeables. La consommation mondiale de cobalt dans le secteur des batteries était estimée en 2012 à 28 kt à 30 kt de Co contenu.

La technologie dominante des batteries rechargeables au long du XX^e siècle a été celle des batteries plomb - acide sulfurique, toujours très largement utilisée dans les transports (véhicules à moteurs thermiques), les groupes électrogènes et générateurs de secours (secteur médical, communication, batteries tampon des systèmes photovoltaïques) et autres dispositifs lourds. Les technologies sont éprouvées, mais ces batteries sont lourdes, avec un rendement énergétique rapporté au poids permettant difficilement des utilisations dans les appareils portables, et elles sont mal adaptées aux véhicules électriques en raison de la masse qu'elles imposent de transporter. Les batteries électriques au plomb - acide équipent toutefois aussi et encore la majorité des nombreux vélos électriques utilisés en Chine.

Les technologies de batteries de petite taille et plus légères se sont surtout développées à partir de 1990, d'abord entraînées par la formidable croissance des produits électroniques nomades grand public (téléphones portables et smartphones, ordinateurs portables, tablettes, appareils photo et caméras vidéo, baladeurs musicaux et vidéo, consoles de jeu portables, etc.), puis plus récemment par l'amorce de développement de moyens de transports individuels électriques (automobiles, mais aussi vélos et scooters).

Au début des années 1990, il s'agissait surtout des batteries Nickel-Cadmium (NiCd). À partir de 1995, se sont développées les batteries Nickel-Hydrure de Metal (« Nickel-Metal Hydride », NiMH), qui ont l'avantage de ne pas de contenir de cadmium, métal lourd toxique. Ce sont des batteries NiMH qui ont équipé les premiers véhicules hybrides électriques (Toyota Prius).

Les batteries au lithium, de type Lithium-ion, se sont surtout développées depuis la fin des années 1990 et prennent désormais une part croissante du marché. Les

technologies Lithium-ion donnent une meilleure densité d'énergie par rapport à leur masse et à leur volume que les batteries NiCd et NiMH (voir Tableau 2).

Des batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP), sans cobalt, ont été développées plus récemment pour les secteurs du véhicule électrique, en particulier par le groupe Bolloré pour sa BlueCar, mais aussi dans les secteurs des satellites et des télécommunications.

Type de batterie	capacité massique d'énergie (Wh/kg)	capacité volumique d'énergie (Wh/l)	Puissance en pointe (W/kg)	Tension d'un élément	Nbre de cycles	Effet mémoire*	Auto- décharge par mois	Coût (€/Wh, 2004)
Li-ion	150 - 190	220 - 400	1 500	3.6 V	1 200	non	2%	2
Li-polymère	150 - 190	220 - 330	250	3.7 V	200 - 500	non	2%	1.5 - 2
Li-phosphate	120 - 140	190 - 220	800	3.2 V	2 000	non	5%	1 - 1.8
Li-air	1 500 - 2 500	nd		3.4 V	nd	non	?	
Li-métal polymère	110	110	320	2.6 V	nd	non	?	
NiMH	60 - 110	220 - 330	900	1.2 V	1 500	oui	>30%	1.5 - 2
NiCd	45 - 80	80 - 150		1.2 V	2 000	oui	>20%	0.6
Pb-acide	30 - 50	75 - 120	700	2.25 V	500 - 1 200	oui	5%	0.2

* Baisse de capacité liée à des cycles incomplets de charge-décharge

Sources : Schwarz (ADEME), 2005 ; adapté avec Hocquard, 2009

Tableau 2 - Comparatif des performances des principaux types de batteries.

Les batteries au lithium sont aussi appelées à se développer pour le stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes, éolienne et photovoltaïque.

La part du secteur des batteries dans la demande mondiale en cobalt est devenue majoritaire. Elle est passée progressivement de 10 % en 2001 à 38 % en 2012⁹ (Roskill, 2007 ; CDI ; Darton Commodities, 2013).

Le cobalt est employé dans les cathodes des batteries nickel-cadmium (Ni-Cd), des batteries nickel-hydrures de métal (NiMH) et lithium-ion (Li-ion). Dans ces dernières, le matériau de la cathode peut contenir 60 % en masse de cobalt sous différentes formes chimiques, la principale étant encore l'oxyde mixte de lithium et de cobalt, ou cobaltate de lithium, LiCoO₂.

Le contenu moyen de cobalt varie selon les types de batteries :

- Ni-Cd : 0,1 à 0,6 kg Co par kWh ;
- Ni-MH : 0,6 kg Co par kWh ;
- Li-(Co)-ion : 1 kg Co par kWh.

⁹ Dernière minute : et même à 42 % en 2013, selon Darton Commodities, janvier 2014).

Les batteries lithium-ion au cobalt sont pour l'instant celles qui ont la plus grande capacité d'accumulation d'énergie par unité de masse (tab. 2 et fig. 5). Mais les autres types de batterie Li-ion peuvent avoir d'autres paramètres plus avantageux (puissance massique, résistance thermique, durée de vie, etc.).

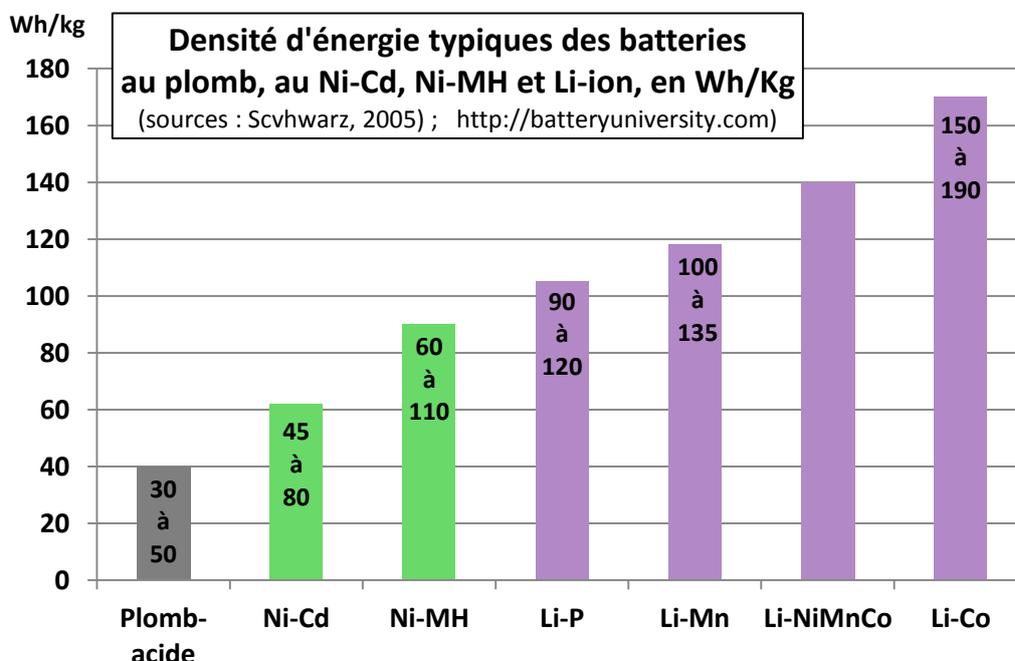


Figure 5 - Comparaison des capacités massiques d'accumulation d'énergie pour différents types de batteries.

Accumulateurs Ni-Cd

Entre 1 et 5 % de cobalt sont ajoutés à la cathode des accumulateurs Ni-Cd. L'ajout de cobalt en fine poudre (oxyde ou hydroxyde de cobalt) permet d'augmenter fortement la conductivité de l'électrode de nickel, de stabiliser mécaniquement cette électrode en évitant la formation d'oxy-hydroxyde de nickel à sa surface et d'accélérer la décomposition de l'électrolyte (CDI).

En raison de la présence de cadmium, toxique, une directive de l'Union Européenne a mis fin en 2006 à la commercialisation des batteries Ni-Cd en Europe pour les applications grand public, pour lesquelles elles ont été remplacées par des batteries Ni-MH, et désormais de plus en plus par des batteries Li-ion. Les batteries Ni-Cd conservent néanmoins des applications industrielles ou pour des dispositifs d'urgence, en raison de leur fiabilité et de leur robustesse.

Accumulateurs Ni-MH

Du cobalt entre en proportion variable dans l'anode en hydrure de métal des batteries Ni-MH, avec cathode en nickel. Le métal « M » est en fait un alliage intermétallique dont il existe deux types principaux :

- AB5 : (La,Ce,Nd,Pr)(Ni,Co,Mn,Al)5 ;
- AB2 : (Ti,V)(Zr ou Ni ± Cr,Co,Fe,Mn)2 qui présente une capacité plus importante.

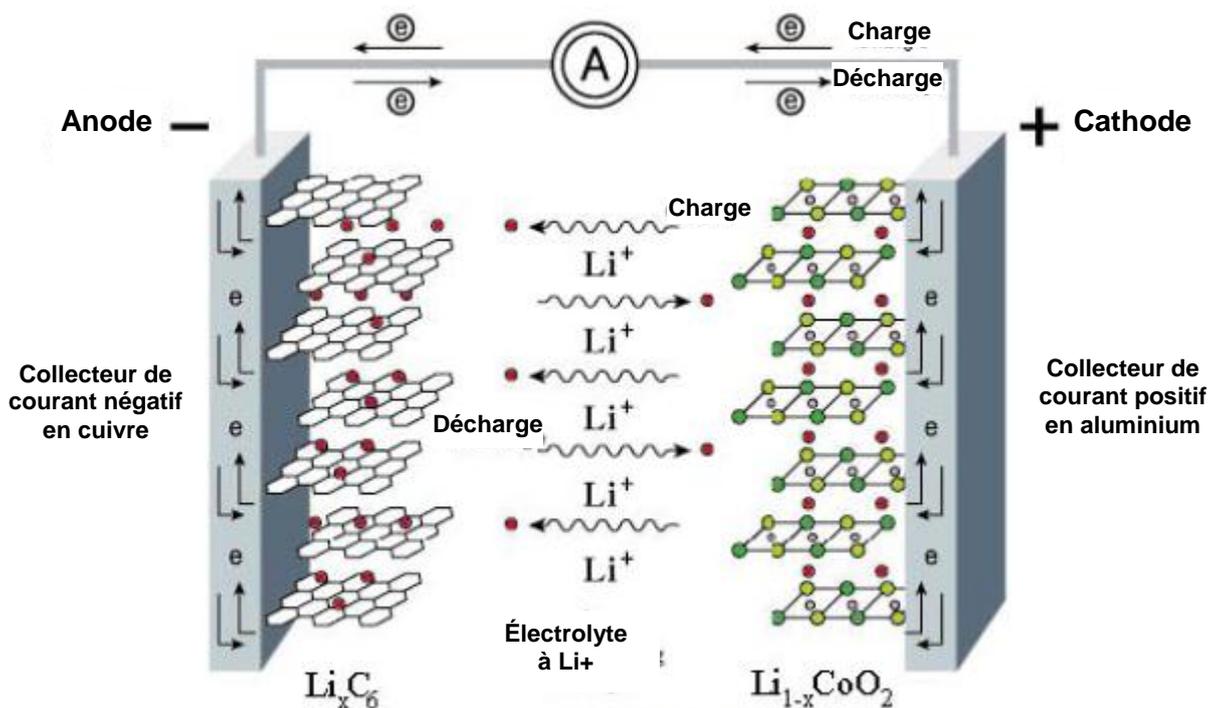
Les batteries Ni-MH, encore très répandues pour les applications grand public et qui avaient équipé les premières générations de véhicules hybrides (Toyota Prius), sont de plus en plus remplacées par des batteries Li-ion.

Accumulateurs Li-ion

Les accumulateurs Li-ion utilisent pour la cathode un oxyde mixte de lithium et d'un autre métal : cobalt (cobaltate de lithium, LiCoO_2), manganèse (spinelite de manganèse-lithium, LiMn_2O_4), nickel (LiNiO_2) ou de plusieurs autres métaux ($\text{Li}(\text{Co,Ni,Al,Mn})\text{O}_2$), ou encore du phosphate de lithium et de fer (LiFePO_4), sans cobalt.

À titre d'exemple, les réactions mises en œuvre dans les batteries Li-ion à cathode en LiCoO_2 sont les suivantes (fig. 6) :

- à la cathode : $\text{LiCoO}_2 \leftrightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x \text{Li}^+ + x \text{e}^-$;
- à l'anode : $x \text{Li}^+ + x \text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}_x\text{C}_6$.



Source: Fraunhofer ICT

Figure 6 - Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion (© Angerer et al., 2009, adapté).

Les avantages et inconvénients des différents types de batteries Li-ion et leurs usages préférentiels sont récapitulés aux tableaux 3 et 4.

Cathode	Énergie	Puissance	Sûreté	Durée de vie	Coût	Utilisations
LCO Cobaltate de lithium LiCoO ₂	+++	+++	-	++	+	Électronique portable
LMO Oxyde de Li-Mn LiMn ₂ O ₄	-	+++	++	-	++	HEV
NMC Oxyde de Li-Ni-Mn-Co Li(Ni _x Mn _y Co _{1-x-y})O ₂	++	++	++	+++	+++	Électronique portable PHEV, EV, Systèmes de stockage d'énergie
LFP Phosphate de Fe-Li LiFePO ₄	+	+++	+++	++	++	HEV, Systèmes de stockage d'énergie

Tableau 3 - Avantages et inconvénients des matériaux de cathode pour batteries Li-ion.
© Umicore, Key Developments in Rechargeable Battery Materials, Capital Markets, Séoul, 24 mai 2012, adapté.

Type	Acronyme	Cathode	Contenu en cobalt	Usages
Oxyde de lithium-cobalt	LCO	LiCoO ₂	60.2 % Co	Haute capacité. Pour téléphones cellulaires et smartphones, ordinateurs portables, tablettes, appareils photos, caméscopes, etc.
Oxyde de lithium-manganese	LMO	LiMn ₂ O ₄	-	Les plus sûres. Moindre capacité que LCO mais meilleures puissance et durée de vie. Pour outils, vélos électriques, voitures électriques, applications médicales
Phosphate de fer et lithium	LFP	LiFePO ₄	-	
Oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt	NMC	Li(Ni,Mn,Co)O ₂	20 % Co en 2012 appelé à baisser jusqu'à 12 %	Importance croissante pour la chaîne énergétique et le stockage des énergies intermittentes
Oxyde de lithium-nickel-cobalt-aluminium	NCA	Li(Ni,Co,Al)O ₂	9 % à 10 % Co	
Titanate de lithium	LTO	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	-	

Tableau 4 - Contenu en cobalt des différents types de batteries Li-ion.
Source : <http://batteryuniversity.com> ; Avicenne Energy (2013)

Les premières batteries Li-ion ont connu des déboires spectaculaires (stabilité thermique déficiente avec une inflammabilité explosive) en raison, soit de la présence de lithium métal, soit de problèmes d'impuretés métalliques, soit encore d'interrupteur de charge déficient, soit enfin de batteries bon marché de mauvaise qualité.

Plus récemment, ce sont les batteries Li-ion du Boeing 787 Dreamliner de type LCO (lithium cobalt oxide) d'ancienne génération du constructeur japonais Yuasa qui ont été à l'origine d'un début d'incendie. La responsabilité a été attribuée au cobalt, ce qui a conduit Airbus à revenir, probablement temporairement, sur les batteries Li-ion de Saft

pour des batteries plus classiques de type NiMH, plus lourdes et moins performantes, pour son A350.

Dans les batteries Li-ion de type LCO (avec cathodes de cobalt), la température ne doit en aucun cas excéder 130 °C, car à 150 °C les cellules deviennent très instables avec inflammation des gaz et propagation rapide aux autres cellules, avec une réaction en chaîne provoquant la destruction en quelques secondes du pack complet. Compte tenu de leur avantage sur la durabilité de la charge, les LCO sont maintenant réservées à l'électronique portable (téléphones, ordinateurs, tablettes, caméras, etc.).

Le constructeur automobile américain Tesla a cependant fait le choix de batteries Li-Co pour ses véhicules. Tesla a vendu 21 500 véhicules électriques en 2013 et projette d'en vendre 30 000 en 2014. Tesla utilise des batteries lithium-cobalt de Panasonic. Le bloc de batteries de 53 kWh pèse environ 450 kg. Cette énergie est délivrée par 6 831 cellules Li-ion qui sont disposées en onze modules. La société envisage par ailleurs la construction d'une usine géante aux États-Unis pour fabriquer ses batteries (dont le futur modèle « Gen III » prévu pour être commercialisé dès 2017 pour 35 000 US\$). L'ambition de Tesla est de construire à terme 500 000 véhicules. Ils pourraient continuer à être équipés de batteries de type Li-Co, Tesla considérant que les batteries plus récentes, de type Li-phosphate et Li-titanate, n'ont pas assez de capacité de stockage pour des automobiles 100 % électriques.

Les nouvelles batteries à cathodes de type manganèse ou phosphate-fer sont supérieures en termes de stabilité thermique. Elles supportent des températures supérieures à 250 °C. De plus, les batteries au manganèse ont une moindre résistance interne, et de ce fait délivrent une puissance spécifique plus grande, ce qui convient aux batteries de l'outillage électrique et d'appareils médicaux. Toutefois, leur densité énergétique est plus faible, environ la moitié de celle d'une batterie LCO, d'où le développement de composés mixtes à manganèse-cobalt de type NMC, mais avec cependant 3 à 6 fois moins de cobalt que les LCO. L'évolution vers des nano-composés est aussi un facteur de réduction.

Le pourcentage de cobalt de la cathode diminue considérablement avec les dernières évolutions (tab.4). Il passe de 60 % Co dans la batterie LCO (LiCoO_2) à 20 % Co actuellement dans la batterie NMC ($\text{Li}(\text{Ni},\text{Mn},\text{Co})\text{O}_2$) et à 9 à 10 % dans la batterie NCA ($\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$), voire sans cobalt pour les batteries LFP (LiFePO_4) et LMO (LiMn_2O_4). La tendance est aussi à diminuer la proportion de Co dans les batteries NMC : elle pourrait baisser dans les prochaines années jusqu'à 12 %.

Le marché des batteries Li-ion a augmenté en moyenne de 20,4 % par an entre 2004 et 2012 en volume¹⁰ (fig. 7)

¹⁰ Et même 25 %/an si on prend le taux de croissance moyen de 2000 à 2012 (cf. Pillot, 2013).

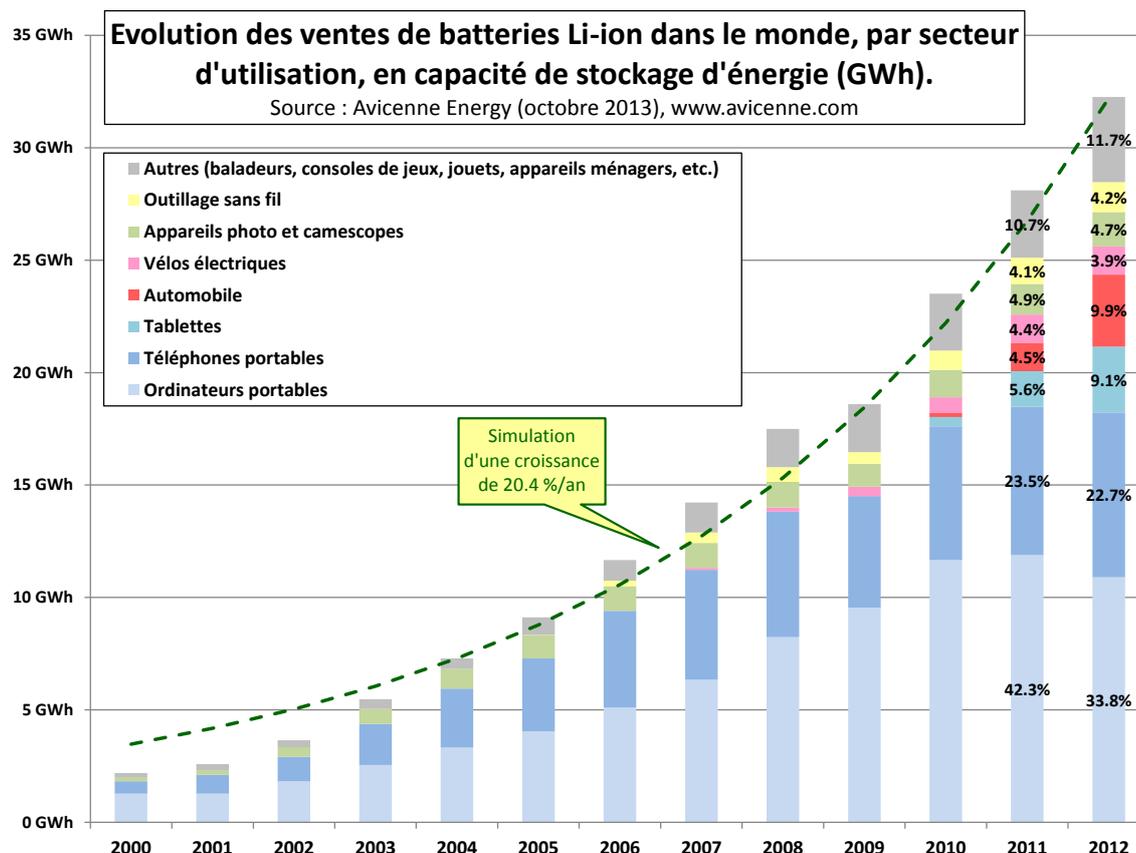


Figure 7 - Évolution des ventes de batteries Li-ion par secteur d'utilisation entre 2000 et 2012 (adapté d'après Pillot, Avicenne Energy, 2013).

La part des cathodes en cobaltate de lithium est passée de 82 % en 2007 à 39 % en 2012 (fig. 9). Néanmoins, en raison de la forte croissance du volume total de batteries Li-ion produites, et de la présence de cobalt aussi dans les batteries NMC et NCA, les besoins en cobalt pour les batteries Li-ion continuent à croître. Ces besoins ne sont pas détaillés dans les publications, mais une estimation sur la base de 60 % Co dans LiCoO_2 , 20 % en moyenne dans $\text{Li}(\text{Ni},\text{Mn},\text{Co})\text{O}_2$ (ratio moyen en 2012 selon Pillot, Avicenne Energy, 2013, mais appelé à diminuer dans l'avenir proche) et 10 % dans $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ conduit à estimer la croissance correspondante de la consommation en cobalt pour les cathodes des batteries Li-ion à 9,9 % par an, pour atteindre 22,4 kt en 2012 (ce qui est un ordre de grandeur compatible avec l'estimation de consommation de 28 kt de cobalt pour le secteur des batteries, puisque du cobalt est aussi utilisé dans les batteries Ni-Cd et Ni-MH ainsi que pour certaines anodes).

En ce qui concerne les voitures électriques, les cathodes utilisées sont, pour les modèles les plus vendus, plutôt du type LMO, NMC ou NCA, avec des contenus en cobalt de 0,3 à 1 kg pour les véhicules hybrides rechargeables (PHEV), 1 à 1,6 kg pour les véhicules électriques (EV) et jusqu'à 8 kg pour la Tesla S (Darton Commodities, 2014).

Pillot (Avicenne Energy, 2013) prévoit une poursuite de la forte croissance des batteries Li-ion et donc des matériaux pour cathode correspondants, de 74 kt en 2012 à 226 kt en 2020 et 338 kt en 2025 (fig. 8).

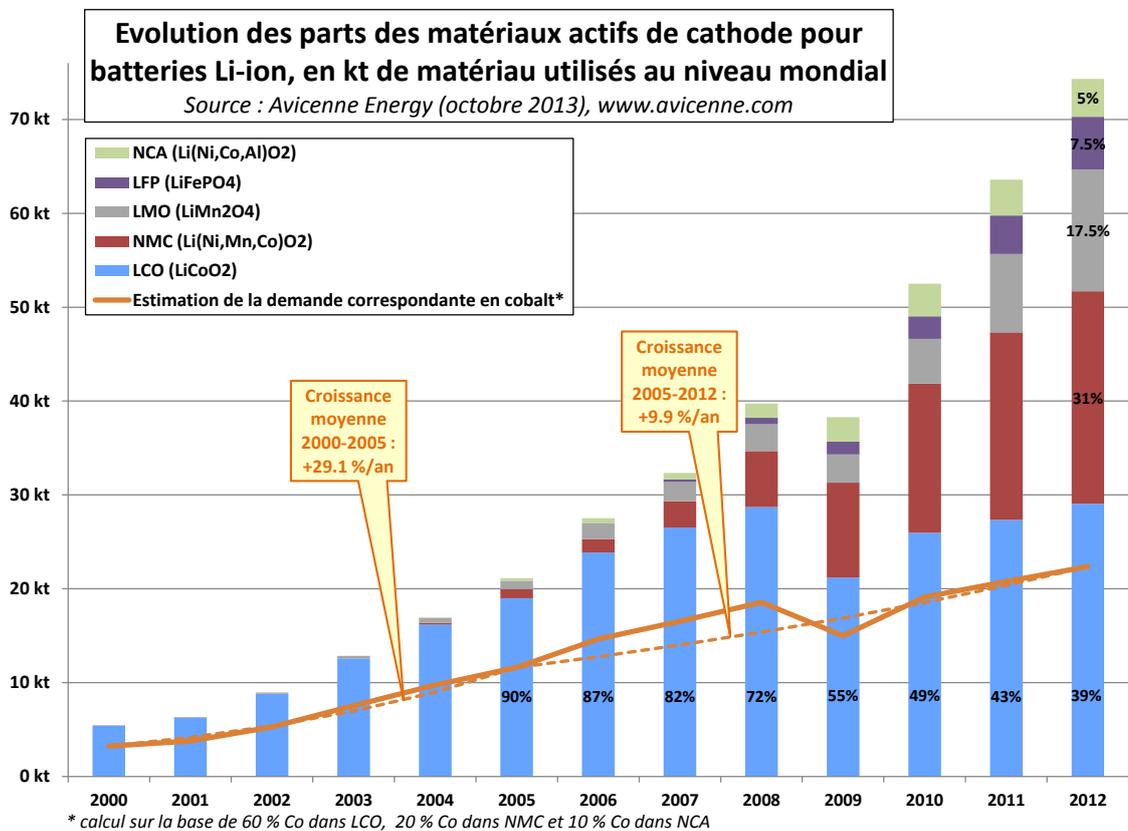


Figure 8 - Évolution des parts des matériaux actifs de cathode pour batteries Li-ion, selon Pillot (2013), et estimation de la quantité de cobalt contenu.

La recherche a identifié un très grand nombre de nouveaux matériaux potentiels (aussi bien pour l'anode que pour la cathode) pour les prochaines générations de batteries Li-ion (comme les batteries lithium-iode, Li-I₂). S'il est impossible aujourd'hui de dire quels matériaux vont émerger à long terme, il semble que la proportion de cobalt soit globalement appelée à diminuer – mais la quantité absolue continuera à augmenter avec l'augmentation du nombre de batteries.

Ainsi les cathodes LCO pourraient passer de 29 kt en 2012 (39,1 % de 74,3 kt) à 52 kt en 2020 (23 % de 226 kt, cf. fig. 8), ce qui équivaudrait à un quasi doublement de la demande en LiCoO₂ d'ici à 2020 malgré la forte pénétration des autres technologies Li-ion.

La demande en cobalt estimée correspondante aurait crû de 9,9 % par an en moyenne sur la période 2005-2012 (fig. 8), et devrait continuer à croître d'environ 8,9 % par an d'ici 2025 (fig. 9) en faisant l'hypothèse d'une baisse de la proportion de Co dans les cathodes NMC à 15 % à échéance 2025.

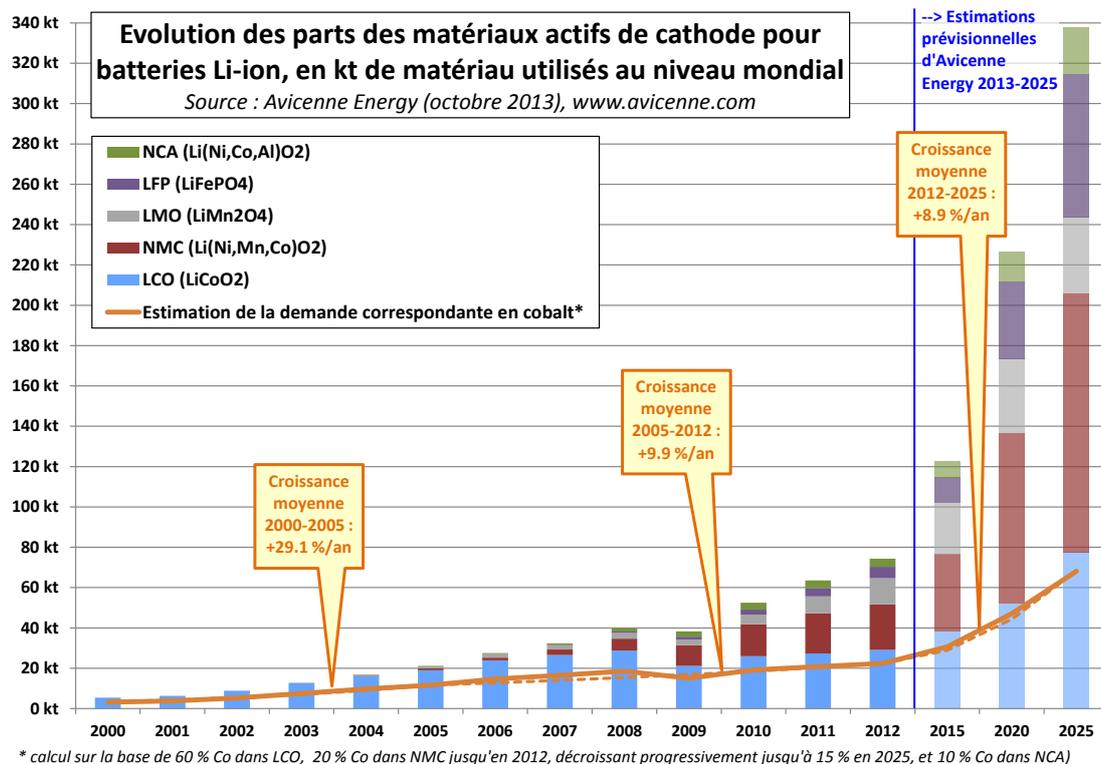


Figure 9 - Prévission à 2025 de l'évolution des parts des matériaux actifs de cathode pour batteries Li-ion, selon Pillot (2013), et estimation de la quantité de cobalt contenu.

De son côté, Roskill (2013) prévoit une poursuite de la croissance de la demande en cobalt pour les batteries Li-ion à 9,2 % par an d'ici à 2018, ce qui est d'un ordre de grandeur similaire à l'évaluation ci-dessus.

Darton Commodities (2014) évalue la consommation globale de cobalt pour le secteur des batteries rechargeables à 32,9 kt en 2013, soit 42 % de la consommation mondiale de cobalt, en hausse de 7,5 % par rapport à 2012. Ils estiment que la consommation en cobalt pour les batteries rechargeables, tous types confondus, continuera à s'accroître de 8,8 à 9 % par an d'ici 2020 (tab. 5)

	2012	2013	Variation 2012-2013	2016	Croissance annuelle moyenne 2013-2016	2020	Croissance annuelle moyenne 2016-2020
Li-ion / LCO	22.40 kt Co	23.85 kt Co	6.5%	28.80 kt Co	6.5%	39.30 kt Co	8.1%
Li-ion / NMC+NCA	5.70 kt Co	6.20 kt Co	8.8%	9.70 kt Co	16.1%	15.40 kt Co	12.3%
NiMH	2.20 kt Co	2.57 kt Co	16.8%	3.90 kt Co	14.9%	4.80 kt Co	5.3%
NiCd	0.30 kt Co	0.28 kt Co	-6.7%	0.22 kt Co	-7.7%	0.14 kt Co	-10.7%
Total	30.60 kt Co	32.90 kt Co	7.5%	42.62 kt Co	9.0%	59.64 kt Co	8.8%

Tableau 5 - Évolution récente et prévisionnelle future de la demande en cobalt pour les batteries rechargeables (© Darton Commodities Ltd, janv. 2014).

3.1.2. Superalliages

Les superalliages sont des alliages réfractaires utilisés principalement dans les parties chaudes des turboréacteurs pour l'aéronautique (65 %) et des turbines à gaz des centrales électriques à gaz (25 %). Ils sont aussi utilisés pour diverses applications industrielles, automobiles, militaires ou médicales (prothèses). Ils doivent avoir une bonne résistance à la chaleur, mais aussi à la fatigue, à la corrosion par oxydation, et au fluage.

Ce sont des alliages de compositions complexes surtout à base de nickel, allié avec des proportions variables de chrome, cobalt (jusqu'à 30 % Co), fer, ainsi que des quantités plus faibles de molybdène, tungstène, tantale, aluminium, titane, zirconium, niobium, vanadium, bore, voire en fonction des propriétés recherchées, des éléments plus rares comme le rhénium, le ruthénium, l'yttrium, le hafnium. Les plus connus sont le Nimonic 90 (18 % Co), Waspaloy (12-15 % Co), Hastelloy, Inconel (IN100, IN600, IN713), Rene (Rene 41, Rene 80, Rene 95, Rene N5), Haynes, Incoloy, MP98T, TMS, CMSX (CMSX-4, CMSX-10). Certaines compositions sont présentées au tableau 6.

Alliage	Ni	Cr	Co	Fe	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	C	B	Zr	Re	Hf	Mn	Si	Ru	V	Y	La
ATI 718Plus	51.3	19.0	9.0	9.0	2.8	1.1		5.6	1.45	0.75	0.03	0.006									
Astroloy	55.2	14.9	17.2		5.1				4.00	3.50	0.03		0.04								
CMSX2	66.6	8.0	4.6		0.6	7.9	5.8		5.60	0.90											
CMSX4	63.0	5.7	11.0		0.4	5.2	5.6		5.20	0.74				3.0	0.10						
CMSX6	70.6	9.8	5.0		3.0		2.1		4.80	4.70											
CMSX10	69.6	2.0	3.0		0.4	5.0	8.0	0.1	5.70	0.20				6.0	0.03						
FT750DC	66.6	20.0		5.0		3.5			2.30	2.10	0.07	0.005									0.4
Hastelloy X	41.9	22.0	1.5	18.5	9.0	6.0					0.10					0.5	0.5				
Hastelloy S	68.8	15.5		1.0	14.5				0.20		0.02	0.009									0.02
Inconel 600	76.6	15.8		7.2							0.04					0.2	0.2				
Inconel 718	53.0	18.6		18.5	3.1			5.0	0.40	0.90	0.04					0.2	0.3				
Inconel 625	62.1	22.0	0.1	3.0	9.0			3.5	0.10	0.20	0.01										
MA758	68.6	30.0				0.5			0.30		0.05										0.6
MA760	68.8	19.5		1.2	3.4				6.00		0.06										1.0
MA6000	71.6	15.0		1.5	3.9				4.50	2.30	0.06										1.1
MAR-M200	60.8	9.0	10.0			12.0		1.0	5.00	2.00	0.15	0.015	0.05								
Nimonic 80A	75.5	19.5	1.1						1.30	2.50		0.060									
Nimonic 105	54.6	14.5	20.0	4.5	5.0					1.20		0.200									
PM1000	75.6	20.0		3.0					0.30	0.50											0.6
Rene N5	61.6	7.0	8.0		2.0	5.0	7.0		6.20					3.0	0.20						
Rene N6	57.8	4.2	12.5		1.4	6.0	7.2		5.75					5.0	0.15						
Rene 41	55.3	19.0	11.0		10.0				1.50	3.10	0.09	0.050									
RR2000	67.0	10.0	15.0		3.0				0.05	4.00										1.0	
RR3000	67.8	2.3	3.3		0.4	5.5	8.4		5.80	0.20				6.3	0.03						
UCSX1	60.5	2.3	6.0		1.5	7.0	8.4		5.80	0.20				6.3	0.03					2.0	
UCSX8	56.0	2.3	6.0		3.0	6.0	8.4		5.80	0.20				6.3	0.03					6.0	
SRR99	66.5	8.5	5.0			9.5	2.8		5.50	2.20											
TMS 63	71.4	6.9			7.5		8.4		5.80	0.00											
TMS75	65.9	3.0	12.0		2.0	6.0	6.0							5.0	0.10						
TMS138	62.9	3.0	12.0		3.0	6.0	6.0							5.0	0.10					2.0	
TMS162	59.2	2.9	5.8		3.9	5.8	5.6		5.80					4.9	0.10					6.0	
Udimet 500	53.6	18.0	18.5		4.0				2.90	2.90	0.08	0.006	0.05								
Udimet 700	53.4	15.0	18.5		5.2				4.30	3.50	0.08	0.030									
Waspaloy	58.3	19.5	13.5		4.3				1.30	3.00	0.08	0.006	0.06								

Tableau 6 - Composition (en %) de divers superalliages
(www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html).

La consommation de cobalt par le secteur des superalliages aurait été de 14,7 kt en 2013, à un niveau similaire à celui de 2012. Mais la vigueur des commandes

aéronautiques d'une part, les signes de reprise économique aux États-Unis et un basculement de certaines productions énergétiques du charbon au gaz dans ce pays d'autre part, devrait tirer la demande en superalliages et conduire à une hausse correspondante de la demande en cobalt.

3.1.3. Autres alliages de haute performance au cobalt

Alliages résistants à la corrosion

Les alliages durs à base de cobalt sont massivement employés dans la robinetterie nucléaire et en particulier dans le circuit primaire des réacteurs à eau sous pression.

Alliages pour prothèses orthopédiques et dentaire

Les alliages de cobalt comme l'alliage de type CoCrMo (Co : 66 %, Cr : 29 %, Mo : 5 %) par exemple, sont très utilisés en médecine pour la fabrication des prothèses tant en orthopédie comme en odontologie grâce à sa rigidité et son état de surface lisse et résistante à l'usure et à la corrosion. Ces alliages évitent aussi les allergies au nickel. Les prothèses orthopédiques au cobalt ne seraient toutefois pas exemptes de toxicité (cf. 2.5).

Les alliages de type Stellite sont connus depuis le XIX^e siècle. Ce sont des alliages de cobalt-chrome-tungstène avec du carbone qui conduit à la formation de carbures de chrome et tungstène. Ils sont très durs et très résistants à l'usure. L'alliage Stellite6® contient 58,2 à 59 % Co, 28 % Cr, 4,5 % W, 1,2 % C, ≤3 % Ni, ≤3 % Fe, 1 % Mn, 1,1 % Si (source : www.stellite.com)

Aujourd'hui, le Vitallium®, alliage de cobalt (65 %) - chrome (27 %) - molybdène (5 %) est utilisé pour des prothèses dentaires et des prothèses de hanches et genoux.

Certaines pièces en alliage de cobalt sont désormais « imprimées » en 3D (fabrication additive) avec la technique E-Beam (EBM) et frittage laser direct de métal (DMLS). Elles présentent une meilleure qualité que celles obtenues avec les méthodes de production traditionnelles comme le moulage à cire perdue.

La plupart des statistiques disponibles sur le cobalt ne détaillent pas les consommations pour ces alliages, elles sont intégrées soit dans les superalliages, soit dans les « autres et divers ».

3.1.4. Carbures cémentés et outils diamantés

Les carbures cémentés (ou frittés) sont des matériaux très durs, très résistants et réfractaires obtenus à partir de grains monocristallins de carbure de métal (ou, plus rarement, de carbonitride de métal comme TiCN) maintenus dans une matrice de liaison à base de cobalt, de nickel ou de fer. Les carbures cémentés les plus fréquents sont ceux de tungstène (WC), de titane (TiC) et de tantale (TaC).

Le cobalt est le métal qui a les meilleures propriétés pour lier les carbures. Il a l'avantage de « mouiller » le carbure de tungstène et forme un eutectique partiel avec WC à 1 275 – 1 350 °C, en deçà de la température de fusion du cobalt (1 495 °C).

Le tableau 7 donne des compositions type de carbures cémentés à base de carbure de tungstène et de cobalt (Cobalt Development Institute, 2006).

Co	TiC	NbC	TaC	WC	Usages
3 %				97 %	Forage de précision
6 %				94 %	Usinage général
7 %				93 %	
9 %				91 %	
13 %				87 %	Pièces d'usure
18 %				82 %	Utilisations en impacts forts
20 %				80 %	Utilisations en impacts forts
5.8 %		0.3 %	2.0 %	91.8 %	Usinage général
6.7 %	6.1 %	2.6 %	7.9 %	76.7 %	Outils de formage
10.7 %	8.4 %	1.8 %	6.1 %	73.0 %	Coupe
13.0 %	4.0 %			83.0 %	Matriçage
15.0 %			3.4 %	81.6 %	Filières d'extrusion

Tableau 7 - Quelques compositions type de carbures cémentés à base de WC liés par du cobalt (Source : Cobalt Development Institute, 2006).

Les carbures cémentés sont utilisés dans une large gamme d'applications industrielles (cf. Audion & Labbé, 2012), telles que :

- outils d'usinage et de coupe (scies, forets, fraises, outils de tour, poinçons... Ils sont donc utilisés dans toutes les industries appelées à découper et usiner des métaux, comme les industries automobiles, aéronautiques, ferroviaires, navales, etc.) ;
- filières de tréfilage ou de compactage ;
- revêtement de matériaux pour en diminuer l'usure ;
- outils de gros œuvre et de travaux publics (bulldozers, excavateurs, et tous engins de terrassement, forages, exploitation minière, tunneliers...) ;
- autres (billes de stylos, munitions perce-blindage, bijouterie...).

Selon l'ITIA, les secteurs d'utilisation des outils en carbure de tungstène se répartissent comme suit (fig. 10).

Le cobalt est aussi utilisé pour cimenter les diamants des outils diamantés, comme les scies diamantées pour le sciage des roches, les disqueuses, les têtes d'outils de forage ou les meules pour le facettage des gemmes.

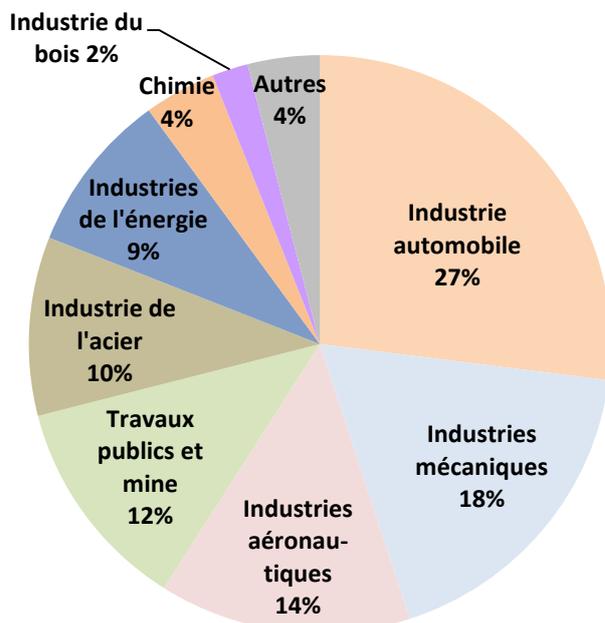


Figure 10 - Répartition des usages du carbure de tungstène par filière industrielle (source : Monier et al., 2010, d'après ITIA, 2008).

Le secteur des carbures cémentés et outils diamantés aurait consommé environ 7,3 kt de cobalt en 2013, soit 10 % de la consommation mondiale de cobalt. Selon Darton Commodities (2013), cette consommation aurait un peu baissé en 2013, à 7,1 kt, en raison entre autres de stocks antérieurs importants et de la faiblesse de la construction automobile européenne, l'un des secteurs les plus consommateurs d'outils de coupe et d'usinage (cf. fig. 10). Selon Darton Commodities citant Sandvik, l'un des leaders mondiaux des outils de coupe, la demande pourrait reprendre à un rythme de 3 à 4 % par an.

3.1.5. Catalyseurs au cobalt

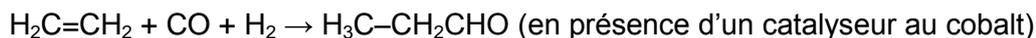
Le cobalt et certains de ses composés ont des propriétés catalytiques qui sont utilisées dans quatre principales filières.

Les catalyseurs CoMOX (composé de 3 à 5 % d'oxyde de cobalt Co_3O_4 , 14 % de trioxyde de molybdène MoO_3 et 79 à 81 % d'alumine Al_2O_3) sont utilisés pour la désulfuration des hydrocarbures (pétrole et gaz naturel) par hydrogénation. Ils sont aussi utilisés pour les traitements de l'eau. La demande correspondante en cobalt reste dynamique avec la généralisation des normes de désulfuration des carburants à davantage de pays. Darton Commodities (2014) envisage une croissance de cette demande à 3 à 4 % par an.

Un catalyseur mixte d'acétate de cobalt ($\text{CoC}_4\text{H}_6\text{O}_4$) et de bromure de manganèse et de sodium est utilisé pour la conversion du xylène en acide téréphtalique (TPA) et pour la production de di-méthyltéréphtalate (DMT), produits précurseurs pour la fabrication du téréphtalate de polyéthylène (PET, pour les bouteilles de boissons par exemple,

mais aussi des fibres textiles synthétiques) et d'autres plastiques très résistants. D'après Darton Commodities (2014), la demande correspondante en cobalt est assez stable, car les catalyseurs sont bien recyclés.

Le carbonyle de cobalt (ou octocarbonyle de dicobalt, $\text{Co}_2(\text{CO})_8$), éventuellement généré in situ à partir de cobalt métal, oxyde, hydroxyde ou sel inorganique de cobalt, est utilisé dans les réactions d'hydroformylations (également appelées OXO) de type



Les produits formés par la synthèse OXO sont utilisés comme intermédiaires dans la fabrication d'un nombre important d'espèces chimiques, comme les alcools, les amines ou les acides.

Un catalyseur formé de 20 % de cobalt métallique et <1 % de métal dopant sur base d'oxyde est utilisé pour le procédé Fischer-Tropsch de conversion du monoxyde de carbone et de l'hydrogène en hydrocarbures, selon la réaction principale :



au cours de laquelle d'autres hydrocarbures sont également formés (alcènes, alcools etc.), le mélange obtenu sert ensuite de base à la fabrication de carburants de synthèse.

Ce procédé, d'abord mis au point pour fabriquer des carburants liquides à partir de charbon (Coal to Liquids, CTL)¹¹, est désormais largement utilisé pour la conversion en hydrocarbures liquides de synthèse des hydrocarbures gazeux (GTL, ou « Gas to Liquid », fig. 11) ou de la biomasse (Biomass to Liquids, BTL).

Les catalyseurs utilisés peuvent être à base de fer, de ruthénium et de cobalt. On distingue la catalyse Fischer-Tropsch haute température (HTFT) à 330-350 °C qui utilise le fer (usines CTL de Sasol) de la catalyse Fischer-Tropsch basse température (LTFT) qui privilégie le cobalt (usine GTL de Shell en Malaisie).

Pour la conversion de biomasse ligno-cellulosique (bois, paille) en liquide (BTL), les étapes consistent en un prétraitement thermique (pyrolyse / torréfaction à 300 °C dans un courant d'azote en absence d'oxygène) avec du cobalt en catalyseur, une gazéification puis une conversion chimique en carburant liquide par synthèse Fischer-Tropsch avec catalyseur au cobalt (unité pilote de torréfaction de la biomasse à l'IFP-Lyon).

Le catalyseur ne participe pas directement à la réaction chimique. Néanmoins, il doit être périodiquement régénéré, à des rythmes différents selon les usines et les procédés. Dans les usines GTL de Shell de Pearl (Qatar) et Bintulu (Malaisie), les catalyseurs peuvent rester efficaces pendant 3 à 4 ans, et la demande en catalyseurs

¹¹ Ce procédé avait été mis au point dans les années 1920 par Franz Fisher et Hans Tropsch pour fabriquer des carburants liquides à partir de charbon. Il a été abondamment utilisé en Allemagne durant la Seconde Guerre Mondiale et en Afrique du Sud lors de son isolement pendant l'apartheid.

est donc cyclique. Les usines de GTL de Sasol de Mossel Bay (Afrique du Sud), Oryx (Qatar) et Escravos (Nigeria) fonctionnent en lit fluidisé qui demande une régénération plus continue du catalyseur et donc une demande plus régulière.

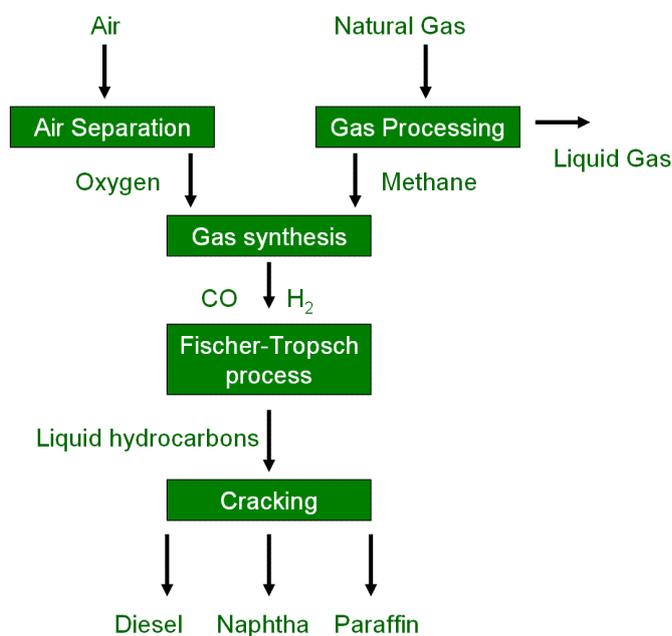


Figure 11 - Schéma du procédé GTL utilisant le procédé Fischer-Tropsch.

Les usines GTL représentent des investissements de plusieurs milliards de dollars et ne sont justifiées qu'avec un différentiel de prix suffisant entre le gaz naturel et le pétrole ou les hydrocarbures liquides.

La capacité mondiale annuelle en GTL est estimée à 250 000 barrils/jours (Darton Commodities, 2014), et pourrait être amenée à doubler avant la fin de la décennie, avec l'arrivée en production de projets majeurs (Oltin Y'ol en Ouzbékistan, Westlake et Gulf Coast aux États-Unis), et divers autres projets de moindre dimension.

Le Cobalt Development Institute (2006) indique qu'environ 100 et 200 t de cobalt sont nécessaires pour une capacité de production de 10 000 barrils par jour d'hydrocarbures liquides, et a estimé la demande mondiale de cobalt pour les procédés GTL à 1 000 t en 2005. Selon Darton Commodities (2014), elle aurait été de 350 à 450 t Co en 2013, mais devrait augmenter pour atteindre 2 000 t en 2020.

Toutes catalyses confondues, la demande en cobalt aurait été de 7 200 t en 2013 (Darton Commodities, 2014).

Les propriétés catalytiques du cobalt font toujours l'objet de recherches :

- de nombreux travaux de recherche visent à substituer le platine pour la production d'hydrogène et/ou d'oxygène par électrolyse de l'eau. L'un des composés prometteurs est sous forme de nanoparticules (ce qui augmente considérablement la

capacité catalytique, liée directement à la surface de contact) de cobalt enrobées d'un oxo-phosphate de cobalt ;

- des recherches pour réaliser la photosynthèse catalytique, pour convertir du dioxyde de carbone en carburants liquides, sont menées au laboratoire de Berkeley. L'une des voies de recherche utilise 4 à 8 % d'oxyde de cobalt Co_3O_4 nanostructuré sur un substrat de silice poreuse (avec un procédé en deux temps, avec une décomposition de la molécule d'eau, qui fournit les électrons nécessaires pour réduire le dioxyde de carbone en carburant liquide).

3.1.6. Pigments

Les propriétés colorantes des minéraux de cobalt sont utilisées depuis l'Antiquité (cf. 2.2).

Des pigments à base de composés de cobalt sont encore largement utilisés dans les industries de la céramique, du verre et des émaux, ainsi que dans les beaux-arts, la teinture et la décoration (fig. 12).



Figure 12 - Pigments de bleu de cobalt (bleu royal à gauche, bleu vert à droite)
(www.artantiquequebec.com).

Ces pigments sont généralement des oxydes mixtes de cobalt et d'autres métaux ou éléments. Dans la céramique, ils peuvent être préparés sous forme d'oxydes ou de sels décomposables à haute température comme les sulfates.

L'Index International des Couleurs (International Colour Index), qui classe les pigments utilisés en peinture, répertorie les pigments suivants à base de cobalt :

- PB28 : bleu de cobalt (ou bleu roi) : aluminate de cobalt de structure spinelle CoAl_2O_4 ;
- PB35 : bleu céruléen : stannate de cobalt CoSnO_3 ;
- PB72 et PB74 : bleus de cobalt foncé, respectivement : aluminate de cobalt et de zinc et silicate de cobalt et de zinc ;
- PB36 : turquoise de cobalt : oxydes de chrome, de cobalt et alumine ;
- PB32 : le smalt, très utilisé à la Renaissance, obtenu à partir de la smaltite, une variété de skuttérodite de formule idéale $(\text{Co,Fe,Ni})\text{As}_2$. Ce pigment est maintenant remplacé par les bleus de cobalt synthétiques ;
- PY 40 : Jaune de cobalt (ou jaune auréoline) : Hexanitritocobaltate (III) de potassium $\text{K}_3[\text{Co}(\text{NO}_2)_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$;

- PG 19 : Vert de cobalt : combinaison d'oxyde de cobalt et de zinc ;
- PG 26 : Vert de cobalt chrome : combinaison d'oxydes de cobalt et de chrome ;
- PG 50 : Vert de cobalt titane : combinaison d'oxydes de cobalt et de titane ;
- PV 14 : Violet de cobalt : phosphate de cobalt.

Le chlorure de cobalt est aussi utilisé comme mordant dans les opérations de teinture (textile).

Dans le verre, 2 ppm de cobalt donnent déjà une légère teinte, et 200 ppm donnent un bleu profond. Des quantités infimes peuvent permettre au contraire de décolorer un verre en supprimant la teinte jaunâtre donnée par des impuretés en fer (Cobalt Development Institute).

La consommation en cobalt du secteur des pigments aurait été de 5 400 t en 2013, en baisse par rapport à 2012, reflétant la morosité économique en Europe.

3.1.7. Aimants permanents

Dès 1917, du cobalt a été ajouté à l'acier des aimants permanents pour en améliorer les performances.

Le cobalt est, avec le fer et le nickel, l'un des métaux ferromagnétiques. C'est lui qui a la plus haute température de Curie (au-delà de laquelle il perd ses propriétés magnétiques), de 1 121 °C (contre 770 °C pour le fer et 368 °C pour le nickel). Un alliage 65 % Fe - 35 % Co a une température de Curie de 900-950 °C.

À partir des années 1940, des alliages AlNiCo ont été développés pour les aimants permanents. Ils contiennent 35 à 62 % Fe, 7 à 12 % Al, 13 à 20 % Ni, 2 à 35 % Co, et certains contiennent aussi quelques pourcents de Cu, Ti ou Nb.

Les aimants SmCo, de formule Co_5Sm , encore plus performants, ont été développés à partir des années 1970. Ils sont désormais de plus en plus concurrencés par les aimants Fer-Néodyme-Bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), développés à partir des années 1980¹².

Ces nouveaux aimants ont permis de fortes réductions de tailles des équipements nécessitant de tels aimants, comme en particulier les moteurs électriques synchrones, mais aussi les haut-parleurs et écouteurs de téléphones, etc. Ils sont donc appelés à se développer considérablement à court et moyen termes avec les nouvelles réglementations européennes qui vont exiger de plus hauts rendements des moteurs électriques (électroménager, cycles, robots, automobile, etc.).

¹² Un aimant samarium-cobalt possède une énergie spécifique de 240 kJ/m³ à 25 °C avec une température d'utilisation pouvant aller jusqu'à 550 °C. Un aimant néodyme-bore possède une énergie spécifique de 380 kJ/m³ à 25 °C, mais avec une température d'utilisation de seulement 220 °C.

Darton Commodities (2014) évalue la consommation mondiale dans ce secteur d'application à 4 000 t/an de Co, dont 70 % pour les AlNiCo, 20 % pour les Sm-Co et 10 % pour les aimants en acier et autres, et estime que cette consommation évoluera peu dans les prochaines années, les aimants au cobalt perdant des parts de marché face aux aimants Fe-Nd-B.

3.1.8. Les siccatifs pour peintures et adhésifs pour pneumatiques (carboxylates de cobalt)

Les carboxylates de cobalt, appelés aussi « savons de cobalt », sont formés par réaction du cobalt avec divers acides organiques. Ils incluent divers composés, tels que naphtéate, néodécanoate, linoléate, octoate, oléate, stéarate de cobalt, etc.

Ils sont utilisés comme siccatifs dans les peintures ou comme promoteurs de réticulation dans les résines polyester. Les carboxylates de cobalt, combinés à des carboxylates d'autres métaux, permettent d'ajuster le temps de séchage des peintures glycérophthaliques. Une peinture glycérophthalique contient typiquement de l'ordre de 0,06 % de cobalt (Roskill, 2007).

Des carboxylates (naphtéate, stéarate, néodécanoate) de cobalt entrent aussi dans la fabrication des pneumatiques à carcasse radiale (fig. 13), ou bien des bandes transporteuses (cf. encadré ci-après), afin d'améliorer l'adhérence du caoutchouc sur les armatures d'acier. Ces utilisations sont connues depuis les années 1970 mais ne se sont généralisées que dans les années 1980, avec la systématisation des pneus à carcasse radiale.

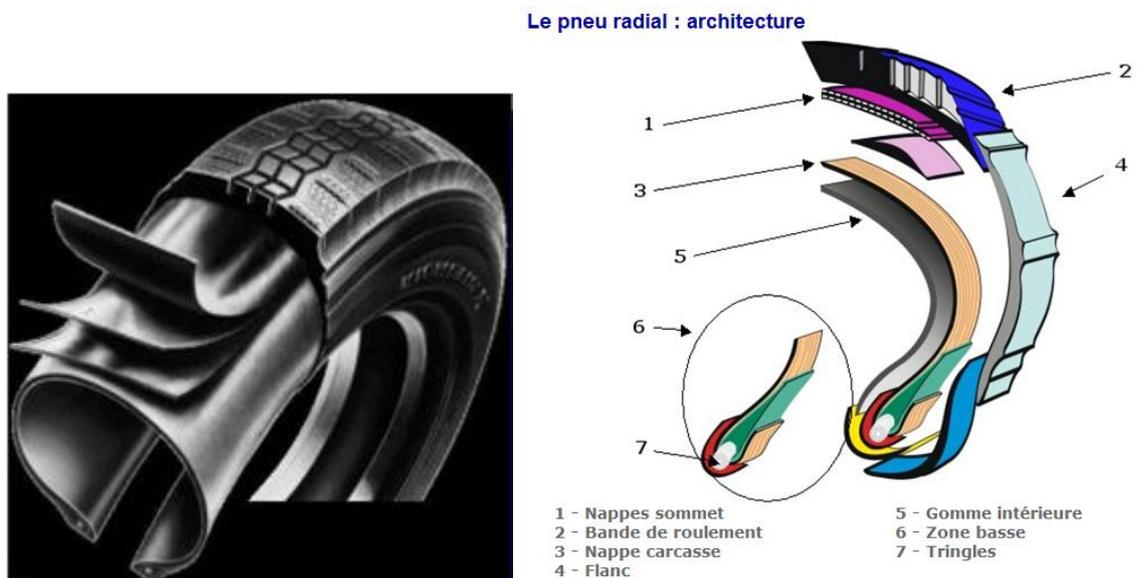


Figure 13 - Architecture d'un pneu radial ceinturé (www.michelintransport.com).

Des brevets pour les promoteurs d'adhésion du caoutchouc sur câbles d'acier ont été déposés dans les années 1980 par des chercheurs japonais. D'autres brevets donnent quelques détails d'utilisation de savons de cobalt pour la fabrication de bandes transporteuses, comme par exemple le texte d'un brevet de Bridgestone Corp. : « La composition caoutchouc pour bande transporteuse ci-décrite est caractérisée en ce qu'elle contient de 0,5 à 3 parties en poids de diméthacrylate de zinc, de 1 à 10 parties en poids d'un composé de néodécanoate de cobalt et de 0,5 à 4 parties en poids de stéarate de cobalt pour 100 parties en poids du composant caoutchouc. Une bande transporteuse à corde en acier galvanisé recouverte d'une couche de caoutchouc adhésive servant de corps central entre des couches de revêtement en caoutchouc est également décrite, ladite bande transporteuse étant caractérisée en ce que la couche caoutchouc adhésive est formée à partir de la composition caoutchouc décrite ci-dessus. La composition caoutchouc démontre une excellente adhérence à une corde en acier galvanisé, une bonne formabilité au rouleau et une bonne aptitude au laminage. La bande transporteuse utilisant ladite composition caoutchouc possède une excellente durée de vie et productivité ». (© <http://ip.com/patfam/fr/43011095>).

La consommation en cobalt pour ces applications était estimée par Roskill (2007) à 2 500 t/an Co pour les peintures et 2 000 t/an Co pour les pneus et autres dispositifs en caoutchouc. Darton Commodities (2014) estime la consommation totale (peintures et pneus) à 2 300 t Co en 2013.

La baisse de la consommation dans les peintures est liée d'une part à la diminution des parts de marché des peintures glycérophtaliques par rapport aux peintures acryliques, d'autre part aux dispositions européennes REACH avec restriction des usages de savons de cobalt qui poussent à des substitutions.

Dans le secteur des pneumatiques, Darton Commodities (2013 et 2014) attribue la baisse relative de la consommation à la faiblesse de la construction automobile en Europe. Mais cette analyse demanderait à être approfondie puisque, dans le même temps, le marché automobile chinois continue sa croissance et continue à tirer à la hausse le marché mondial : la production automobile mondiale a cru de + 5,5 % entre 2011 et 2012, et + 3,7 % entre 2012 et 2013 (source : www.oica.net).

3.1.9. Électronique

En plus de ses usages pour les batteries (cf. 3.1.1) et pour les aimants permanents (cf. 3.1.7) qui peuvent équiper des appareils électriques et électroniques, le cobalt a des applications dans les composants électroniques et les supports d'enregistrement magnétiques.

Semi-conducteurs, circuits intégrés (« puces ») et cartes électroniques

Un peu de cobalt peut être utilisé dans les circuits intégrés, où l'or des contacteurs peut être associé à un peu de cobalt pour en améliorer la résistance à l'usure ; pour la confection de certains semi-conducteurs utilisant de l'or ou du platine ; pour les parties

métalliques des cartes et supports, en alliage avec d'autres métaux (fer, nickel) pour en ajuster les coefficients de dilatation thermique, etc.

Enregistrement magnétique

Les bandes magnétiques encore très utilisées jusqu'à il y a une dizaine d'années pour les enregistrements audio et vidéo, ou encore les bandes d'enregistrement de données informatiques ou les disquettes, utilisaient un dépôt d'oxyde de fer (ferrite) dopé au cobalt. Ces technologies ont pratiquement disparu au profit de nouvelles technologies d'enregistrement, sauf pour certaines sauvegardes informatiques.

Dans les disques durs (et, jusqu'à il y a quelques années, les disquettes), les données sont aussi stockées par une couche magnétique. La densité de données enregistrables n'a cessé de croître, depuis $0,04 \text{ ko/cm}^2$ en 1956 jusqu' à 2 Go/cm^2 aujourd'hui. La couche magnétique est obtenue par pulvérisation sous vide de cobalt-nickel ou de cobalt-chrome sur substrats d'aluminium ou de céramiques (fig. 14), avec désormais des intercouches de quelques atomes d'épaisseur de platine ou de ruthénium. Mais les quantités globales de cobalt utilisées sont faibles.

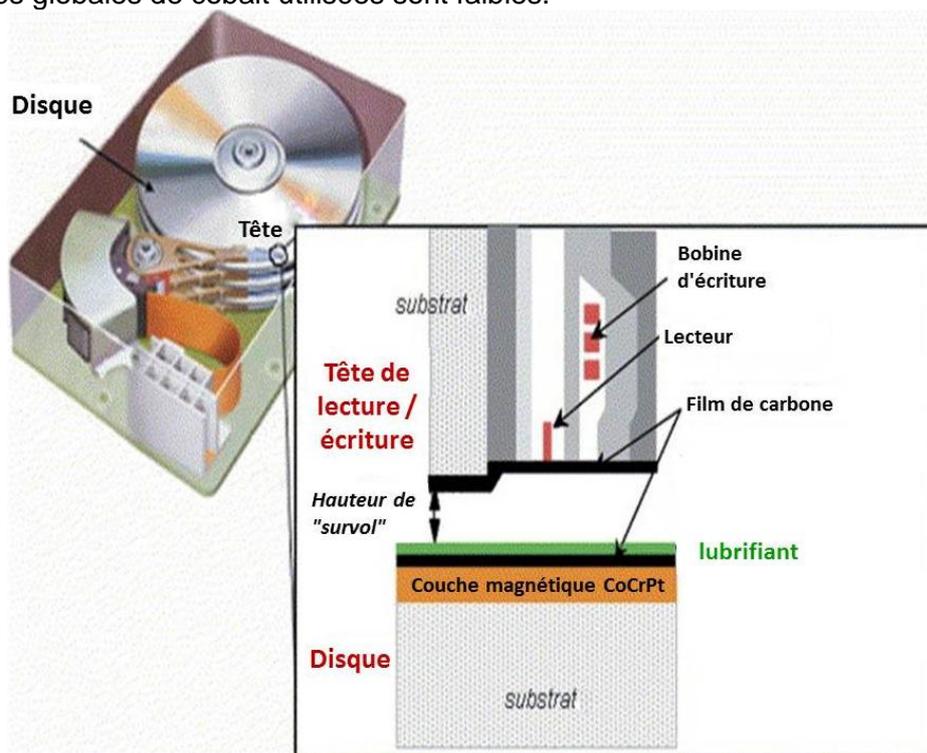


Figure 14 - Schéma simplifié d'un disque dur.

3.1.10. Agriculture, médecine

Le cobalt est un oligo-élément, entrant en particulier dans la composition de la vitamine B12 (cf. 2.5). Du cobalt sous forme de sulfate ou de carbonate est utilisé en

complément alimentaire pour le bétail et en particulier les ruminants, dans la panse desquels il favorise la synthèse bactérienne de la vitamine B12.

Il peut être dispersé comme un engrais dans les prairies destinées à être pâturées (350 g/ha à la fin du printemps selon le distributeur néozélandais Ravensdown (www.ravensdown.co.nz)).

Roskill (2007) estimait la consommation de cobalt par cette filière à environ 500 t/an.

Les déficiences humaines en cobalt peuvent être traitées par des prises de vitamine B12 (cf. 2.5). Certains laboratoires commercialisent du gluconate de cobalt comme complément alimentaire.

Un composé de cobalt, l'éthylène-diamine-tétracétate de dicobalt $\text{Co}_2\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_6$ est utilisé comme antidote aux empoisonnements au cyanure, en raison de la rapidité de sa complexification des ions cyanure sous forme stable.

3.1.11. Radiothérapie

Le cobalt-60 (l'isotope 60 du cobalt), instable et radioactif, avec une période radioactive de 5,3 ans (1 925 jours), n'existe pas dans la nature. Il se désintègre par rayonnement en isomères du nickel 60 qui se stabilisent en émettant des rayons gamma de 1,1732 et 1,3325 MeV, longtemps utilisés en radiothérapie ainsi que pour la stérilisation et l'irradiation des aliments.

Le cobalt 60 est synthétisé par bombardement du cobalt 59 (le seul isotope stable du cobalt, cf. 2.1 et tableau 1) par des neutrons thermiques. Il existe également dans les effluents liquides des centrales nucléaires, en quantité infimes en dessous des normes admissibles.

L'usage du cobalt 60 en radiothérapie est désormais largement substitué par des accélérateurs linéaires, en raison des problèmes de gestion de ses déchets.

La quantité de cobalt primaire utilisée pour la production de cobalt 60 est extrêmement minime et négligeable dans le marché général du cobalt.

3.1.12. Autres usages

Production de cuivre par électrolyse

L'ajout d'un peu de cobalt dans les bains d'électrolyse du cuivre, dans les procédés SX-EW¹³, après l'extraction par solvant, permet d'atténuer la corrosion des anodes, lorsque le minerai de cuivre n'est pas déjà naturellement cobaltifère. Les

¹³ SX-EW : Solvent-Extraction – ElectroWinning, procédé hydrométallurgique d'extraction du cuivre de certains minerais, en particulier oxydés.

concentrations en cobalt nécessaires sont faibles, et la consommation totale de cobalt par l'industrie de la production du cuivre est estimée par Roskill (2007) à 50 à 100 t/an.

Anodisation

De l'acétate ou du sulfate de cobalt sont utilisés pour anodiser l'aluminium pour produire des teintes bronze à noires. La consommation est minime (<50 t/an, selon Roskill, 2007).

Plaquage et dépôt en couches minces

On peut utiliser du chlorure ou du sulfate de cobalt pour déposer (électrodéposition) une mince couche de cobalt sur des aciers ou autres métaux pour en améliorer les résistances à la corrosion, à l'usure, à la chaleur, pour en adapter les propriétés magnétiques ou pour en diminuer la friction.

Fabrication des diamants synthétiques

La fabrication de diamants industriels synthétiques peut se faire à haute pression – haute température (HPHT) en compressant à 5 GPa du graphite inséré dans des couches de cobalt porté à 1 500 °C.

La fabrication de diamants synthétiques s'est montée à 880 t (4,4 Gcts) en 2012, à comparer à 15,6 t (78 Mcts) de diamants industriels naturels extraits et 14,2 t (71 Mcts) de diamants gemmes extraits en 2012 (USGS, 2013).

La consommation de cobalt correspondante n'est pas renseignée dans les publications accessibles du Cobalt Development Institute ni de Darton Commodities, mais elle est mentionnée dans certaines présentations de sociétés citant des études et graphiques de CRU, d'où il ressort que cette consommation est inférieure à 1 kt/an.

Joellerie

Un peu de cobalt (5 %) peut être allié au platine de joellerie pour en faciliter la gravure fine.

3.2. USAGES DU COBALT PAR COMPOSÉS

Le tableau 8 donne un récapitulatif simplifié des destinations par usage des composés de cobalt les plus courants.

Composés du cobalt	Formule	Usages
Co métal	Co	Superalliages, aciers spéciaux (stellites), métaux durs (carbures, cermets), aimants permanents, catalyseur (GTL)
Carboxylates (« savons ») de Co : - naphténate de Co - stéarate de Co - octoate de Co - etc.	CoC ₂₂ H ₁₄ O ₄ CoC ₃₆ H ₇₀ O ₄ CoC ₁₆ H ₃₀ O ₄	Adhérence du caoutchouc, siccatif pour peintures, encres et vernis, réticulation des résines polyester
Cobaltate de lithium	LiCoO ₂	Cathode des batteries Li-ion
Sulfate de cobalt	CoSO ₄	Pigments (céramique et faïence), engrais, traitement des eaux
Chlorure de cobalt	CoCl ₂	Mordant pour la teinture des textiles, Fabrication du cobalt radioactif
Carbonate basique de cobalt	2CoCO ₃ .3Co(OH) ₂ .xH ₂ O	Alimentation du bétail
Sels de cobalt (nitrate, acétate...)	Co(NO ₃) ₂ CoC ₄ H ₆ O ₄	Catalyse (pétrochimie...), fabrication de médicaments et de produits vétérinaires
Hydrure d'alliage métallique complexe	(La, Ce, Nd, Pr)(Ni, Co, Mn, Al) ₅ (Ti, V)(Zr ou Ni ± Cr, Co, Fe, Mn) ₂	Anode des batteries Ni-MH
Oxyde de cobalt, oxydes mixtes de cobalt et autre métal	Co ₃ O ₄ (CoMO _x)	Pigments, revêtement de supports d'enregistrement magnétique, catalyse

Tableau 8 - Quelques composés de cobalt les plus courants et leurs usages principaux.

3.3. CONSOMMATION

3.3.1. Évolution récente de la consommation

Les données statistiques sur la demande annuelle en cobalt sont assez disparates selon les sources, et les données qui permettraient d'arbitrer et de se rapprocher de la vérité semblent inexistantes ou non disponibles.

Ainsi le Cobalt Development Institute (CDI) avertit déjà, dans son document « Cobalt Fact 2013 - Cobalt supply and demand 2012 »¹⁴, que « la partie la plus difficile pour interpréter les équations d'offre et de demande est de quantifier de manière fiable les chiffres collectés. Il est généralement admis que les chiffres basés sur les rapports officiels sont plus faibles que les chiffres réels. Le CDI continue son analyse critique des données d'import/export des années précédentes pour essayer d'améliorer les statistiques sur le demande ». Or, il est notoire que les statistiques d'import/export, si elles ont l'avantage d'exister et sont un indicateur à prendre en compte, sont rarement

¹⁴ disponible sur www.thecdi.com/cdi/images/documents/Cobalt%20Facts%20-%20Supply%20-%20Demand%20-%202012.pdf, accédé le 27/08/2013 et le 29/01/2014

exhaustives et rarement assez précises pour identifier et quantifier tous les flux (cf. chapitre 7 avec l'exemple de la France).

Le même document de CDI écrit : « Les données publiées suggèrent que la demande en 2012 a été d'environ 72 kt, ce qui représente une chute de 6 % par rapport à l'année précédente ». On en déduit que la demande en 2011 aurait été de 76,6 kt environ.

De son côté, Darton Commodities publie, en janvier 2014, une demande mondiale en cobalt de 77,8 kt pour 2013, en hausse de 4,4 % par rapport à 2012 (donc de 74,5 kt en 2012), et publiait en janvier 2013 une demande en cobalt de 73,9 kt en 2012, en hausse de 6,8 % par rapport à 2011 (donc de 69,2 kt en 2011).

Le graphique publié par le Mining Journal dans son numéro du 6 décembre 2013 (fig. 16) citant DMM advisory group¹⁵ mentionne aussi une hausse significative et continue de la consommation de cobalt depuis 2009. Enfin le graphique publié par Formation Metals Inc. citant CRU et CDI¹⁶ indique aussi une hausse significative et continue de la consommation de cobalt depuis 2009, avec une hausse de 6,1 % entre 2011 et 2012 (fig. 15).

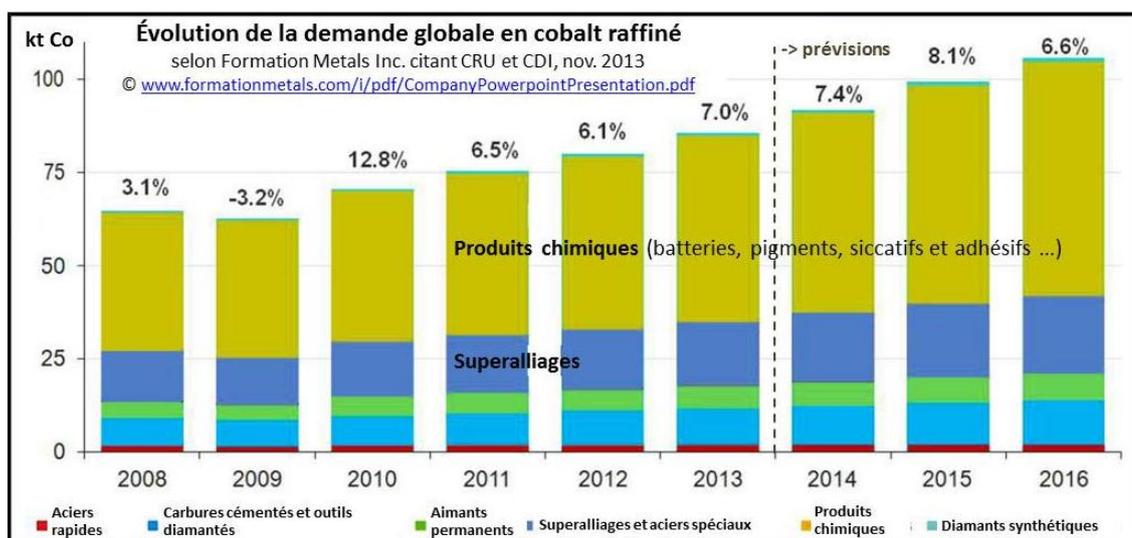


Figure 15 - Évolution récente (2008-2013) et prévisionnelle (2014-2017) de la consommation globale en cobalt, selon Formation Metals Inc (nov.2013) se référant à CRU et CDI.

L'implication pour le marché du cobalt d'une baisse de 6 % en un an entre 2011 et 2012 (CDI, 2013) ou à l'inverse d'une hausse de 6,1 % (Formation Metals Inc, nov. 2013, citant CRU et CDI) ou même de 6,8 % (Darton Commodities, janv. 2013) est évidemment très différente. Nous retiendrons ici plutôt les analyses autres que CDI.

¹⁵ librement accessible sur www.dmmadvisorygroup.com/english/pdf/MJCobaltarticle061213.pdf

¹⁶ librement accessible sur www.formationmetals.com/i/pdf/CompanyPowerpointPresentation.pdf

Faute de données chiffrées propres et précises, les figures 15 et 16 reproduisent les graphiques publiés par Formation Metals Inc (nov. 2013) d'une part et Mining Journal d'autre part (déc. 2013). La plupart des analystes semblent donc évaluer la croissance de la demande en cobalt à plus de 6 % par an depuis 2009.

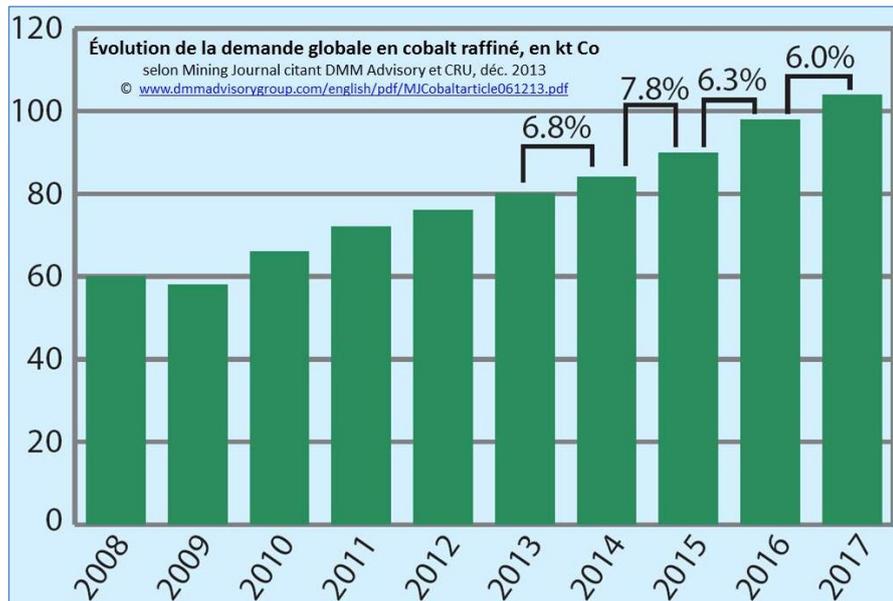


Figure 16 - Évolution récente (2008-2013) et prévisionnelle (2014-2017) de la consommation globale en cobalt, selon Mining Journal et DMM Advisory Group (déc.2013) se référant à CRU.

3.3.2. Perspectives d'évolution de la demande

Plusieurs analyses récentes publiées prévoient une poursuite de la croissance de la demande en cobalt d'au moins 6 % par an dans les 4 prochaines années (2014-2017) (cf. 3.3.1, fig. 15 selon CRU/CDI et fig.16 selon DMM advisory Group). Roskill (2014) annonce, dans son prospectus sur son analyse devant sortir en 2014, une prévision de croissance de la demande de 6 % par an d'ici à 2018.

D'après les perspectives de croissance des secteurs des batteries au lithium (cf. 3.1.1) et de la construction aéronautique (cf. 3.1.2), il est vraisemblable que de telles croissances assez fortes se poursuivront encore plusieurs années au-delà de 2017-2018.

Il convient de souligner la difficulté et les aléas des prévisions. Ainsi en mars 2009, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) publiait le rapport établi par Öko-Institut intitulé « Critical Metals for future sustainable technologies and their recycling potential » (Buchert *et al.*, 2009). Ce rapport prévoyait une croissance de la demande en cobalt de 1,7 % à 2,8 % par an d'ici 2020 (fig. 17).

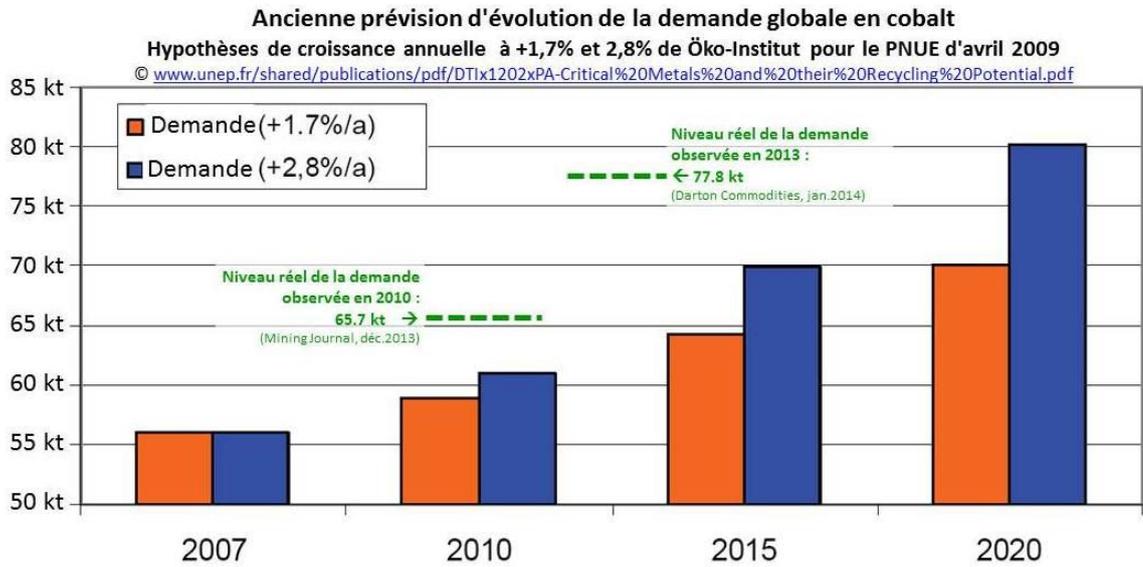


Figure 17 - Prévisions largement dépassées d'évolution de la demande en cobalt qui avait été établies par Öko-Institut en 2008 et publiée en 2009, et confrontation avec les consommations observées en 2010 et 2013.

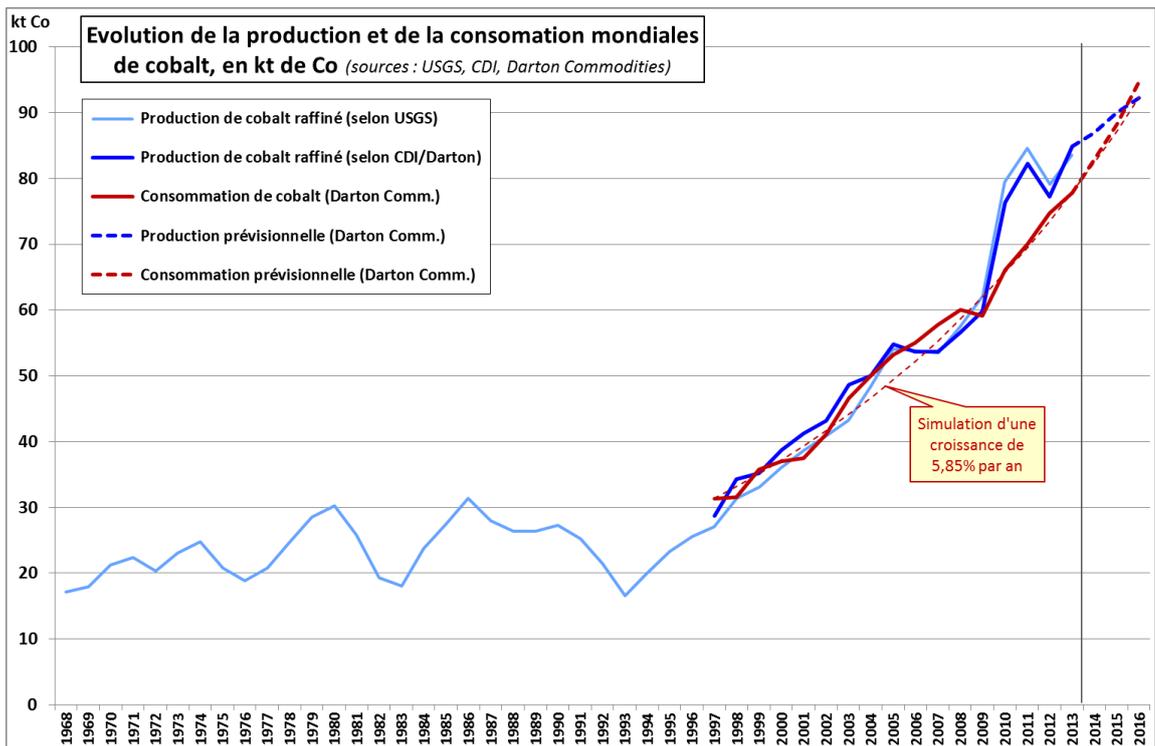


Figure 18 - Évolution de la consommation mondiale de cobalt depuis 2000 et perspectives d'évolution d'ici 2016 (sources : Darton Commodities et CDI), avec évolution de la production depuis 1968 (sources : USGS, CDI et Darton Commodities).

Ces anticipations de 2008-2009 étaient bien en deçà de ce qui a été observé depuis lors, puisque en 2013, la consommation (77,8 kt Co) a déjà largement surpassé les prévisions les plus hautes de 2009, et surpassait déjà la prévision basse de 2020.

La figure 18 met en perspective les prévisions d'évolution de la consommation de cobalt dans les trois prochaines années avec l'historique de la consommation et de la production depuis 1982. En intégrant la baisse de 2009, on voit que la croissance moyenne de la consommation de cobalt entre 1997 et 2013 a été de 5,85 %.

Si l'on extrapole jusqu'à 2020 une croissance de la demande de 5,85 % par an telle qu'observée de 1997 à 2013 ou de 6 % par an telle qu'anticipée par les analyses récemment publiées pour 2014 à 2017, la demande annuelle en cobalt en 2020 sera de 123 à 124 kt.

3.4. SUBSTITUTIONS

Compte tenu du prix relativement élevé du cobalt et de sa volatilité, des substitutions lui sont toujours activement recherchées.

Des solutions alternatives au cobalt existent pour les cathodes des batteries rechargeables, et en particulier des batteries Li-ion (cf. 3.1.1 et tableaux 3 et 4), mais le cobalt garde des avantages inégalés pour les batteries des appareils nomades (ordinateurs, tablettes, téléphones).

Les aimants permanents au cobalt peuvent être substitués, dans de nombreux cas, par des aimants NdFeB, mais le néodyme n'est pas moins critique que le cobalt.

Pour les autres usages, lorsque le cobalt continue à être utilisé, c'est généralement parce que c'est ce métal qui assure la meilleure performance pour l'usage recherché.

Le cobalt n'est pas substituable, dans les superalliages et autres alliages dans lesquels il est actuellement utilisé, sans perte de performances.

De même il reste le métal le plus performant comme matrice des carbures cémentés, pour les enregistrements magnétiques.

Dans le secteur des pigments, des pigments organiques peuvent se substituer aux oxydes minéraux, mais ils sont en général moins stables.

4. L'offre : ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE COBALT

4.1.1. Abondance du cobalt dans l'écorce terrestre

Le cobalt se situe, par ordre d'abondance décroissante, au 30^e rang sur 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre (tab.9). Son abondance moyenne dans la croûte terrestre (« clarke ») est estimée entre 25 et 29 ppm selon les auteurs, légèrement inférieure à celle de terres rares telles que le néodyme ou l'yttrium. Il est deux fois moins abondant que le cuivre (60 à 62 ppm), et deux fois et demi plus abondant que le plomb (11 ppm).

Rang	Élément	%	ppm	ppb	Rang	Élément	%	ppm	ppb	Rang	Élément	%	ppm	ppb
1	O	44,3			29	Y		29,6		57	W		1,15	
2	Si	27,4			30	Co		27,7		58	Mo		1,14	
3	Al	8,22			31	Sc		24,4		59	Tb		0,99	
4	Fe	5,86			32	N		19,6		60	Tl		0,58	
5	Ca	4,67			33	Ga		18,4		61	Lu		0,53	
6	Mg	2,64			34	Nb		17,6		62	Tm		0,46	
7	Na	2,45			35	Li		17,0		63	I		0,41	
8	K	1,77			36	Pb		11,0		64	In		0,34	
9	Ti	0,63			37	B		8,94		65	Sb		0,20	200
10	H	0,15			38	Pr		8,78		66	Cd		0,14	141
11	P	0,10			39	Th		6,60		67	Ag			77,4
12	Mn	0,10	985		40	Sm		6,14		68	Se			66,7
13	C		699		41	Dy		5,94		69	Hg			63,0
14	F		491		42	Gd		5,87		70	Bi			29,1
15	S		469		43	Hf		3,26		71	Pd			9,9
16	Ba		404		44	Er		3,20		72	He			6,8
17	Sr		353		45	Yb		3,02		73	Ne			4,0
18	Cl		212		46	Br		2,52		74	Au			3,4
19	V		163		47	Ar		2,50		75	Pt			3,2
20	Cr		163		48	Sn		2,12		76	Os			2,1
21	Zr		158		49	Be		2,04		77	Te			1,3
22	Ni		101		50	Cs		1,90		78	Ru			1,0
23	Zn		77,2		51	Ta		1,83		79	Re			1,0
24	Rb		68,2		52	As		1,79		80	Ir			0,8
25	Cu		62,7		53	Eu		1,77		81	Rh			0,6
26	Ce		60,5		54	U		1,75		82	Kr			0,1
27	La		33,8		55	Ge		1,44		83	Xe			0,03
28	Nd		33,3		56	Ho		1,34						

Tableau 9 : Abondance moyenne des éléments de la croûte terrestre.
(moyennes de diverses sources : CRC Handbook (2005), Kaye & Laby (2005), Grennwoog (1997), Ahrens & Taylor (1995), Clarke & Washington (1924), webelements.com).

L'eau de mer contient moins de 0,4 µg de cobalt par litre.

4.1.2. Minéraux et minerais

Le cobalt est le composant majeur d'environ 70 espèces minérales identifiées, parmi lesquelles une douzaine (tab. 10) peut se trouver en concentrations économiques dans des minerais avec des teneurs variant généralement de 0,5 à 2,5 % Co.

Dans la nature, le cobalt se trouve principalement, en roche fraîche, sous forme de sulfures, d'arséniures ou de sulfoarséniures, parfois seul (cattiérite CoS_2 , linnéite Co_3S_4 , cobaltite CoAsS), et plus fréquemment associé à d'autres métaux comme le nickel, le cuivre ou le fer (carrollite $\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$, siegenite $(\text{Co},\text{Ni})_3\text{S}_4$, skuttérodite $(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_{2-3}$, smaltite $(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_2$, glaucodot $(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$). Le cobalt se trouve aussi, plus marginalement, sous forme d'antimoniures (kieftite CoSb_3), de séléniures (frieboldite CoSe) ou de tellurures (mattagamite CoTe_2).

Dans les parties oxydées, proches de la surface, des gisements, le cobalt peut se trouver sous forme d'arséniates (érythrite $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)\cdot 8\text{H}_2\text{O}$), plus rarement de carbonate (sphérocobaltite CoCO_3), d'oxyde (hétérogénite CoOOH , ou associé au manganèse dans l'asbolane $\text{CoO}\cdot 2\text{MnO}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Minéral	Groupe	Formule	Teneur théorique en cobalt	Teneur effective en cobalt
Erythrite	arséniate	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	29,5 %	29,5 %
Skuttérodite	arséniure	$(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{2-3}$	20,8 %	16 - 20 %
Smaltite	arséniure	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_2$	23,2 %	23,2 %
Safflorite	arséniure	$(\text{Co},\text{Fe})\text{As}_2$	28,2 %	28,2 %
Sphérocobaltite	carbonate	CoCO_3	49,6 %	
Asbolane	oxyde	$(\text{Ni},\text{Co})_{2-x}\text{Mn}(\text{O},\text{OH})_4\cdot n\text{H}_2\text{O}$	0,7 - 3,3 %	
Hétérogénite	oxy-hydroxyde	CoOOH	64,1 %	64,1 %
Cobaltite	sulfo-arséniure	CoAsS	35,5 %	29 - 35,3 %
Glaucodot	sulfo-arséniure	$(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$	26,7 %	15 - 20 %
Cattiérite	sulfure	CoS_2	47,9 %	47,9 %
Siegenite	sulfure	$(\text{Co},\text{Ni})_3\text{S}_4$	20,8 %	20,8 %
Carrollite	sulfure	$\text{Cu}(\text{Co},\text{Ni})_2\text{S}_4$	38,7 %	27 - 42 %
Linnéite	sulfure	Co_3S_4	48,7 %	36 - 53 %

Tableau 10 - Principaux minéraux de cobalt (<http://webmineral.com>, www.mindat.org).

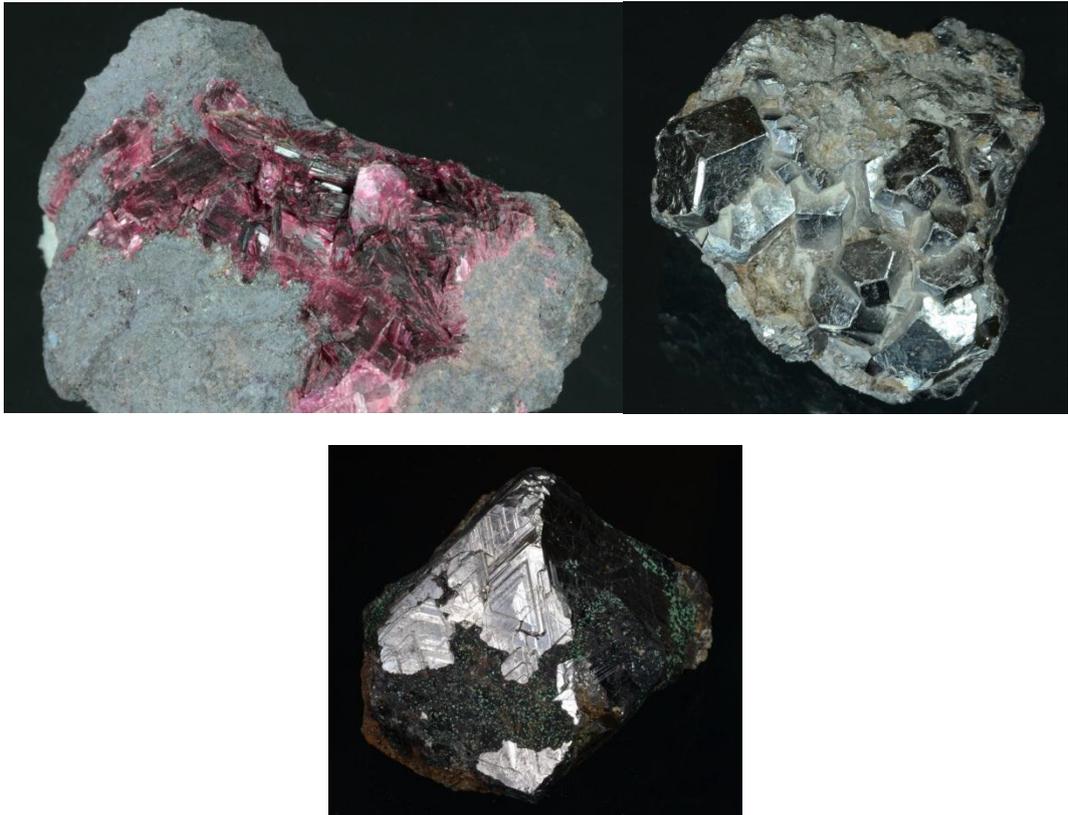


Figure 19 - En haut : érythrite (à gauche) et skutterudite (à droite) de Bou-Azzer (Maroc) ; en bas : Carrolite de Kambove (RDC). Photos J.F. Labbé.

4.1.3. Principaux types de gisements

Il existe principalement quatre types de gisements à partir desquels du cobalt peut être extrait dans le monde, la plupart sont des gisements de cuivre ou de nickel produisant du cobalt en sous-produits :

- gisements stratiformes de cuivre avec cobalt subordonné ;
- gisements magmatiques de cuivre-nickel sulfurés avec cobalt et platinoïdes subordonnés (Norilsk, Sudbury) ;
- gisements de nickel latéritique à cobalt subordonné ;
- gisements hydrothermaux à cobalt.

Deux autres types peuvent être ajoutés à cette liste :

- les nodules et encroûtements océaniques, non exploitables dans les conditions actuelles ;
- certains « tailings » (rejets de laverie) d'anciennes mines de cuivre, dont certains sont retraités pour en récupérer le cobalt.

Les gisements stratiformes de cuivre

Les plus grandes ressources identifiées en cobalt dans le monde se trouvent dans la Copperbelt, cette province riche en gisements de cuivre (+ cobalt +/- autres métaux de base) qui s'étend sur plus de 500 km le long de la frontière entre la République Démocratique du Congo (RDC) et la Zambie, dans des sédiments marins protérozoïques du Katangien (900 à 600 Ma). Les gisements sont stratiformes mais se trouvent dans des termes de la série de nature variée : encaissés plutôt dans des séries dolomitiques et de pélites carbonées côté RDC, et dans des sédiments à composante détritique plus marquée (grès et argillites) côté Zambie. Les minéralisations primaires sont sulfurées (chalcopryrite, pyrite ± cobaltifère, bornite, carrollite, linnéite, chalcocite, etc.). L'altération supergène a conduit à des remobilisations et des reconcentrations sous forme de minéraux oxydés (malachite, azurite, chrysocolle) et des enrichissements en cobalt (hétérogénite).

Les minerais sulfurés ont des teneurs de l'ordre de 0,1 à 0,2 % en cobalt, sous forme de carrollite, linnéite et pyrite cobaltifère. Les minerais oxydés peuvent atteindre 0,4 % Co, sous forme d'asbolane et d'hétérogénite (Roskill, 2007).

Les enrichissements superficiels donnent lieu en RDC à des exploitations artisanales par une myriade de mineurs locaux. Les estimations varient de 50 000 à 150 000 personnes engagées dans la mine artisanale de cobalt. Les produits sont enrichis sur place, le plus souvent par des micro-entreprises chinoises.

Les gisements de nickel-cuivre sulfurés en contexte magmatique basique à ultrabasique

Des gisements à cuivre-nickel sulfurés (avec aussi cobalt, platinoïdes et or) sont associés à des complexes magmatiques basiques et ultrabasiques lités et des basaltes de plateaux. Les plus importants sont ceux de Norilsk-Talnakh (Russie), Sudbury, Raglan, Voisey's Bay (Canada), Kambalda et environs (Australie-Occidentale), Jinchuan (Chine). Il existe également de très gros gisements similaires, mais à sulfures disséminés avec des teneurs beaucoup plus faibles aux États-Unis (complexe de Duluth), en Australie, en Finlande, en Russie, etc. Leur exploitabilité dépend surtout des cours du nickel et de nouveaux procédés métallurgiques capables de récupérer l'ensemble des métaux contenus avec un rendement élevé.

Les principaux minéraux sulfurés sont la chalcopryrite, la pyrrhotite et la pentlandite. Le cobalt est surtout présent sous forme de cobaltite, skuttérodite et smaltite.

Les gisements de platinoïdes du Bushveld (Afrique du Sud), aussi en contexte magmatique basique / ultrabasique, peuvent aussi fournir du nickel et un peu de cobalt en sous-produit.

Les latérites nickélifères

On citera, avec quelques raccourcis et adaptations, des extraits de l'ouvrage « Géologie des Ressources Minérales », Jébrak & Marcoux, 2008, qui en donne une bonne synthèse :

« Les gisements de nickel latéritique les plus importants sont situés dans la zone intertropicale, entre 22°N et 22°S, qui a subi une forte période de latéritisation du milieu du Tertiaire à la période actuelle. Les gisements sont presque tous situés sur des ophiolites, qui sont des lames de croûte océanique obductées par endroits en limites de plaques tectoniques. Leur âge va du Crétacé à la fin du Tertiaire. Des ophiolites anciennes, peu puissantes, se rencontrent dans les socles précambriens du Brésil et d'Australie. Les ophiolites crétacées et tertiaires sont plus puissantes. Elles portent des gisements exploités pour le nickel et accessoirement le cobalt en Nouvelle-Calédonie, à Cuba, en Indonésie, aux Philippines, en République Dominicaine, en Papouasie-Nouvelle-Guinée, à Madagascar.

On distingue essentiellement deux types de minéralisations latéritiques à nickel. Les minéralisations silicatées (saproolites, à garniérite et serpentine nickélifère), les plus riches en nickel (1,5 à 3,5 % Ni) avec des traces de cobalt (0,05 à 0,5 % Co), et les minéralisations oxydées (limonitiques, à goéthite nickélifère), un peu moins riches en nickel (1 à 1,7 % Ni) mais souvent un peu plus riches en cobalt (0,1 à 0,7 % Co). Elles se développent en climat humide, et correspondent à des horizons et à des niveaux de maturité différents dans le profil latéritique (fig. 20). Elles coexistent souvent dans les mêmes gisements. Certains gisements sont à nette prédominance saproolitique (Nouvelle-Calédonie à l'exception de l'extrême Sud, Indonésie), d'autres essentiellement limonitiques (Goro et Prony, au sud de la Nouvelle-Calédonie, Cuba, etc.).

On peut distinguer un troisième type de latérite limonitique assez argileuse à smectite (nontronite) qui se développent en climat plus sec, comme en Australie-Occidentale, avec des teneurs en nickel plus faibles (1 % Ni à Murrin Murrin, 0,67 % à Ravensthorpe). »

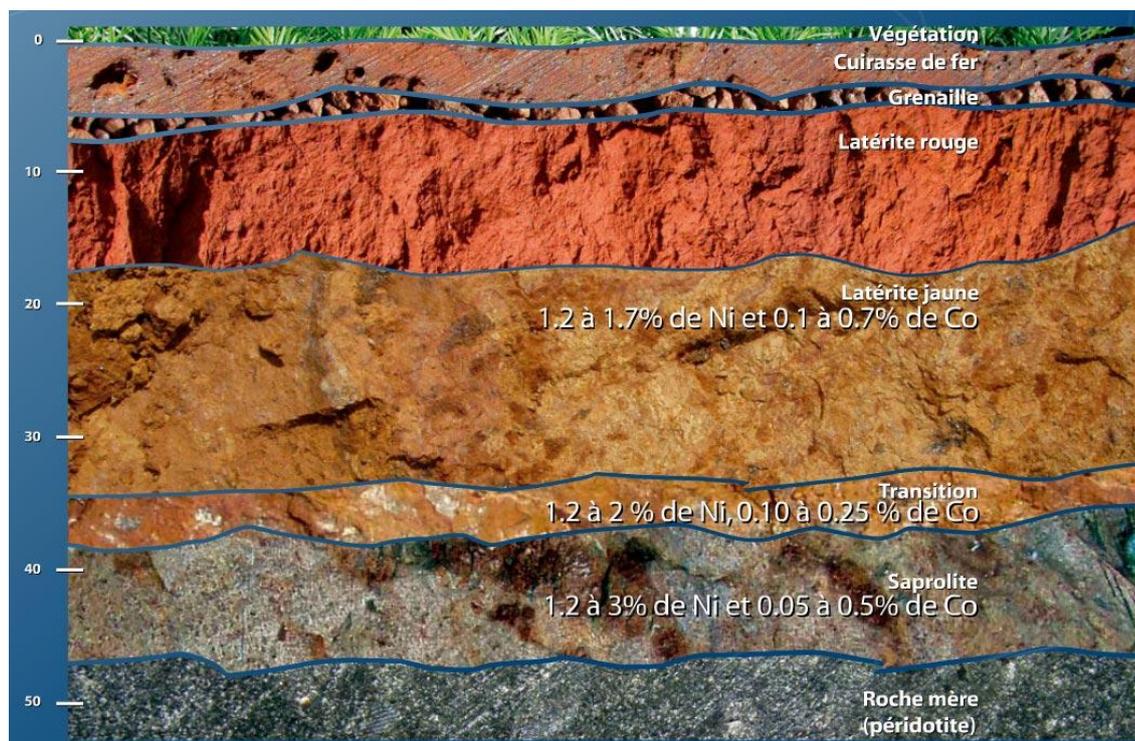


Figure 20 - Coupe schématique des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie.
Source : Vale-Nouvelle-Calédonie.

Les gisements hydrothermaux à cobalt

Il existe quelques gisements hydrothermaux à cobalt, constitués de veines qui contiennent des sulfures et arséniures de cobalt (skuttérodite, etc.), précipités à partir de fluides hydrothermaux dérivés d'intrusifs (Roskill, 2007). Ces gisements contiennent généralement aussi de l'argent, du nickel, voire du bismuth et de l'uranium (filons à Ag-Bi-Co-Ni-U). Ils sont relativement rares et de taille généralement modeste et ne comptent que pour une faible part des ressources et de la production mondiale de cobalt. Les exemples principaux sont Bou-Azzer, au Maroc, Cobalt, au Canada (Ontario), Blackbird (Idaho Cobalt), aux États-Unis (Idaho). De petits gisements de ce type avaient été exploités en Europe depuis le Moyen-Âge, comme Freiberg (Allemagne, Erzgebirge) ou Kongsberg (Norvège).

Les nodules polymétalliques et les encroûtements cobaltifères des fonds océaniques

Les nodules et encroûtements polymétalliques à manganèse qui parsèment quelques régions des fonds océaniques contiennent localement des ressources significatives en cobalt, ainsi qu'en cuivre et en nickel.

Les nodules polymétalliques à manganèse sont des concrétions ovoïdes le plus souvent de 5 à 10 cm de diamètre, rarement jusqu'à 20 cm, principalement composés

d'oxydes de fer et de manganèse avec silicates amorphes, mais ils contiennent souvent aussi du nickel, du cuivre, du cobalt et d'autres métaux. Ils contiennent en général de 15 à 25 % Mn, 10 à 25 % Fe, 0,3 à 2 % Ni, 0,2 à 1,5 % Cu, et 0,2 à 0,25 % Co, jusqu'à très ponctuellement 1 % Co. Ils se trouvent généralement à 4 000 à 6 000 m de fond. Leur abondance est très variable. Là où ils sont présents, leur concentration peut être de quelques kg/m², jusqu'à 10, voire 15 kg/m².

Les études et évaluations des coûts d'exploitation de tels nodules ont été effectuées dans les années 1970 et actualisées de temps en temps depuis lors, en particulier dans la zone de Clarion-Clipperton, au Centre-Nord du Pacifique oriental. Les travaux avaient permis d'identifier, à partir de la reconnaissance d'une zone de plus de 2 millions de km², des secteurs mieux minéralisés avec des cibles de plusieurs dizaines de milliers de km², des abondances jusqu'à 9,45 kg/m² et des teneurs de 1,39 % Ni, 1,25 % Cu et 0,29 % Co (Ifremer, 2010).

Les tentatives d'évaluations économiques préliminaires ont toujours montré jusqu'à présent une rentabilité décourageante aux cours actuels des métaux comparativement aux coûts d'exploitation et d'extraction des gisements terrestres.

Jébrak et Marcoux (2008) citent un potentiel total des nodules à manganèse de 38 Gt à 1,7 % Ni et 1,4 % Cu. Dans l'hypothèse d'un contenu en cobalt de 0,2 % à 0,25 % Co, cela représenterait 76 Mt de cobalt contenu, soit près de 5 fois la totalité des ressources terrestres répertoriées.

Une autre forme de minéralisation sous-marine est celle des encroûtements à manganèse cobaltifères. Ce sont des croûtes d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 25 cm qui se forment lentement sur certains reliefs des fonds océaniques, entre 400 et 4 000 m de fond. Comme les nodules, ils sont principalement formés d'oxydes de fer et de manganèse (15 à 13 % Mn, 7 à 18 % Fe), mais sont souvent plus riches en cobalt (0,7 % Co, voire jusqu'à 1,7 % Co), et peuvent contenir divers autres métaux (Pb, Mo, V, Ce, platinoïdes) (tab. 11) (National Oceanic Center, citant Halbach *et al.*, 1989 et Hein *et al.*, 2000 ; International Seabed Authority, 2003).

L'International Seabed Authority cite une estimation (hypothétique) de 1,7 % de la surface du plancher océanique, soit 6,35 Mkm², qui seraient couverts par de tels encroûtements, et qui représenterait un potentiel total de 1 Gt Co (ISA, 2003).

Mais comme les ressources terrestres connues suffisent à assurer les besoins en cobalt pour plus d'un siècle au rythme actuel d'exploitation et même encore une quarantaine d'années en poursuivant le rythme actuel de croissance de la demande (voir 4.2.2 et chapitre 6), il est très peu probable que les nodules polymétalliques et encroûtements cobaltifères deviennent une ressource de cobalt économiquement exploitable à moyen terme.

Leur étude conserve donc pour l'instant une motivation essentiellement scientifique. Leur mise en valeur avant la fin du XXI^e siècle reste cependant une hypothèse plausible.

Teneurs moyennes des encroûtements cobaltifères sous-marins

Source : International Seabed Authority

(www.isa.org.jm)

Elément	teneur moyenne selon ISA
Co	0.69 %
Ti	12.04 %
Ce	0.16 %
Zr	0.06 %
Ni	0.41 %
Pt	0.5 ppm
Mo	0.04 %
Te	60 ppm
Cu	0.09 %

Tableau 11 - Estimation de teneurs moyennes des encroûtements cobaltifères sous-marins publiées par l'Autorité Internationale des Fonds marins (International Seabed Authority, ISA, www.isa.org.jm).

Les résidus de laveries d'anciennes mines de cuivre

Des ressources non négligeables en cobalt se trouvent dans les anciens rejets d'exploitation (tailings) de mines de cuivre qui, à l'époque de leur exploitation il y a plusieurs décennies, ne récupéraient pas le cobalt. Certains sont retraités pour en récupérer le cobalt, comme à Kasese, en Ouganda, où les tailings ont été exploités de 1999 à 2013 (cf. 6.1.4 et tab. 13), à Lubumbashi, en RDC (cf. 6.1.3 et tab. 13), ou sont en projet d'exploitation à Kolwezi, en RDC (cf. 6.1.3 et tab. 16).

4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES

4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en cobalt

L'USGS (févr. 2014) évalue les réserves mondiales identifiées de cobalt à 7,2 Mt, dont près de la moitié dans la Copperbelt (3,4 Mt en R.D. du Congo et 0,27 Mt en Zambie) (tab. 12 et fig. 21). Elle évaluait les ressources globales terrestres à 15 Mt en janvier 2013, réévaluées à 25 Mt en février 2014. L'USGS évalue aussi les ressources sous-marines à 120 Mt Co (USGS, févr. 2014).

Les réserves totales identifiées correspondent à 84 ans de production minière au rythme de 2013 de 84 kt (cf. chapitre 6), mais à seulement 32 ans au rythme de croissance récent et anticipé de la demande de 5,8 % par an (cf. 3.3.2).

Pays	Réserves en 2013 (USGS, févr.2014)	Reserve base (USGS, janv.2009)	Ressources terrestres (USGS, janv.2013)	Production minière 2013	Nombre d'années de production que permettraient les réserves identifiées en 2013 au rythme de 2013**	Nombre d'années de production que permettraient les réserves identifiées en 2013 à 5,8 % de croissance annuelle	
R.D. Congo	3 400 kt	4 700 kt	5 830 kt	51.6 kt	66 ans**		
Zambie	270 kt	680 kt		1.9 kt	142 ans**		
Australie	1 000 kt	1 800 kt		3.1 kt	323 ans**		
Cuba	500 kt	1 800 kt		3.3 kt	150 ans**		
Canada	260 kt	350 kt		4.6 kt	57 ans**		
Russie	250 kt	860 kt		5.1 kt	49 ans**		
Nouvelle-Calédonie	200 kt	860 kt		2.8 kt	71 ans**		
Brésil	89 kt	89 kt*		1.2 kt	74 ans**		
Chine	80 kt	470 kt		1.3 kt	62 ans**		
Etats-Unis	36 kt	860 kt		1 000 kt			
Maroc	18 kt				1.3 kt	14 ans**	
Autres	1 100 kt	1 100 kt			7.8 kt	141 ans**	
TOTAL	7 203 kt	13 569 kt		15 000 kt	84.0 kt	86 ans**	32 ans**

* réévalué au niveau des réserves 2013

** Ces durées ne doivent pas être considérées à la lettre, mais seulement comme des indicateurs. En effet, d'une part les réserves évoluent au fur et à mesure des travaux d'exploration et de certification, et avec l'évolution des prix qui fait varier les teneurs de coupure économiques. D'autre part le rythme de production a toujours évolué et continuera à évoluer dans les prochaines années et décennies.

Tableau 12 - Répartition des réserves¹⁷ en cobalt répertoriées à fin 2013 (USGS).

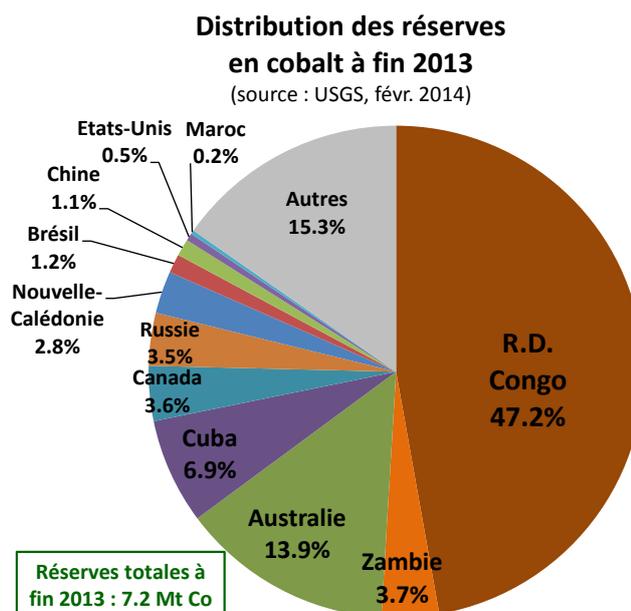


Figure 21 - Répartition des réserves minières en cobalt répertoriées à fin 2013 (USGS).

¹⁷ L'USGS a utilisé jusqu'en 2009 la notion de « reserve-base », une notion intermédiaire entre les ressources et les réserves (cf. définition de ces mots en 1.1), définie comme la part des ressources les plus susceptibles d'être converties en réserves. Cette définition n'étant ni très précise ni normalisée, l'USGS a cessé la publication de « reserve base » à partir de 2010. Les chiffres de 2009 sont mentionnés ici dans le tableau 12 à titre indicatif uniquement. Les « ressources » étant fournies sans répartition géographique, la colonne « reserve base », dont le total est d'un ordre de grandeur similaire à celui des ressources, permet de donner une idée de la répartition géographique de ces ressources.

Les ressources, bien que non détaillées par pays par l'USGS, correspondraient à 178 ans de production minière au rythme de 2013, et 43 ans au rythme de 5,8 % de croissance annuelle.

4.2.2. Les gisements de cobalt dans le monde

La figure 22 montre la répartition des gisements de cobalt dans le monde par type, et la figure 23 celle des mines et projets miniers par statut et degré d'avancement.

Les tableaux 13, 14 et 15 listent les principales mines actives extrayant du cobalt en Afrique, en Asie-Pacifique et en Europe-Russie-Amériques respectivement.

Le tableau 16 liste certains des principaux nouveaux projets miniers qui pourraient produire du cobalt dans les prochaines années.

La somme des réserves indiquées dans les tableaux 13, 14, 15 et 16 est de 4,4 Mt de Co contenu, ce qui est inférieur à l'évaluation totale des réserves par l'USGS (7,2 Mt, cf. tab.12), car d'une part ces tableaux ne sont pas exhaustifs, et d'autre part les données sur les ressources et réserves ne sont disponibles que pour une partie de ces gisements : le cobalt étant un sous-produit parfois marginal, ses ressources ne sont pas toujours évaluées ou publiées, même par ceux des exploitants qui ont une politique générale de publication de leurs réserves et ressources.

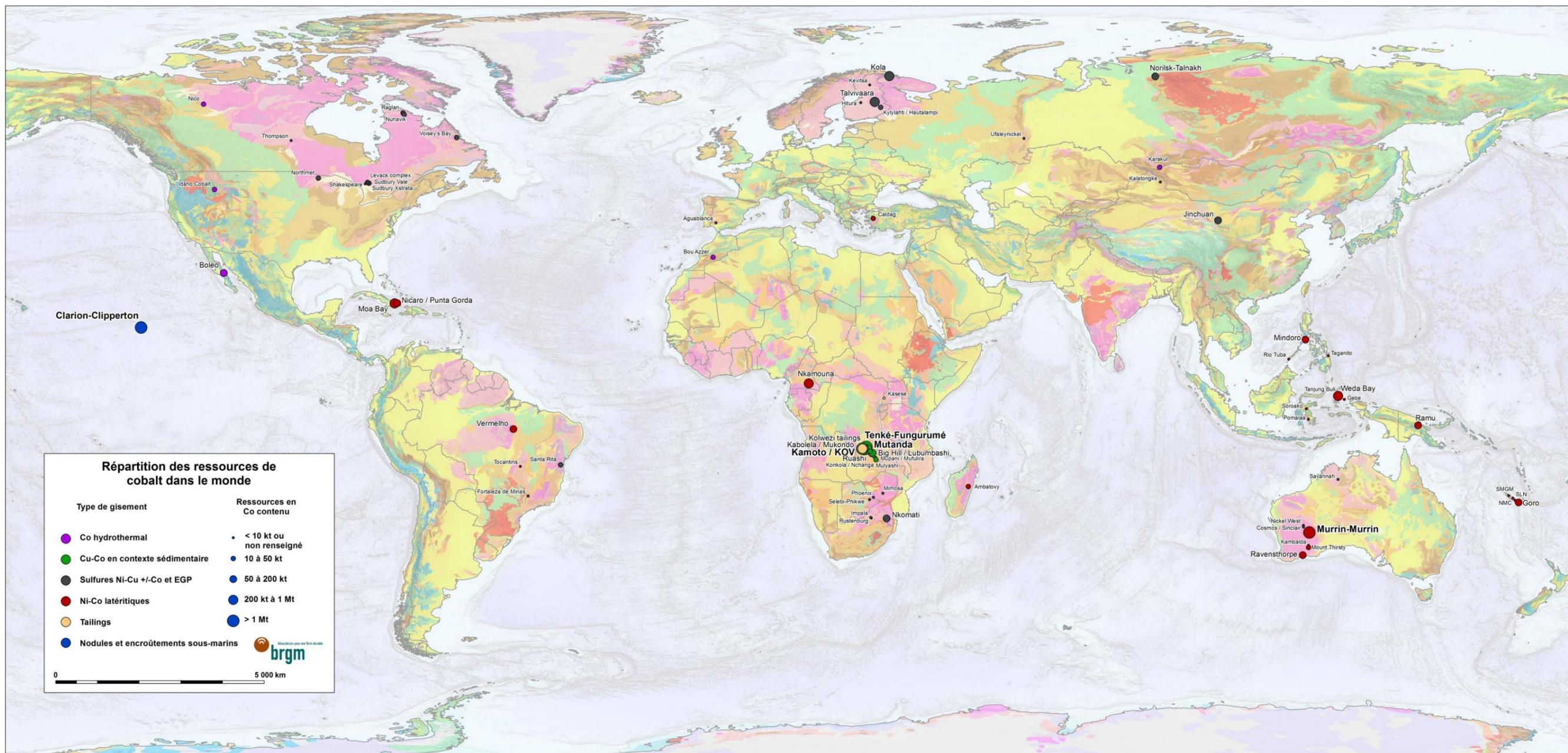


Figure 22 - Localisation des principaux gisements mondiaux à cobalt en fonction de leur typologie et de leurs ressources en cobalt contenu (BRGM, 2014 ; SNL, 2014).

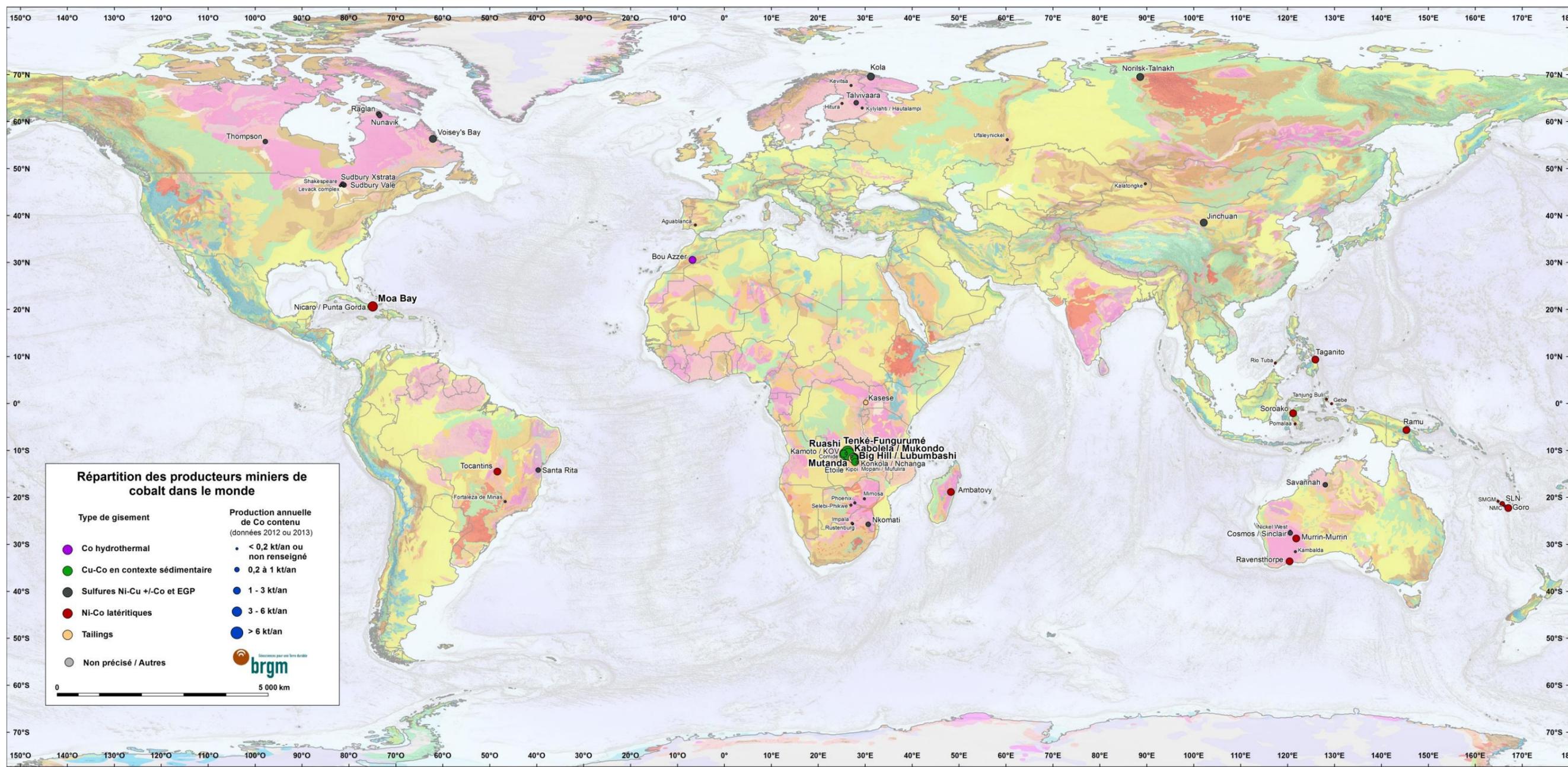


Figure 23 - Localisation des principales exploitations minières de cobalt (BRGM, 2014 ; SNL, 2014).

Pays	Mine	Société(s)	Type	Réserves (source: SNL)		Ressources (source: SNL)		Date de démarrage	Produit	Production de cobalt contenu					Capacité ciblée	Destination des produits / Notes
				Minéral	% Co	Minéral	% Co			2009	2010	2011	2012	2013		
R.D.Congo	Mutanda	Glencore-Xstrata 69%, Rowny Assets 31%	Cu,Co oxydés	53.0 Mt	1.00%	288.6 Mt	0.59%	2011	Concentrés et hydroxyde	8 900 t	7 900 t	8 900 t	13 700 t	23 000 t		
	Tenke-Fungurumé	Freeport McMoran 56%, Lundin Mining 24%, Gécamines 20%	Cu,Co	141.1 Mt	0.40%	564.3 kt	0.22%	2009	Hydroxyde	2 560 t	9 072 t	11 340 t	12 100 t	15 000 t	3000 t d'hydroxyde envoyés à Kokkola (Finlande) en 2013, part croissante	
	Kabolela / Mukondo / Luita	Boss Mining (ENRC 70%, Gécamines 30%)	Cu,Co	1.6 Mt	0.80%	12.8 kt	0.20%	2006	Concentrés d'oxydes et de sulfures	4 631 t	7 800 t	11 200 t	9 100 t		Sulfures -> fonderie de Chambishi (Zambie) ; oxydes -> Chine	
	Ruashi	Metorex (Jinchuan Group 75%, Gécamines 25%)	Cu,Co	15.5 Mt	0.40%	62.2 kt	0.32%	2006	Hydroxyde	871 t	2 008 t	3 678 t	3 200 t		-> Chine (raffinerie de Jinchuan)	
	Big Hill / Lubumbashi	GTL (George Forest Int 70%, Gécamines 30%)	Tallings à Cu-Co			4.5 Mt	2.10%	2005	Alliage blanc Cu-Co	4 800 t	4 500 t	3 200 t	3 100 t		-> Kokkola (Finlande)	
	Kamoto / KOV	Katanga Mining (Glencore-Xstrata 75.2%, 75%, Gécamines 25%)	Cu,Co	90.9 Mt	0.45%	412.1 kt	0.39%	2007	Métal	2 534 t	3 437 t	2 433 t	2 600 t	8 000 t		
	Etoile	Shalina Resources 100%	Cu,Co			24.9 Mt	0.42%	2006	Hydroxyde et carbonate	2 780 t	3 000 t	2 155 t	2 200 t			
	Somika	Société Minière du Katanga	Cu,Co			58.7 Mt	0.01%	2011	Concentrés et hydroxyde			2 000 t	2 100 t			
	OMSK	Gécamines 100%	Cu,Co						Concentré Cu-Co		2 500 t	1 300 t	1 800 t	2 200 t		
	Kipoi	Tiger Resources 60%, Gécamines 40%	Cu,Co	42.4 Mt	0.01%	3.0 kt		2012								
Comide	La Congolaise de Mines et de Développement 100%	Cu,Co	7.0 Mt		34.1 Mt	0.05%	2012			4 383 t	1 894 t	3 068 t	1 600 t			
Autres / Non précisés		Cu,Co								43 400 t	47 600 t	47 330 t	51 500 t	62 400 t		
	Total RDC (Donn. Comm.)			351.5 Mt		1 953.3 kt										
Zambie	Konkola / Nchanga	Konkola Copper Mines (Vedanta Resources 79.4%, ZCOM 20.6%)	Cu,Co	317.8 Mt		767.0 Mt		1957	Alliage Cu-Fe-Co			1 200 t	1 900 t		Alliage -> Chine pour raffinage	
	Mopani / Mutlilla / Nkana	Glencore Xstrata 73.1%, First Quantum 16.9%, ZCOM 10%	Cu,Co	18.7 Mt		79.7 Mt		1990	Métal	1 300 t	800 t	600 t	70 t	0 t	Arrêt de la production en 2012. Reprise prévue en 2015 à partir d'extensions souterraines	
	Phoenix / Tali	Nonfisk Nickel 85%, Republic of Botswana 15%	Ni,Cu,Co						Concentrés	342 t	272 t	149 t				
Botswana	Seibeh-Phikwe	Bamangwato Concessions Ltd (BCL) 100%	Ni,Cu,Co	11.2 Mt		11.2 Mt		1973	Matte			150 t				
	Nkomati	African Rainbow Minerals 50%, Nonfisk Nickel 50%	Ni,Cu,Co	131.3 Mt	0.02%	338.0 Mt	0.02%	1997	Sulfate de Co	244 t	578 t	553 t	744 t	1 000 t		
	Rustenburg, etc.	Amplats	Pt,Pd,(Ni,Co)						Métal (poudre à 99.8%)							
Zimbabwe	Impala	Implats	Pt,Pd,(Ni,Co)					1994	Concentré	39 t	79 t	86 t				
	Mimosa	Implats 50%, Aquarius 50%	Pt,Pd,(Ni,Co)													
Ouganda	Kasee	Kasee Cobalt Co Ltd 100% (MFC Commodities)	Tallings à Co			5.2 Mt	0.18%	1999	Métal (cathode)	673 t	624 t	661 t	556 t	400 t		
	Bou Azzer	Compagnie De Tlhotou Tighaninine 100%	Co,As	18.3 kt				1928	Métal (cathode)	1 600 t	1 582 t	1 788 t	1 314 t	1 360 t		
Madagascar	Ambatovy	Sherritt 40%, KORES 37.5%, Sumitomo 27.5%, SNC-Lavalin 5%	Ni,Co latéritique			41.8 Mt	0.06%	2012	Métal (briques)				493 t	2 083 t	5 600 t	

Tableau 13 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Afrique.

Pays	Mine	Société(s)	Type	Réserves (source: SNL)		Ressources (source: SNL)		Date démarrage	Produit	Production de cobalt contenu						Capacité ciblée	Destination des produits / Notes	
				Mineral	% Co	Mineral	% Co			2009	2010	2011	2012	2013	Prévision 2014			
Chine	Jinchuan	Jinchuan Group 100%	Ni, Cu, Co	520.0 Mt	0.03%	161.0 kt	520.0 Mt	0.03%	161.0 kt	1963	Métal et composés	3 000 t	5 000 t	1 100 t	1 100 t		Production Co non publiée, estimée par Roskill (2014) à 100 t pour 2012	
	Kalatongke	Xijiang XinXin	Ni, Cu, Co	18.8 Mt			32.7 Mt			1989	Concentré			100 t				
Indonésie	Pomala	PT Antam	Ni, Co, Fe latéritique						2001	Ferrocobalt et limonitique							Une partie du minerai transformé en ferrocobalt à Pomala (Sulawesi), une autre partie exportée.	
	Tanjung Bui Gebe																	
Philippines	Surobo	PT Vale Indonesia (Vale Canada 58.73%, Sumitomo 20.09%)	Ni, Co, Fe latéritique									863 t	974 t	868 t	1 010 t		Matte à 78% Ni, 1% Co et 20% S	
	Rio Tuba	Nickel Asia Corp. 60%; Pacific Metals Co. 36%; Solitz 4%	Ni, Co, Fe latéritique	52.4 Mt			70.8 Mt		1975	Minerais (puis matras après HPAL à Coral Bay)				2 300 t	2 800 t	150 t	Minerais en partie exportés (Chine, Japon), en partie traités à l'unité HPAL de Coral Bay Nickel (54% Sumitomo, 18% Mitsui, 18% Solitz)	
PNG	Taganto	Nickel Asia Corp. 65%; Pacific Metals Co. 33.5%; Solitz 1.5%	Ni, Co, Fe latéritique	133.4 Mt			13.6 Mt											
	Ramu	MCC Ramu Nico 85%; Highlands Pacific 8.56%; Mineral Resources Development Corp. 3.94%; Local Interest 2.5%	Ni, Co, Cr latéritique	75.7 Mt	0.10%	76.0 kt	146.7 Mt	0.10%	147.0 kt	2012	Oxyde mixte Ni-Co			19 t	1 338 t	3 300 t	Oxydes mixtes en voyés en Chine (Raffineries de Jinchuan et de Jinlin, J'en)	
Australie	Murrumbidgee	Minera Resources (Glencore Xstrata 100%)	Ni, Co	188.2 Mt	0.68%	1 298.5 kt	199.0 Mt	0.68%	1 304.7 kt	1989	Métal	2 350 t	1 976 t	2 091 t	2 700 t			
	Nickel West (Mt Keith, Leinster)	BHP-Billiton	Ni, (Co)	127.1 Mt			546.0 Mt			1995	Matte						Concentrés transformés en matte dans la fonderie de Nickel West de Kalgoorlie.	
	Savannah	Panoramic Resources 100%	Ni, Cu, Co	2.7 Mt	0.06%	1.7 kt	2.7 Mt	0.06%	1.7 kt	2004	Concentré	424 t	387 t	379 t	475 t	382 t		
	Ravensthorpe	First Quantum 100%	Ni, Co	2.7 Mt	0.06%	1.7 kt	374.8 Mt	0.03%	104.3 kt	2011	Hydroxyde mixte Ni-Co			200 t	275 t	1 200 t	1 300 t	
	N.L.S. Kambalda	Mincor 100%	Ni, Cu, Co	673.0 Mt			2 358.0 Mt			1970	Concentrés	258 t	151 t	150 t	196 t		Concentrés expédiés à la fonderie de Nickel-West (BHP-Billiton) de Kalgoorlie	
	Cosmos / Sinclair	Glencore-Xstrata 100%	Ni, Cu, Co	73.0 Mt			86.0 Mt			1997	Concentrés sulfurés	459 t	245 t	396 t				
	Thio / Kouaoua / Népou-Kopito / Thiébaghi / Poun Goro	Société Le Nickel (SLN) (Eramet 56%, Nisshin Steel 10%, STPCI 34%)	Ni, Co latéritique	12.3 Mt	0.11%	134.8 kt	158.4 Mt					368 t	302 t	354 t	326 t	350 t	Environ 80% de la production de Ni sous forme de ferrocobalt et 20% sous forme de matte Ni-Co	
	Ouaco / Poya / Kouaoua / Nakéty (SMSP 51%, POSCO 49%)	Vale 74%; Sumitomo 11%; Mitsui 10%; SPMSC 5%	Ni, Co latéritique				122.5 Mt	0.11%	134.8 kt	2010	Minerais			245 t	315 t	1 117 t	4 500 t	
Vuleain / Opoué / Soc. Minière Georges Montagnat (SMGM) 100%	Nickel Mining Company (NMC)	Ni, Co latéritique																
Etoile du Nord																		
Divers		SLN + NMC + SMGM + divers	Ni, Co latéritique											1 768 t	1 960 t			
Total Nette Cal.														2 409 t	3 427 t			

Tableau 14 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Asie et en Océanie.

Pays	Mine	Société(s)	Type	Réserves (source: SNL)		Resources (source: SNL)		Date de démarrage	Produit	Production de cobalt contenu					Prévision 2014	Capacité ciblée	Destination des produits / Notes	
				Minéral	% Co	Minéral	% Co			2009	2010	2011	2012	2013				2014
Russie	Norilsk-Talnakh	Norilsk Nickel 100%	Ni,Cu,Co Pd,Pt	328,5 Mt		2 167,6 Mt		1939	Métal	2 352 t	2 460 t	2 337 t	2 186 t	2 150 t				
	Kola	Norilsk Nickel 100%	Ni,Cu,Co	171,0 Mt		523,9 Mt		1938	Matte Ni-Co et hydroxyde Co, Métal à partir de 2013 (200 t)				2 900 t	2 900 t		766 t	Une partie des concentrés était envoyée à la raffinerie de cobalt de Kokkola (Finlande)	
	Ufaeynickel	Rezh Nickel Plant, 25%, Ufaeynickel 75%		3,8 Mt		3,8 Mt		1989	Métal									
Finlande	Tahvare	Tahvare Mining Company 100%	Ni,Zn,Cu, Co,U			2 052,8 Mt	0,02%	2009	Sulfure de Ni-Co	27 t	30 t	400 t	355 t	238 t				
	Kevita	First Quantum 100%	Ni,Cu,Au, Pt,Pd,Co	156,9 Mt		272,2 Mt		2012	Concentré de sulfures Ni-Co-Au-Pt-Pd (Co)								Production de Co contenu non comptabilisée par First Quantum. Estimée	
	Kyylähti / Hautalaampi	Altona Mining Limited 100%	Cu,Au,Co Ni,Zn	4,2 Mt	0,29%	12,3 Mt	0,24%	2012	Concentré Cu-Au et concentré Co-Ni-Cu)							200	Réserves de 4,25 Mt à 1,57% Cu et 0,29% Co. Le concentré Cu-Au est valorisé, le concentré Co-Ni est stocké	
Espagne	Hitura	Belvedere Resources 100%	Ni,Cu,Co, Au	1,7 Mt		4,7 Mt		2010	Concentré									
	Aguablanca	Lundin Mining 100%	Ni,Cu,Co, Au,Pt,Pd	2,8 Mt		7,5 Mt		2005	Concentré de sulfures								Production de Co contenu non publiée. Estimée par Roskill à 150 t pour 2012	
Canada	Thompson / Manitoba Division	Vale 100%	Ni,Cu,Co	25,6 Mt		25,6 Mt		1961	Hydroxyde	181 t	189 t	158 t	96 t	292 t				
	Sudbury / Ontario Division	Vale 100%	Ni,Cu,Co, Pt,Pd,Au	97,9 Mt	0,04%	39,2 Mt	0,04%	1885	Mattes	359 t	302 t	593 t	589 t	845 t				
	Voisey's Bay	Vale 100%	Ni,Cu,Co	19,5 Mt	0,12%	23,4 Mt	0,12%	2005	Concentrés	971 t	524 t	1 585 t	1 221 t	1 256 t				
	Sudbury	Glencore-Xstrata 100%	Ni,Cu,Co, Pd,Pt,Rh	16,5 Mt	0,03%	5,0 Mt	0,07%	1929	Mattes	277 t	341 t	473 t	330 t	700 t				
	Raglan	Glencore-Xstrata 100%	Ni,Cu,Co, Pd,Pt,Rh	7,7 Mt	0,07%	5,4 Mt	0,09%	1997	Concentrés	588 t	667 t	561 t	602 t				Production de cobalt contenu non publiée. Estimée par Roskill à 50 t pour 2012.	
	Leveck complex	KGHM Int 100%	Cu,Ni,Pt, Pd,Au,Co	3,9 Mt		23,1 Mt		2004		4 t								
	Shakespeare	Wolgreen Platinum 100%	Ni,Cu,Pd, Pt,Au,Co	11,8 Mt	0,02%	2,4 Mt	0,02%	2010	Concentrés		42 t	29 t						
	Nunavik	Canadian Jayantes (Jin Jien Nickel Industry Co) 100%	Ni,Cu,Co, Pt,Pd,Au	11,3 Mt	0,05%	5,3 Mt	0,05%	2013						250 t				
	Cuba	Nicaró / Punta Gorda	Cubanquel 100%	Ni,Co latéritique	370,1 Mt	0,11%	401,0 Mt	0,17%	1985	Oxydes mixtes Ni-Co	300 t							
		Mea Bay	Sheritt International 50%, Cubanquel 50%	Ni,Co latéritique	54,9 Mt	0,13%	71,0 Mt	0,13%	1959	Matte Ni-Co	3 722 t	3 706 t	3 853 t	3 792 t	3 341 t			Matte -> Raffinerie de Fort Saskatchewan (Alberta, Canada)
Brésil	Santa Rita	Mirabela Nickel Limited 100%	Ni,Cu,Co, Pt,Pd,Au	159,3 Mt	0,02%	23,9 Mt	0,01%	2009	Concentré de sulfures	14 t	179 t	273 t	335 t	277 t				
	Fortaleza de Minas	Votorantim 100%	Ni,Cu,Co, Pt,Pd,Au						Mattes								Mattes -> raffinerie de Harjavalta (Norilsk Nickel, Finlande)	
	Tocantins	Votorantim 100%	Ni,Co latéritique	30,0 Mt		30,0 Mt		1990	Carbonates de Ni et de Co	1 400 t							Carbonates envoyés pour raffinage à Sao Miguel Paulista (Sao Paulo)	
TOTAL MONDE					3 888 Mt					35 509 t	64 810 t	66 372 t	71 843 t	83 449 t				

Tableau 15 - Les principales exploitations minières produisant du cobalt en Europe, Russie et Amériques.

Pays	Mine	Société(s)	Type	Produit	Réserves		Ressources		Capacité ciblée	Démarrage prévu	Avancement		
					Minerai	Teneur Co	Minerai	Teneur Co					
					Minerai	Teneur Co	Co contenu	Minerai	Teneur Co	Co contenu			
R.D.Congo	Kolwezi / Roan Tailings	Camrose Resources (ENRC) 70%; Gécamines 30%	Tailings					112.8 Mt	0.30%	341.5 kt	4 000 t	2015	
Zambie	Mulyashi	China Nonferrous Mining Corporation 85%; Gvt Zambie 15%			57.6 Mt	0.02%	11.5 kt	83.2 Mt	0.02%	15.8 kt	2 000 t	2013	
Cameroun	Nkamouna	Geovic Mining 60.5%; Gvt Camerounais 39.5%	Ni, Co latéritique	Concentrés et oxydes	68.1 Mt	0.26%	177.0 kt	120.6 Mt	0.23%	277.2 kt	4 000 t		Faisabilité. En attente de financement
Indonésie	Weda Bay	Eramet 60%; Mitsubishi Corp. 27%; PT Antam 10%; Pacific Metals 3%	Ni, Co latéritique	Matte	175.2 Mt	0.076%	133.0 kt	481.9 Mt	0.07%	337.6 kt	1 300 t	suspendu	
Philippines	Mindoro	Intex Resources	Ni, Co, Fe latéritique	Matte Ni-Co	126.3 Mt	0.06%	76.0 kt	306.8 Mt	0.06%	183.3 kt	700 t		Faisabilité
Australie	Mount Thirsty	Barra Resources 50%; Fission Energy 50%	Ni, Co latéritique					31.9 Mt	0.13%	40.1 kt		2015	
Russie	Karakul	Global Cobalt Corporation 100%	Co, Cu, Bi					15.0 Mt	0.21%	31.5 kt			Faisabilité
Turquie	Caldag	Oremin Resources 100%	Ni, Co		33.2 Mt	0.07%	23.0 kt	33.2 Mt	0.07%	23.0 kt	600 t		
Canada	Nico	Fortune Minerals Limited 100%	Au, Co, Bi, Cu	Hydroxyde Co	33.0 Mt	0.11%	36.5 kt	33.0 Mt	0.11%	36.5 kt	1 500 t	2016	Permis en cours
Brésil	Vermelho	Vale 100%	Ni, Co latéritique	Matte				123.6 Mt	0.06%	74.0 kt	2 800 t	suspendu	Faisabilité
Etats-Unis	Northmet	PolyMet Mining Corp. 100%	Cu, Ni, Co, Pt, Au, Pd		203.2 Mt	0.01%	14.2 kt	545.0 Mt	0.01%	36.7 kt	300 t		Faisabilité
Etats-Unis	Idaho Cobalt Project	Formation Metals 100%	Co, Cu, Au	Métal	2.4 Mt	0.56%	13.0 kt	3.4 Mt	0.57%	19.0 kt	1 500 t	≥ 2016	Cobalt en substance principale. En attente de prix plus favorables. Démarrage au mieux en 2016.
Mexique	Boléo	Minera y Metalurgica del Boleo (Baja Mining Corp 10%, Consortium sud-coréen 90%)	Cu, Co, Zn, Mn	Métal (cathode)	85.0 Mt	0.07%	63.0 kt	424.6 Mt	0.05%	223.0 kt	1 600 t	≥ 2016	Cobalt en substance principale. Difficultés de financement Démarrage au mieux en 2016.
TOTAL							547 kt			1 639 kt	20 300 t		

Tableau 16 - Quelques nouveaux projets miniers susceptibles de produire du cobalt dans les prochaines années.

4.2.1. Les gisements et ressources de cobalt en France

France métropolitaine

La France métropolitaine ne dispose pas de gisements de cobalt ni de contextes géologiques favorables à leur existence.

Le SIG Mines France (<http://sigminesfrance.brgm.fr>) ne répertorie pas le cobalt. Il répertorie onze indices de nickel, dont neuf associés à des roches ultrabasiques et deux à des filons polymétalliques, susceptibles de contenir un peu de cobalt.

Trois d'entre eux ont fait l'objet de petites exploitations minières artisanales, deux en Haute-Corse, qui auraient produit quelques dizaines de tonnes de nickel chacun, et un dans le Haut-Rhin, qui aurait produit quelques tonnes de nickel (tab. 17).

Nom de l'indice	Dept	X (Lambert 2 étendu)	Y (Lambert 2 étendu)	Production historique	Type	Commentaires
Zalana	Haute-Corse	1182845	1721690	200 t Ni	Stockwerk dans roches ultrabasiques	Ancienne exploitation artisanale
Rutali / Novo Piano	Haute-Corse	1178596	1755249	30 t Ni	Stockwerk dans roches ultrabasiques	Ancienne exploitation artisanale
Kruth 1	Haut-Rhin	947061	2336999	5 t Ni	Filon polymétallique	Ancienne exploitation artisanale

Tableau 17 - Les trois indices de nickel de France métropolitaine ayant eu une petite production historique parmi les onze indices répertoriés par le BRGM dans SigMinesFrance.

Ces indices sont cités pour mémoire. Ils sont tous très petits, et aucun n'est susceptible de constituer un gisement de nickel actuellement économique, et encore moins de cobalt.

Guyane

Le SIG-Guyane (<http://gisguyane.brgm.fr/>), qui publie une synthèse des connaissances sur les indices miniers guyanais, ne cite pas le cobalt.

Un indice ponctuel de nickel est répertorié à Montagne Continent, dans le centre de la Guyane, non loin des gisements aurifères de Repentir, en zone d'activité minière « autorisée sous contrainte » du « Schéma Départemental d'Orientation Minière » (SDOM) établi en 2011 et en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2012. Il n'a jamais été évalué, mais la probabilité qu'il ait un intérêt économique est très faible. Son contenu éventuel en cobalt n'est pas renseigné.

Par ailleurs, il existe en Guyane quelques massifs basiques / ultrabasiques différenciés qui pourraient être favorables à des minéralisations en nickel, avec possible cobalt et

platinoïdes associés. Certains de ces massifs auraient pu mériter quelques investigations à la recherche de ce type de minéralisations. Mais les plus importants sont situés dans la partie sud de la Guyane, soustraite à l'exploration minière par le SDOM. Il est vraisemblable cependant que leurs éventuelles minéralisations resteraient d'une importance très modeste.

Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie est un territoire dont la géologie est très favorable à l'existence de minéralisation en nickel et cobalt latéritique. Le nickel y est exploité depuis 1874, après la découverte des premiers gisements en 1864.

Les gisements de nickel de Nouvelle-Calédonie sont des gisements latéritiques développés par altération supergène sur les péridotites ophiolitiques qui forment de grands massifs dans le sud et sur la côte ouest de la Grande Terre (cf. fig. 24).

Les deux types de minéralisations latéritiques à nickel avec un peu de cobalt associé décrites en 4.1.3 coexistent en proportions variables en Nouvelle-Calédonie. Les minéralisations oxydées limonitiques surmontent généralement les minéralisations silicatées saprolitiques à garniérine (cf. fig. 20). Les minéralisations limonitiques dominent dans l'extrême sud de la Grande Terre (Goro, Prony), et les minéralisations saprolitiques tendent à dominer dans le reste de l'île.

La Nouvelle-Calédonie fournit, selon les années, 6 à 8 % de la production minière mondiale de nickel, avec, selon les filières, du cobalt en sous-produit. La production minière néocalédonienne de cobalt valorisé s'est montée à 3,43 kt Co en 2013 (cf. tab. 14), soit près de 4 % de la production minière mondiale de cobalt.

Le nickel est exploité en une multitude de sites par de nombreuses sociétés (cf. tab. 14).

La Société Le Nickel (SLN) (Eramet 56 %, Nisshin Steel 10 %, STPCI 34 %) exploite les sites de Thio, Kouaoua, Népoui-Kopéto, Thiébaghi, Poum, à dominante saprolitique (cf. 6.1.1). Eramet publie ses ressources en nickel de SLN, évaluées à 3,86 Mt Ni en ressources mesurées, indiquées et supposées en 2012 (Eramet, 2013), ce qui correspondrait à 68 ans de production au rythme de 2012. Mais Eramet ne publie pas les ressources en cobalt de SNL en Nouvelle-Calédonie. On peut faire l'hypothèse de ressources en cobalt pouvant permettre une production au niveau actuel sur une durée équivalente.

La société Koniambo Nickel SAS exploite les gisements des environs de Koniambo pour alimenter sa fonderie de ferronickel à Koniambo, et la société Nickel Mining Company (NMC) exploite les sites de Ouaco, Poya, Kouaoua et Nakéty principalement pour alimenter la fonderie de ferronickel de Gwangyang, en Corée du Sud. Ces filières ne valorisent pas le cobalt, et ces sociétés ne publient donc pas de ressources en cobalt.

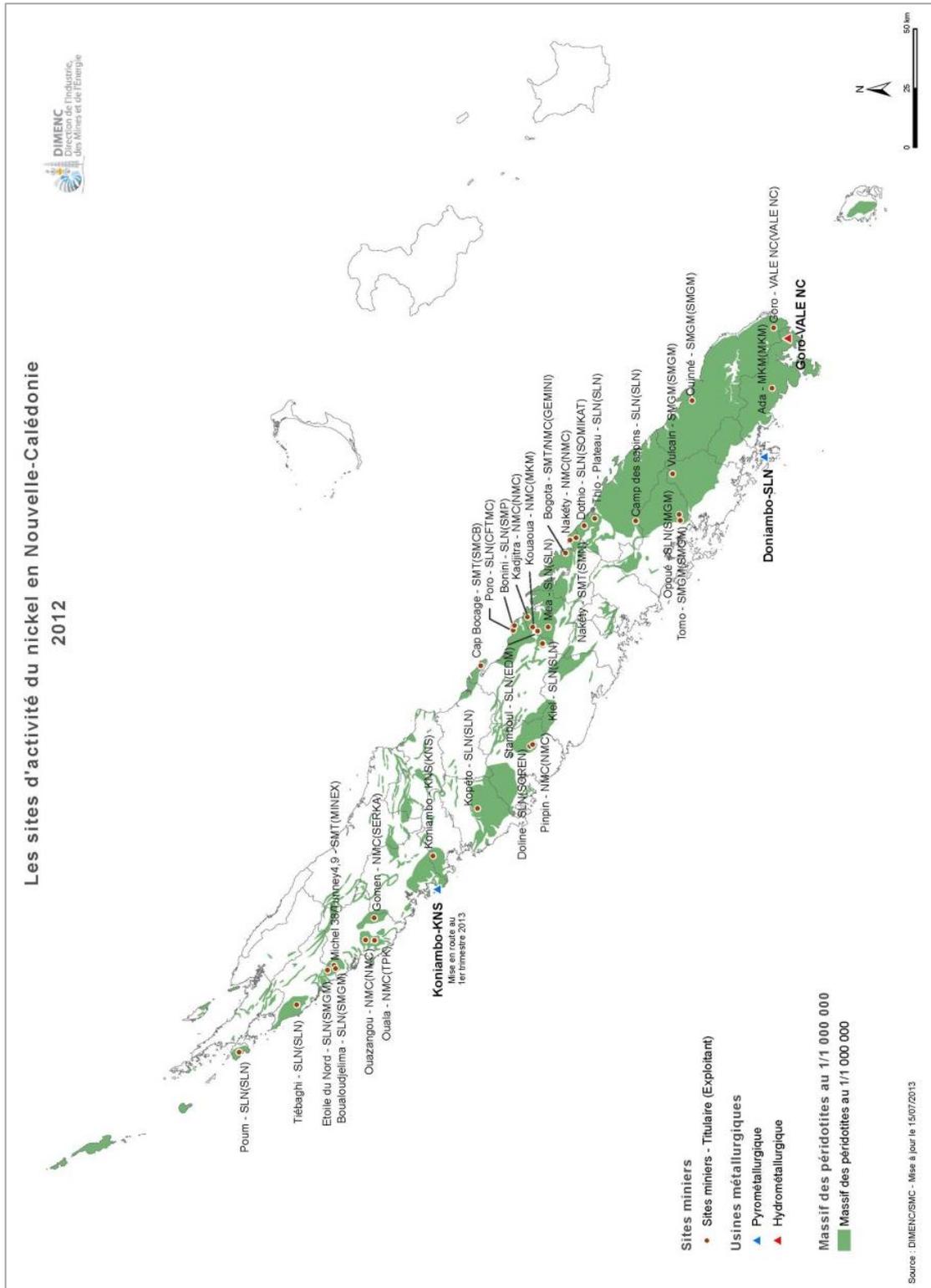


Figure 24 - Les gisements de nickel latéritique exploités en Nouvelle-Calédonie © DIMENC, www.dimenc.couv.nc.

La société Vale-Nouvelle-Calédonie (VNC) exploite des gisements surtout limonitiques à Goro, dans le sud de l'île. La production a démarré en 2011, avec une montée en puissance difficile qui vise à atteindre une production annuelle de 57 kt Ni et 4,5 kt Co. Les réserves prouvées et probables de VNC publiées par Vale (2013) sont de 122,5 Mt de minerai sec à 1,44 % Ni et 0,11 % Co, soit 1 764 kt Ni et 135 kt Co contenus. Vale prévoit un épuisement de ces réserves en 2042 au rythme théorique prévu de 57 kt Ni et 4,5 kt Co par an.

Plusieurs autres sociétés exploitent des minerais latéritiques (Société des Mines de Tontouta, Société des Mines de Cap Bocage, Société Gestion-Exploitation des Mines de Nickel, Société des Mines de Poro, Société Minière du Kaala, Société des Mines de Nakéty, Société Nouméa Nickel, Société Minière Georges Montagnat, Maï Kouaoua Mines, Exploitation Dhoonan Mines, Société Mixte des Kanaks de Thio...), mais sans publication de ressources.

L'USGS (2014) évalue à 12 Mt les réserves en nickel de la Nouvelle-Calédonie, soit 16 % des réserves mondiales, et à 200 kt les réserves en cobalt, soit 2,8 % des réserves mondiales, et 58 ans de production au rythme de 2013.

4.3. PRODUCTION

Comme mentionné en 4.1.3, la production minière de cobalt est à plus de 95 % un sous-produit des mines de cuivre et de nickel :

- en sous-produit des mines de cuivre de la Copperbelt, de part et d'autre de la frontière entre la République Démocratique du Congo (RDC) et la Zambie (67 %) ;
- en sous-produit des mines de nickel-cuivre sulfurés et de nickel latéritique (31 % de la production mondiale de cobalt), en Russie, Canada, Australie, Nouvelle-Calédonie, Cuba, et marginalement de mines de platinoïdes (Bushveld, Afrique du Sud).

Les deux mines exploitant des minerais de cobalt exclusivement sont celles de Bou Azzer au Maroc (skuttérodite), et de Kasese en Ouganda qui retraite depuis 1999 des pyrites cobaltifères accumulées (« stockpile » initial de 1 Mt à 1,38 % Co) par bio-hydrométallurgie (procédé BRGM) dont le gisement arrive à épuisement fin 2013. Leur production ne dépasse pas 3 % de la production mondiale de cobalt.

4.3.1. Statistiques de production courante

Dans sa chaîne de production, le cobalt n'est que partiellement isolé sur ou à proximité des sites miniers. Nombre de mines expédient des concentrés de cuivre-cobalt, des mattes de nickel-cobalt, des alliages de cuivre-cobalt (« alliage blanc ») pour être traités dans des unités métallurgiques ou raffineries situées dans d'autres pays. Ainsi Freeport McMoRan, qui exploite la mine de cuivre-cobalt de Tenké-Fungurumé en R.D. du Congo, expédie des concentrés et des hydroxydes en partie à sa fonderie de Kokkola, en Finlande, et met le reste sur le marché, dont la majeure partie est expédié en Chine. La Société Le Nickel, filiale à 56 % d'Eramet, produit dans son usine de

Doniambo, en Nouvelle Calédonie, du ferronickel (dans une filière qui ne récupère pas le cobalt) et des mattes de nickel contenant du cobalt. Ces dernières sont expédiées à la fonderie de Sandouville, en France métropolitaine (76), où le cobalt est séparé et affiné sous forme de chlorure.

Deux séries statistiques sont donc distinguées :

- d'une part, les statistiques de production minière, par pays dans lesquels se fait l'extraction minière, avec une estimation de la production de cobalt, soit du cobalt métal s'il est produit sur place, soit du cobalt contenu dans les concentrés, les mattes, produits intermédiaires non affinés ou les alliages qui sont exportés pour être affinés ailleurs ;
- d'autre part, les statistiques de production de cobalt raffiné, qui rassemblent les statistiques de production de cobalt métal et de cobalt sous forme de composés raffinés (chlorures, hydroxyde, carbonate, etc.), par pays où ces formes raffinées sont produites. Les fonderies-raffineries peuvent inclure dans leurs intrants des scraps contenant du cobalt, et leur production peut donc inclure à la fois du cobalt primaire et du cobalt secondaire, sans que les parts d'origine primaire ou secondaire soient détaillées dans les données publiées.

Remarques sur la fiabilité des statistiques disponibles

Plusieurs organismes publient des statistiques de production de cobalt par pays :

- le Cobalt Development Institute (CDI, www.thecdi.com) ne publie que les statistiques de production de cobalt raffiné ;
- Darton Commodities Ltd (www.dartoncommodities.co.uk) reprend les statistiques de cobalt raffiné du CDI et publie des estimations de production minière, essentiellement par société productrice ;
- l'USGS (United States Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov>) publie vers février de chaque année des « Mineral Commodity Summaries » qui donnent des statistiques de production minière par pays, assez arrondies (et parfois en partie estimées), pour les deux années précédentes, et publie en ligne un récapitulatif historique des productions annuelles mondiales de 1900 à 2011 aussi bien pour la production minière que pour celle de cobalt raffiné ;
- SNL (www.snl.com) compile les données de production des exploitations minières lorsque ces informations sont accessibles. Comme certains producteurs ne communiquent pas leur production, les données de SNL sont incomplètes, mais la part des données fournies est normalement avérée et aussi fiable que possible ;
- le BMWFJ autrichien (ministère autrichien en charge de l'industrie, de la famille et de la jeunesse, www.bmwfj.gv.at) publie, dans son « World Mining Data » annuel, des statistiques de production minière uniquement. Son annuaire le plus récent, daté de 2013 couvre les années 2007 à 2011 ;
- le British Geological Survey (BGS britannique (www.bgs.ac.uk)) publie chaque année un annuaire statistique de productions minières et de production de métal raffiné

couvrant les cinq années écoulées. Son annuaire le plus récent, daté de 2013 couvre aussi les années 2007 à 2011 ;

- l'AS3M tenu par le BRGM tente de réaliser un compromis de ces différentes sources parfois contradictoires en recherchant, si possible, des informations source permettant d'arbitrer. Sa dernière parution imprimée date de 2008 mais une publication actualisée en ligne est attendue courant 2014 (www.mineralinfo.fr) ;
- enfin, pour la R.D. du Congo, le Ministère congolais des Mines a publié en septembre 2013 un recueil des statistiques de sa production minière de 2003 à 2012 (www.mines-rdc.cd/fr/documents/Statistiques/stat_min_2003_2012.pdf).

Les statistiques de production de cobalt raffiné publiées par le CDI, qui fédère plus de la moitié des producteurs de cobalt raffiné, sont en cohérence correcte avec les statistiques issues d'autres sources (cf. tab. 13). Elles semblent donc relativement fiables, à quelques pourcents près.

En revanche, les statistiques de production minière sont extrêmement variables d'une source à l'autre, comme le montre le tableau 18 ci-dessous pour la production minière mondiale et le tableau 19 plus spécifiquement pour la production minière de la R.D. du Congo.

	Production minière mondiale de cobalt						Production mondiale de cobalt raffiné						
	Selon USGS (mcs a+2)	Selon USGS (historical statistics, déc.2012)	Selon BMWFJ 2013	Selon AS3M	Selon BGS 2013	Selon Darton Comm.	Somme des producteurs listés par SNL	Selon CDI	Selon Darton Comm.	Selon USGS (historical statistics, déc.2012)	Selon AS3M	Selon BGS 2013	
2003	48.4 kt	54.6 kt	50.3 kt	50.2 kt						43.20 kt	42.99 kt		
2004	52.4 kt	60.3 kt	56.7 kt	56.3 kt	52.0 kt					48.50 kt	48.27 kt	48.10 kt	
2005	57.9 kt	65.2 kt	62.6 kt	58.5 kt	61.0 kt					53.64 kt	54.10 kt	53.83 kt	53.50 kt
2006	67.5 kt	70.0 kt	65.5 kt	61.4 kt	64.0 kt			53.34 kt	53.34 kt	53.80 kt	53.83 kt	53.30 kt	
2007	65.5 kt	73.7 kt	64.2 kt	60.9 kt	58.0 kt			53.04 kt	52.43 kt	53.50 kt	53.05 kt	53.20 kt	
2008	75.9 kt	79.1 kt	70.6 kt	66.1 kt	82.0 kt		26.8 kt	56.42 kt	56.32 kt	57.50 kt	56.39 kt	57.20 kt	
2009	72.3 kt	78.8 kt	65.2 kt	62.0 kt	87.0 kt		28.1 kt	59.67 kt	59.81 kt	62.10 kt	58.83 kt	59.80 kt	
2010	89.5 kt	106.0 kt	104.5 kt	n.d.	136.0 kt		44.6 kt	76.87 kt	77.73 kt	79.40 kt	n.d.	76.60 kt	
2011	109.0 kt	109.0 kt	113.4 kt	n.d.	151.0 kt		39.6 kt	82.25 kt	79.63 kt	82.20 kt	n.d.	82.30 kt	
2012	110.0 kt	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	68.40 kt	36.6 kt	77.19 kt	77.03 kt	n.d.	n.d.	n.d.	
2013						82.25 kt			84.51 kt				
2014													

*L'USGS publie chaque année pour chaque substance un "Mineral Commodity Summary" (MCS) qui donne les productions des deux années précédentes. Le chiffre indiqué sur la ligne "2010" est celui publié dans le MCS 2012 (année de la ligne + 2)

Tableau 18 - Productions mondiales annuelles récentes de cobalt selon différentes sources : production minière (à gauche) et production de cobalt raffiné (à droite).

Production minière de cobalt par la R.D. du Congo									
	Selon USGS (mcs a+2*)	Selon BMWFJ 2013	Selon AS3M	Selon BGS 2013	Selon Darton Comm.	Selon Roskill, mai 2013	Somme des producteurs listés par SNL	Selon le Ministère des Mines de la RDC	Production de cobalt métal par la R.D. Congo, selon BGS et AS3M
2003	12.0 kt	14.8 kt	14.8 kt					1.4 kt	1.20 kt
2004	16.0 kt	20.2 kt	20.2 kt		20.2 kt			1.4 kt	0.74 kt
2005	22.0 kt	24.5 kt	24.5 kt		24.5 kt			0.9 kt	0.60 kt
2006	28.0 kt	27.1 kt	27.1 kt		27.1 kt			0.7 kt	0.55 kt
2007	25.3 kt	25.4 kt	25.4 kt	17.9 kt	25.3 kt			25.3 kt	0.61 kt
2008	31.0 kt	32.3 kt	32.3 kt	42.5 kt	31.0 kt		10.9 kt	42.5 kt	1.05 kt
2009	35.5 kt	35.5 kt	35.5 kt	56.3 kt	29.9 kt		13.4 kt	56.1 kt	2.95 kt
2010	47.4 kt	70.0 kt	n.d.	97.7 kt	43.4 kt		39.0 kt	84.0 kt	4.18 kt
2011	60.0 kt	75.0 kt	n.d.	108.9 kt	47.6 kt		45.7 kt	99.5 kt	3.08 kt
2012	60.0 kt	n.d.	n.d.	n.d.	47.3 kt	44.8 kt	46.0 kt	86.4 kt	
2013					51.5 kt	51.9 kt	51.5 kt		
2014 (prévisions)					52.4 kt	57.9 kt			

*L'USGS publie chaque année pour chaque substance un "Mineral Commodity Summary" (MCS) qui donne les productions des deux années précédentes. Le chiffre indiqué sur la ligne "2010" est celui publié dans le MCS 2012 (année de la ligne + 2)

Tableau 19 - Productions minières annuelles récentes de cobalt de la R.D. du Congo, selon différentes sources.

Le tableau 19 montre que la production minière enregistrée de la R.D. du Congo varie de plus du simple au double selon les sources : pour l'année 2011 par exemple, cette production aurait été de **47,6 kt** pour Darton Commodities, de 60 kt selon l'USGS (2013), de 75 kt selon BMWFJ (2013), de 99,5 kt selon le Ministère des Mines congolais, et de **108,9 kt** selon le BGS. Ces écarts considérables se répercutent au niveau des évaluations de la production mondiale, puisque la RD du Congo est de loin le producteur minier majoritaire de cobalt. Ainsi pour cette même année 2011, le tonnage publié pour la production minière mondiale varie de 109 kt (USGS) à 151 kt (BGS), et pour l'année 2012, de 68,4 kt (Darton Commodities) à 110 kt (USGS). Les statistiques de Darton Commodities sont sous-évaluées, puisque, en particulier, elles n'intègrent pas la production minière artisanale congolaise. Mais les statistiques les plus élevées sont vraisemblablement surévaluées.

La production affichée par le Ministère des Mines du Congo est elle-même très disparate, très inférieure aux autres sources entre 2003 et 2006, équivalente en 2007, puis très supérieure aux autres sources à partir de 2008. Le tableau publié est intitulé « cobalt en tonnes », avec une colonne « production » et une colonne « exportation » (avec des tonnages assez proches). Il ne précise cependant pas s'il s'agit de production minière, ou de cobalt raffiné, ni si les tonnages sont bien exprimés en cobalt contenu. Au vu des chiffres, il est possible que ceux de 2003 à 2006 concernaient le cobalt sous une forme raffinée (quantités comparables à celles publiées par le BGS ou l'AS3M pour le cobalt raffiné), mais que ceux de 2008 à 2012 représentent des

quantités brutes, par exemple incluant des tonnages d'hydroxyde de cobalt exprimés en hydroxyde de cobalt et non en cobalt élémentaire contenu. Ce serait le cas si elles étaient déduites des données douanières, en général exprimées en tonnage brut.

Les statistiques de production canadiennes sont aussi sujettes à question : les productions annuelles publiées par les Ressources Naturelles du Canada (NR-Can, <http://sead.nrcan.gc.ca>, accédé en février 2014) sont, depuis au moins une dizaine d'années, près de deux fois inférieures à celles publiées par les organismes extérieurs (USGS, BGS, BMWFJ, AS3M) alors que ces dernières sont réputées avoir été établies en concertations avec la NR-Can (tab. 20).

Production minière de cobalt par le Canada						Prod. cobalt raffiné Canada		
Selon USGS (mcs a+2*)	Selon BGS et BMWJ	Selon AS3M	Selon Darton Commodities	selon NR-Can (http://sead.nrcan.gc.ca/prod-prod/ann-ann-fra.aspx , accès fév. 2014)	Remarques sur les statistiques de NR-Can	Selon CDI 2013 (Vale + ICCI)	Selon ICG 2013	Selon AS3M
1995		5.34 kt		2.02 kt	Inclut toutes les Provinces			3.26 kt
1996		5.71 kt		2.15 kt	Inclut toutes les Provinces			3.60 kt
1997		5.71 kt		2.17 kt	Inclut toutes les Provinces			3.79 kt
1998		5.86 kt		2.26 kt	Inclut toutes les Provinces			4.42 kt
1999		5.32 kt		2.01 kt	Inclut toutes les Provinces			4.20 kt
2000		5.30 kt		2.02 kt	Inclut toutes les Provinces			4.36 kt
2001		5.33 kt		2.11 kt	Inclut toutes les Provinces			4.38 kt
2002	5.1 kt	5.15 kt		2.07 kt	Inclut toutes les Provinces			4.63 kt
2003	4.3 kt	4.33 kt	4.33 kt	1.84 kt	Inclut toutes les Provinces			4.23 kt
2004	5.2 kt	5.06 kt	5.06 kt	2.09 kt	Inclut toutes les Provinces			5.14 kt
2005	5.5 kt	5.77 kt	5.77 kt	2.39 kt	Inclut toutes les Provinces			5.09 kt
2006	7.0 kt	7.12 kt	7.12 kt	2.90 kt	Inclut toutes les Provinces	5.02 kt	5.20 kt	5.20 kt
2007	8.3 kt	8.69 kt	8.69 kt	4.76 kt	Inclut toutes les Provinces	5.61 kt	5.62 kt	5.62 kt
2008	8.6 kt	8.95 kt	8.95 kt	4.81 kt	Inclut toutes les Provinces	5.63 kt	5.64 kt	5.61 kt
2009	4.1 kt	3.92 kt	3.92 kt	2.28 kt	Inclut toutes les Provinces	4.91 kt	4.92 kt	4.07 kt
2010	4.6 kt	4.64 kt		2.64 kt	Exclut TN-Labrador et Manitoba	4.65 kt	4.25 kt	
2011	7.1 kt	7.07 kt		3.74 kt	Exclut TN-Labrador et Manitoba	5.92 kt	5.98 kt	
2012	n.d.	n.d.	n.d.	3.30 kt	Exclut TN-Labrador et Manitoba	5.68 kt		
2013			4.55 kt					

Tableau 20 - Comparaison des productions minières annuelles canadiennes de cobalt selon le site Internet de la NR-Can et selon les organismes extérieurs.

L'estimation de la production minière chinoise est encore plus variable : l'USGS l'estime à 7,0 kt Co pour 2012 (USGS, janv. 2013), pendant que Darton Commodities l'évalue à 1,1 kt (Darton Commodities, janv. 2013).

Ces écarts importants et généralisés dans les statistiques de production en rend très incertaine leur interprétation, leur comparaison avec la consommation, ou des conclusions sur la balance offre-demande.

Par ailleurs, le sens et le niveau de l'écart entre la production minière affichée de cobalt et sa production raffinée sont surprenants (tab.18). Dans le cas du cuivre, par

exemple, les statistiques de production de cuivre raffiné sont toujours supérieures de 15 à 20 % à la production minière, parce que les raffineries de cuivre intègrent dans leur production le cuivre obtenu à partir des scraps (production secondaire, recyclage). Pour les statistiques disponibles pour le cobalt, au contraire, la production de cobalt raffiné est toujours inférieure de 20 à 25 % à la production minière (USGS). Pourtant, du cobalt secondaire est très vraisemblablement inclus dans les statistiques de production de cobalt raffiné. Par exemple, la fonderie de Glencore-Xstrata de Sudbury (Canada), qui produit des mattes à nickel-cobalt ensuite raffinées en Norvège, est alimentée non seulement par des concentrés miniers venant de Sudbury et de Raglan, mais aussi des scraps à nickel, cuivre et cobalt (USGS, 2011). La production chinoise de cobalt raffiné est aussi réputée inclure du cobalt secondaire (USGS, 2011). La production belge de cobalt, par Umicore, provient pour partie de sources secondaires (USGS, 2011 ; Darton Commodities, 2014), sans que les parts issues de sources primaires ou secondaires soient distinguées. À l'inverse, une partie du cobalt recyclé n'est pas inclus dans les statistiques mondiales publiées (BGS, BMWFJ, AS3M/BRGM), puisque ces dernières n'intègrent pas de production étatsunienne, alors que l'USGS publie une production étatsunienne annuelle de cobalt secondaire de l'ordre de 2 kt/an¹⁸.

Si les statistiques mondiales de production de cobalt raffiné, qui intègrent pourtant en partie du cobalt secondaire, sont réellement toujours inférieures de 20 % à la production minière, cela signifie que la production minière ne correspond pas à du tonnage récupérable.

Le suivi des statistiques de production est d'autant plus ardu que certains producteurs significatifs ne publient pas leur production : ainsi les rapports annuels de Norilsk Nickel sont précis et détaillés sur les chiffres de production minière de cuivre, de nickel, de palladium et de platine, mais ils ne publient pas la production de cobalt.

Pour mieux appréhender les volumes des flux de cobalt, de la mine et du recyclage au raffinage et aux usages, et donc les équilibres offre-demande, il serait nécessaire de lancer une analyse complète et documentée des flux de matière (Material Flow Analysis, MFA). Une étude préparatoire avait été lancée dans ce sens par la DG Entreprises de la Commission Européenne, réalisée par Risks and Policy Analysts (RPA) puis publiée en septembre 2012, pour inventorier les besoins de données qui seraient nécessaires pour une telle analyse de flux de matière pour plusieurs métaux, dont le cobalt. La figure 25, extraite de cette publication, illustre schématiquement les circuits de cobalt concernant l'Union Européenne, et le degré de disponibilité de données qui permettraient de chiffrer ce schéma.

¹⁸ Global Tungsten and Powders Corp (www.globaltungsten.com), par exemple, commercialise de la poudre de cobalt issue du recyclage de carbures cémentés.

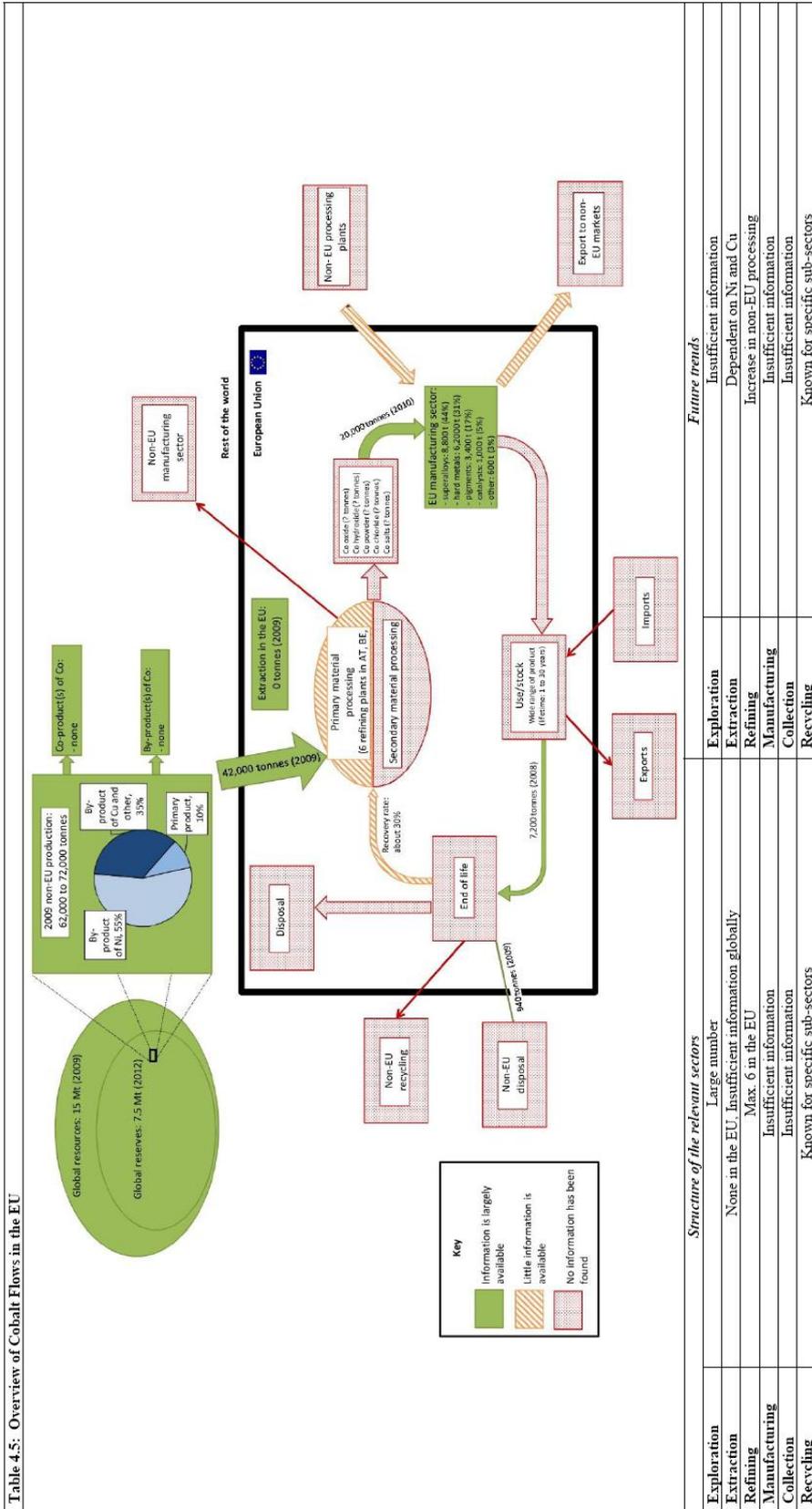


Figure 25 - Schéma des flux de cobalt dans l'Union Européenne (© RPA, Commission Européenne).

Niveaux de production et répartition par pays

- **Production minière**

Les tableaux 13, 14 et 15 listaient les principaux producteurs miniers, avec leurs données de production des cinq dernières années lorsqu'elles sont disponibles. Ces données ne sont cependant pas tout à fait exhaustives et ne suffisent pas pour évaluer la production complète par pays ou la production mondiale. Selon les sources, la production minière de cobalt aurait été de 82 à 110 kt en 2012.

La figure 27 illustre la répartition de la production minière de cobalt par pays en 2012. Cette répartition n'est à prendre qu'à titre indicatif, puisque, comme soulevé plus haut, les données statistiques sont extrêmement variables selon les sources (du simple au double pour certaines) et sont donc très peu fiables. La R.D. du Congo domine largement la production mondiale (environ 54 % de la production mondiale), et avec sa voisine la Zambie, deuxième producteur mondial, la Copperbelt fournit désormais 63% de l'approvisionnement minier mondial. Les autres producteurs significatifs étaient la Chine, l'Australie, Cuba, le Brésil, le Canada, la Nouvelle Calédonie et la Russie. Cette répartition évolue à partir de 2013 (fig. 29) avec l'arrivée puis la montée en puissance progressive de nouveaux producteurs : Madagascar (Ambatovy), la Papouasie-Nouvelle-Guinée (Ramu), les Philippines (Coral Bay), etc.

Répartition indicative de la production minière de cobalt en 2012 (Sources : USGS, AS3M, Darton Commodities, SNL, NR-Can)

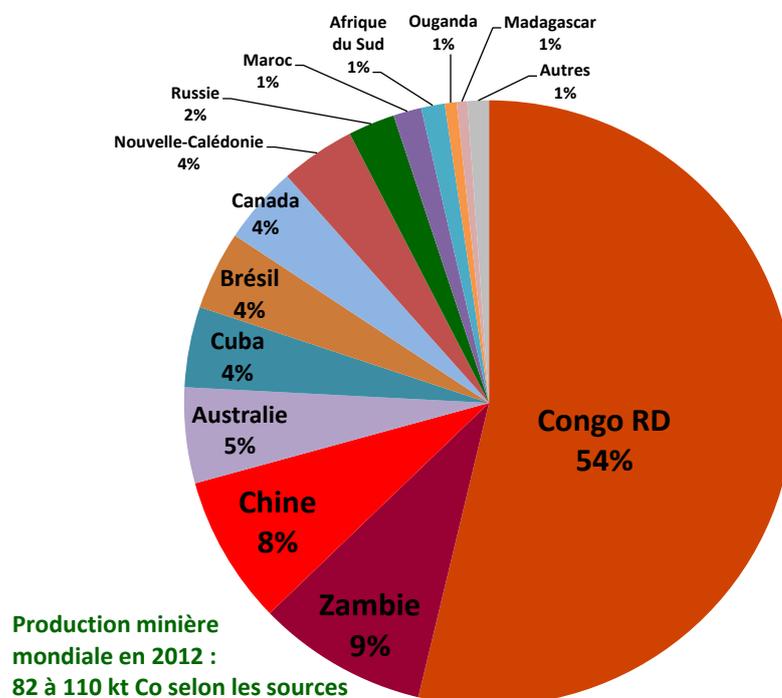


Figure 26 - Répartition indicative de la production minière de cobalt en 2012.

- **Production de cobalt raffiné**

La production de cobalt sous forme raffiné (métal ou composé) a été de 79,13 kt de cobalt contenu en 2012, et 86,14 kt en 2013 (CDI et Darton Commodities, 2014, plus production secondaire étatsunienne).

Le tableau 21 liste les principaux producteurs de cobalt raffiné, que ce soit sous forme de métal ou de composés chimiques purifiés (oxyde, hydroxyde, chlorure, carbonate, etc.), avec leur production de ces cinq dernières années, et la figure 28 illustre la répartition de cette production par pays en 2013. Contrairement aux données de production minière, les sources de données sont relativement convergentes entre elles. Toutefois, les publications ne distinguent pas toujours la production issue de produits miniers de celle issue de scraps. Les productions belges, chinoises, canadiennes et probablement d'autres intègrent des productions secondaires. Mais la production étatsunienne, publiée chaque année par l'USGS, est purement secondaire et n'est pas prise en compte dans de nombreuses synthèses (CDI, Darton Commodities). Elle a été intégrée ici¹⁹, par souci de cohérence puisque de la production secondaire est vraisemblablement intégrée dans les productions, canadienne, belge, chinoise, etc.

La Chine domine désormais largement la production mondiale (41,3 %), suivie par la Finlande (12,3 %). Au total, l'Union Européenne compte pour près de 18 % de la production mondiale (Finlande + Belgique + France). La France produit de l'ordre de 350 t de cobalt raffiné sous forme de chlorure (raffinerie d'Eramet à Sandouville), soit 0,4 % de la production mondiale, à partir de mattes issues de la production minière néocalédonienne.

¹⁹ Elle n'est toutefois pas encore publiée, à la date de la rédaction, pour l'année 2013. Elle a été extrapolée à partir de la production des années antérieures, assez régulièrement de l'ordre de 2 kt/an.

Pays	Mine	Société(s)	Source	Production de cobalt raffiné						Capacité ciblée	Notes
				2009	2010	2011	2012	2013	Prévision 2014		
R.D.Congo	Kamoto / KOV	Katanga Mining (Glencore-Xstrata 75,2%) 75%, Gécamines 25%	Locale	2 534 t	3 437 t	2 433 t	2 129 t	2 600 t	8 000 t		
Zambie	Chambishi	Chambishi Metals (ENRC 90%, ZCCM 10%)	Locale + RDC	235 t	3 934 t	4 856 t	5 435 t	4 900 t			
Afrique du Sud	Mopani Copper	Glencore Xstrata 73,1%; First Quantum 16,9%; ZCCM 10%	Nationale	1 300 t	1 100 t	900 t	230 t	0 t			
	Rustenburg, etc.	Amplats	Locale								
	Impala	Implats	Locale + Zimbabwe	236 t	833 t	840 t	1 100 t	1 050 t			
Ouganda	Kasese	Kasese Cobalt Co Ltd 100%	Locale	673 t	624 t	661 t	556 t	400 t		Arrêt de la production par épuisement des réserves fin 2013 (Metal Bulletin, Sept. 2013)	
Maroc	Bou Azzer	Compagnie De Tighanmine 100%	Locale	1 600 t	1 582 t	1 788 t	1 314 t	1 360 t			
Madagascar	Ambatovy	Sherritt 40%; KORES %; Sumitomo 27,5%; SNC-Lavalin 5%	Locale				483 t	2 083 t	3 500 t	NB : production 2013 mise à jour avec le rapport Sherritt du 4ème trimestre 2013	
Chine		Divers	RDC, Indonésie, Philippines, Locale, (Nouvelle-Calédonie)	24 138 t	35 130 t	33 800 t	30 200 t	35 600 t		Ces statistiques du CDI excluent la production d'Umicore-Chine, complétée avec la production d'Umicore pour la Belgique	
Japon	Sumitomo	Sumitomo	Philippines, Nouvelle-Calédonie, Indonésie	1 332 t	1 935 t	2 007 t	2 542 t	2 800 t			
Inde		Divers	Australie, secondaire	1 001 t	1 187 t	1 300 t	600 t	350 t			
Australie	Murrin-Murrin	Glencore Xstrata Pic 100%	Locale	2 350 t	1 976 t	2 091 t	2 600 t	2 400 t		NB : production 2013 mise à jour avec le rapport Glencore-Xstrata du 4 ^e trim. 2013 (2,7 kt Co extraits dont 2,4 kt sous forme métal et 0,3 dans des concentrés)	
	Yabulu	Queensland Nickel Pty 100%	Nouvelle-Calédonie	1 700 t	2 141 t	2 631 t	2 369 t	2 250 t			
Russie	Norilsk-Talnakh	Norilsk Nickel 100%	Locale	2 352 t	2 460 t	2 337 t	2 186 t	2 150 t			
	Kola	Norilsk Nickel 100%	Locale					200 t	2 600 t		
Finlande	Kokkola	Freeport McMoRan 56%, Lundin Mining 24%, Gécamines 20%	Nelle-Calédonie, RDC, Zambie, Australie, Russie	8 850 t	9 299 t	10 441 t	10 547 t	10 600 t			
Norvège	Kristiansand	Nikkeiverk (Glencore-Xstrata)		3 066 t	3 208 t	3 067 t	2 969 t	3 200 t			
Belgique	Olen / Ganzhou*	Umicore	RDC, Secondaire, divers	2 150 t	2 600 t	3 187 t	4 200 t	4 500 t		Les statistiques du CDI donnent la production globale d'Umicore, partagée entre ses raffineries d'Olen (Belgique) et de Ganzhou (Chine). La production se serait répartie en 2012 en 1/3 Belgique - 2/3 Chine	
France	Sandouville	Eramet	Nouvelle-Calédonie	368 t	302 t	354 t	326 t	350 t			
Canada	Port Colborne / Thompson	Vale 100%	Locale, Secondaire	1 193 t	940 t	1 469 t	1 890 t	2 200 t			
	Fort Saskatchewan	Sherritt	Cuba	3 721 t	3 706 t	3 853 t	3 792 t	3 300 t			
Etats-Unis			Secondaire	1 790 t	2 000 t	2 210 t	2 160 t	2 200 t			
Brésil	Sao Miguel Paulista	Votorantim 100%	Nationale	1 012 t	1 369 t	1 613 t	1 750 t	1 650 t			
TOTAL				61 601	79 763	81 838	79 388	86 143			

Tableau 21 - Les producteurs de cobalt raffiné (sources : CDI / Darton Commodities et USGS).

Répartition de la production de cobalt raffiné en 2013

Source : CDI / Darton Commodities, + Etats-Unis (USGS)

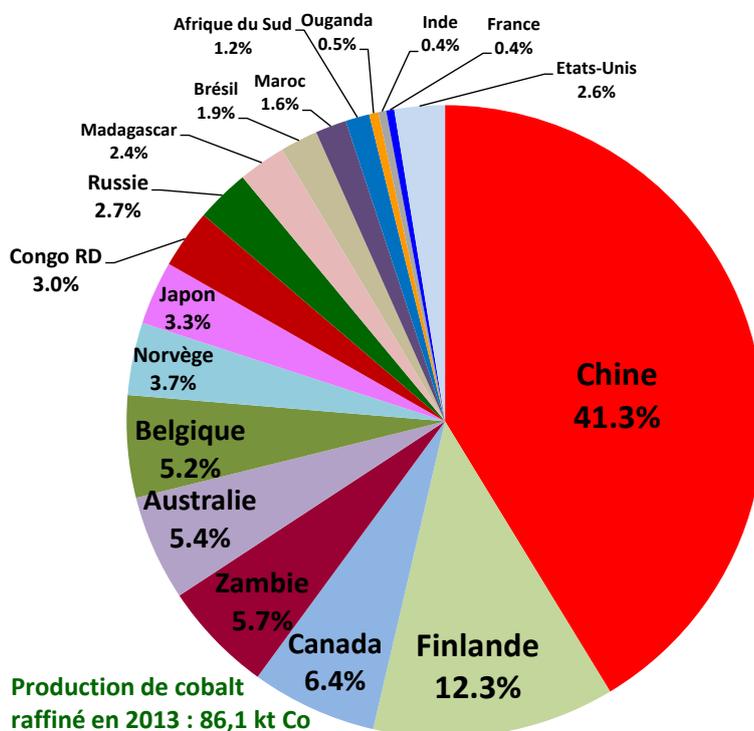


Figure 27 - Répartition indicative de la production de cobalt raffiné par pays en 2013.

4.3.2. Évolution historique de la production

Production minière

La figure 29 illustre l'évolution de la répartition de la production minière par pays depuis 1990, aux grandes incertitudes près sur la fiabilité des données. Elle indique une croissance générale de la production depuis vingt ans, surtout tirée par la production de la République Démocratique du Congo. Cette production avait décliné au milieu des années 1990 avec la crise de fin de la présidence Mobutu et la prise du pouvoir par Laurent-Désiré Kabila en mai 1997. Elle a repris progressivement à partir de 1999.

Sur la base des données retenues, qui restent incertaines, cette croissance peut être estimée à environ 7,4 % par an entre 1993 et 2012. Les données 2013 sont incomplètes.

Il y a une grande incertitude sur la production minière chinoise, l'USGS l'évaluant régulièrement entre 6 et 7 kt/an entre 2007 et 2012 (pas encore de données 2013) alors que Darton Commodities l'évalue à 1,1 kt en 2012 et 1,3 kt en 2013 (pas de données antérieures à 2012). Ainsi, la chute de la production minière chinoise entre 2012 et 2013, qui apparaît sur la figure, est peut-être fictive.

Production de cobalt raffiné (métal et composés)

La figure 30 illustre l'évolution de la répartition de la production de cobalt raffiné, que ce soit sous forme de métal ou de composés chimiques purifiés (oxyde, hydroxyde, chlorure, carbonate, etc.). Sa croissance moyenne a été de l'ordre de 6,8% par an depuis 1993, avec une très forte croissance de la production chinoise à partir de 2002. Cette production était marginale en 2001 (1,47 kt, 3,5 % de la production mondiale) et a atteint 35,6 kt et 41,6 % de la production mondiale en 2013. La Finlande et l'Australie ont aussi, dans une moindre mesure, monté en puissance pendant la période considérée.

La Chine a fortement accru sa production de cobalt raffiné depuis 2001, avec une augmentation plus marquée en 2010, conduisant à une surproduction mondiale qui s'est poursuivie en 2011 (cf. fig. 18), et s'étant traduit par un stockage important en Chine (cf. 4.7.4).

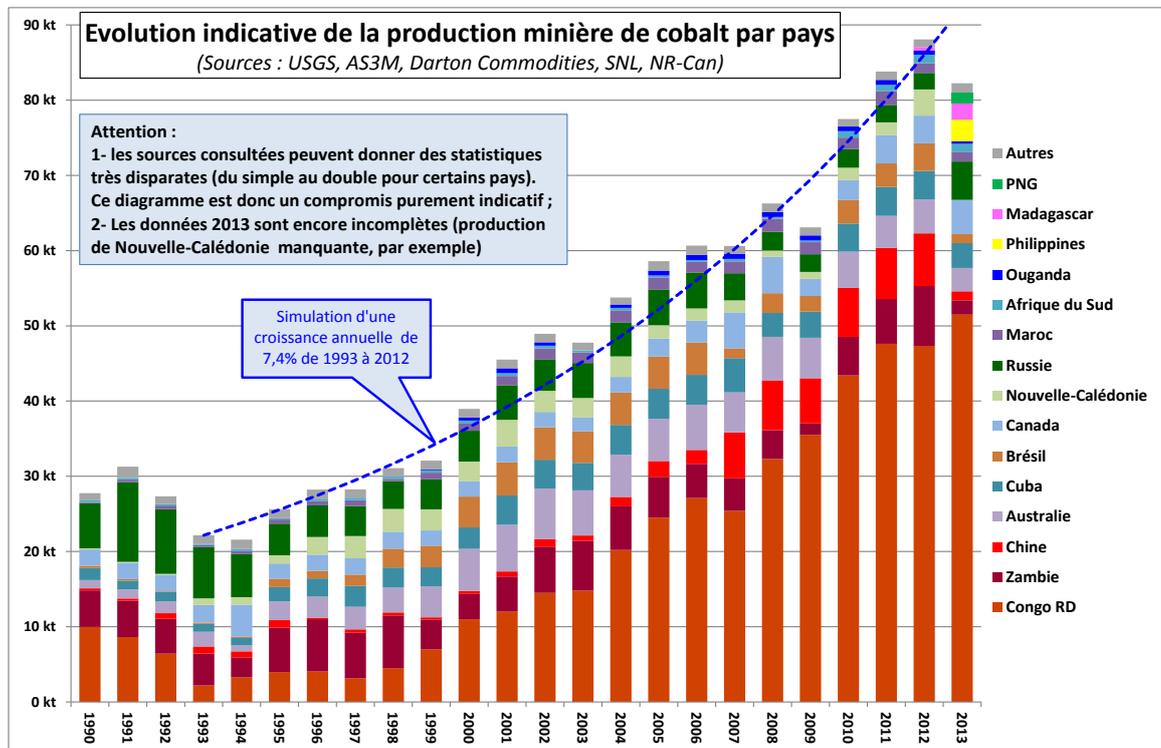


Figure 28 - Évolution indicative de la production minière de cobalt de 1990 à 2013.

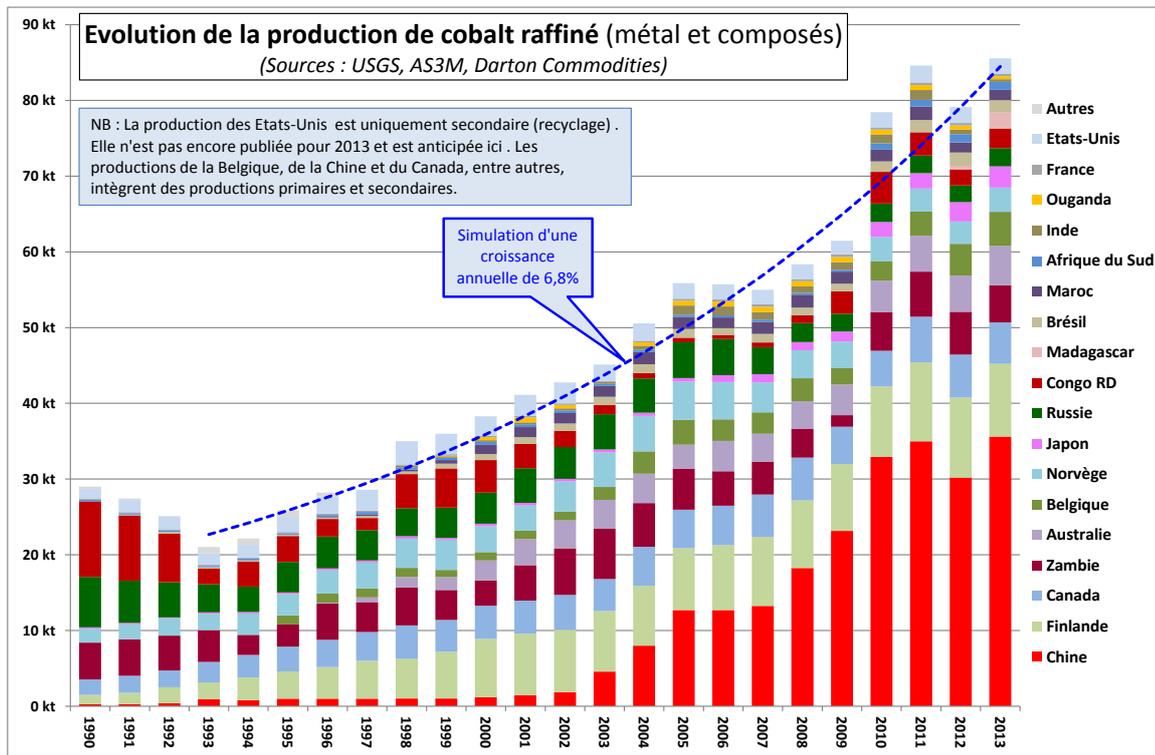


Figure 29 - Évolution de la production de cobalt raffiné de 1990 à 2013.

4.4. PROCÉDÉS DE PRODUCTION

4.4.1. Extraction minière

Les gisements de nickel-cuivre sulfurés à cobalt en sous-produit (Canada, Russie) sont exploités pour la plupart en souterrain.

Les gisements à cuivre-cobalt (RDC, Zambie) sont exploités à ciel ouvert dans leur partie oxydée et généralement aussi dans leur partie sulfurée, à quelques exceptions près (exploitations souterraines de Kamoto / KOV par Katanga Mining (Glencore-Xstrata)).

Le gisement de cobalt (arsenic) de Bou-Azzer, au Maroc, est exploité en souterrain.

Les gisements de nickel latéritique (Nouvelle-Calédonie, Cuba, PNG, etc.) sont toujours exploités à ciel ouvert (à l'exception de la mine grecque d'Agios Ioannis).

Enfin certaines exploitations consistent en un retraitement des rejets de laverie (« tailings ») d'exploitations antérieures (Kasese, Ouganda, ou Lubumbashi, RDC).

4.4.2. Concentration, minéralurgie

Les minerais sulfurés sont concassés et broyés puis concentrés par flottation. Les oxydes de cobalt des minerais oxydés à cuivre-cobalt (Copperbelt) peuvent être séparés par flottation.

Les minerais latéritiques sont difficiles à concentrer et sont généralement traités directement en métallurgie (pyro- ou hydrométallurgie), avec éventuellement des procédés d'enrichissements assez limités (criblage granulométrique, les parties nickelifères étant plus friables, tandis que les plus gros blocs sont souvent stériles).

La Société Le Nickel (Eramet 56 %) dispose, en Nouvelle-Calédonie, d'une usine d'enrichissement à Népoui depuis 1994 (tri granulométrique et densimétrique) et d'une laverie à Thiébaghi depuis novembre 2008.

4.4.3. Métallurgie

Les procédés métallurgiques de récupération du cobalt dépendent des types de minerais à traiter. Il en existe de multiples variantes, sous brevet, dont les détails ne sont pas publics. Certaines sont passées en revue succinctement ci-après et schématisées sur la figure 31.

Minerais sulfurés à cuivre-cobalt (RDC, Zambie)

Les concentrés sulfurés sont grillés en lit fluidisé. Le calcin est mis en solution dans l'acide sulfurique. Le cuivre est extrait par électrolyse, puis, après plusieurs étapes destinées à extraire les impuretés de l'électrolyte, le cobalt est précipité sous forme d'hydroxyde par addition de chaux.

Minerais oxydés à cuivre-cobalt (RDC, Zambie)

Les concentrés d'oxydés de cobalt sont réduits au four électrique après ajout de coke (10 % de la masse du minerai). La consommation d'énergie est de 12 000 kWh/t de Co. On obtient un « alliage rouge » à environ 89 % Cu, 4 % Co, 4 % Fe, qui permet d'obtenir un « alliage blanc » contenant 42 % Co, 15 % Cu, 39 % Fe et une scorie contenant 15 % Co qui est recyclée. Le cobalt de l'alliage rouge est récupéré lors des opérations de métallurgie du cuivre. L'alliage blanc est dissous à chaud dans l'acide sulfurique. Le cuivre est précipité par cémentation à l'aide de fer. Le cobalt est précipité par du carbonate de sodium en milieu basique, sous forme de carbonate de cobalt (Société Chimique de France, 2012).

Minerais de nickel latéritique (Nouvelle-Calédonie, Cuba, PNG, Australie, etc.)

Les minerais latéritiques peuvent être traités par pyrométallurgie.

Les minerais latéritiques saprolitiques peuvent être réduits en ferronickel (contenant 20 à 30 % Ni) en fours rotatifs avec du coke ou du charbon. Ce procédé ne permet pas la récupération du cobalt. Alternativement, ils peuvent être convertis en matte par addition de soufre ou de pyrite dans les fours. On obtient alors une matte contenant 30 à 35 % Ni, 50 à 60 % Fe, 9 à 12 % S, et rassemblant aussi le cobalt contenu, qui peut ensuite être récupéré lors du raffinage de la matte.

Les minerais latéritiques limonitiques, plus riches en fer, peuvent aussi être traités par divers procédés hydrométallurgiques :

- lixiviation acide sous pression (PAL) dans des autoclaves avec de l'acide sulfurique (Cuba, Madagascar, Nouvelle-Calédonie (Goro), Australie, PNG). Le nickel et le cobalt peuvent ensuite être extraits de la solution par extraction par solvant et électrolyse (SX-EW), ou bien précipités sous forme de sulfures par injection de H₂S. La matte sulfurée obtenue est ensuite raffinée ;
- procédé Caron, utilisé à Cuba : réduction sélective du nickel et du cobalt à chaud dans flux d'hydrocarbures et d'air, puis lessivage au carbonate d'ammonium ammoniacal, et extraction du cobalt sous forme de sulfure par l'hydrogène sulfuré.

Ils peuvent aussi être traités par pyrométallurgie et réduits en fonte de nickel (« Nickel Pig Iron », contenant 4 à 13 % Ni), essentiellement en Chine.

Minerais de cuivre-nickel sulfurés (Russie, Canada, Australie, etc.)

Les concentrés sulfurés à nickel-cuivre sont généralement traités par pyrométallurgie. Ils sont grillés et fondus pour obtenir une matte à nickel (10 % à 80 %), cuivre, fer, soufre (et cobalt), convertie en matte de Ni-Cu-(Co) par oxydation partielle du fer et du soufre.

Certains minerais peuvent être traités par hydrométallurgie, comme à Voisey's Bay (Canada), où Vale Inco a développé un procédé pour traiter ses concentrés par une lixiviation sous pression d'environ 10 atm, vers 150 °C, en présence d'acide sulfurique et de dioxygène. Après neutralisation et élimination de l'alumine et de l'oxy-hydroxyde de fer, Cu²⁺, Co²⁺ et Ni²⁺ sont extraits par des solvants spécifiques.

Enfin un procédé bio-hydrométallurgie est utilisé sur les minerais de Talvivaara (Finlande).

Minerais de cobalt arséniés (Maroc)

Un premier grillage en lit fluidisé permet d'éliminer les deux tiers de l'arsenic présent sous forme d'As₂O₃ volatil (récupéré ensuite par condensation). Le calcin est mis en solution dans un mélange acide chlorhydrique-chlore ou dans l'acide sulfurique. Le cobalt peut ensuite être extrait par solvant, par électrolyse ou précipité sous forme de carbonate.

Raffinage des mattes

Les procédés de raffinage des mattes à cuivre-nickel-(cobalt) utilisés par les diverses sociétés sont très variés (Roskill, 2010).

- **Procédés pyrométallurgiques**

Procédé Vale Inco, Copper Cliff, Canada : séparation des constituants par cristallisation fractionnée par refroidissement lent, puis séparation magnétique (métaux précieux dans la fraction non-magnétique), puis par flottation sélective.

Procédé carbonyle : la matte est chauffée dans un convertisseur rotatif à haute température avec du monoxyde de carbone, qui convertit sélectivement le nickel en tétracarbonyle de nickel ($\text{Ni}(\text{CO})_4$), volatil, laissant cuivre et cobalt dans le résidu.

- **Procédés hydrométallurgiques**

Procédé Eramet, Sandouville, France : la matte est traitée par une solution de chlore et du chlorure ferrique. Le soufre est séparé par filtration puis le cobalt est extrait par solvant de la liqueur.

Procédé Sherrit-Gordon, utilisé à Fort Saskatchewan (Alberta, Canada) pour traiter initialement les minerais et désormais les mattes de Moa Bay (Cuba). Les minerais et mattes sont mis en suspension dans l'eau et placés dans un autoclave, vers 270°C, sous environ 5 MPa, en présence d'acide sulfurique (de 360 à 440 kg/t de minerai). De nombreux éléments passent en solution et, en particulier, Co^{2+} et Ni^{2+} . Après élimination des ions ferriques et aluminium par neutralisation à l'aide de lait de chaux et du cuivre par résine échangeuse d'ions, Co^{2+} et Ni^{2+} et Zn^{2+} sont extraits par solvant organique puis élués à l'aide d'acide chlorhydrique. Leur concentration est ainsi augmentée d'un facteur 20. Zn^{2+} est ensuite éliminé à son tour sur résine échangeuse d'ions puis les ions Co^{2+} et Ni^{2+} séparés par solvants spécifiques. Le cobalt de la solution de chlorure ainsi obtenue peut être précipité sous forme de carbonate de cobalt par addition de carbonate de sodium. De son côté, la solution de chlorure de nickel est traitée par pyrohydrolyse vers 820 °C pour donner de l'oxyde de nickel.

Procédé Outokumpu : deux étapes successives de mise en solution par l'acide sulfurique, sous pression atmosphérique puis sous haute pression, suivies d'électrolyse.

Procédé Xstrata-Sumitomo.

Production des produits commercialisables et du cobalt métal

Les solutions de sels de cobalt obtenues par les divers procédés peuvent être :

- soit cristallisées directement en sels (chlorure de cobalt comme produit final commercialisé) ;

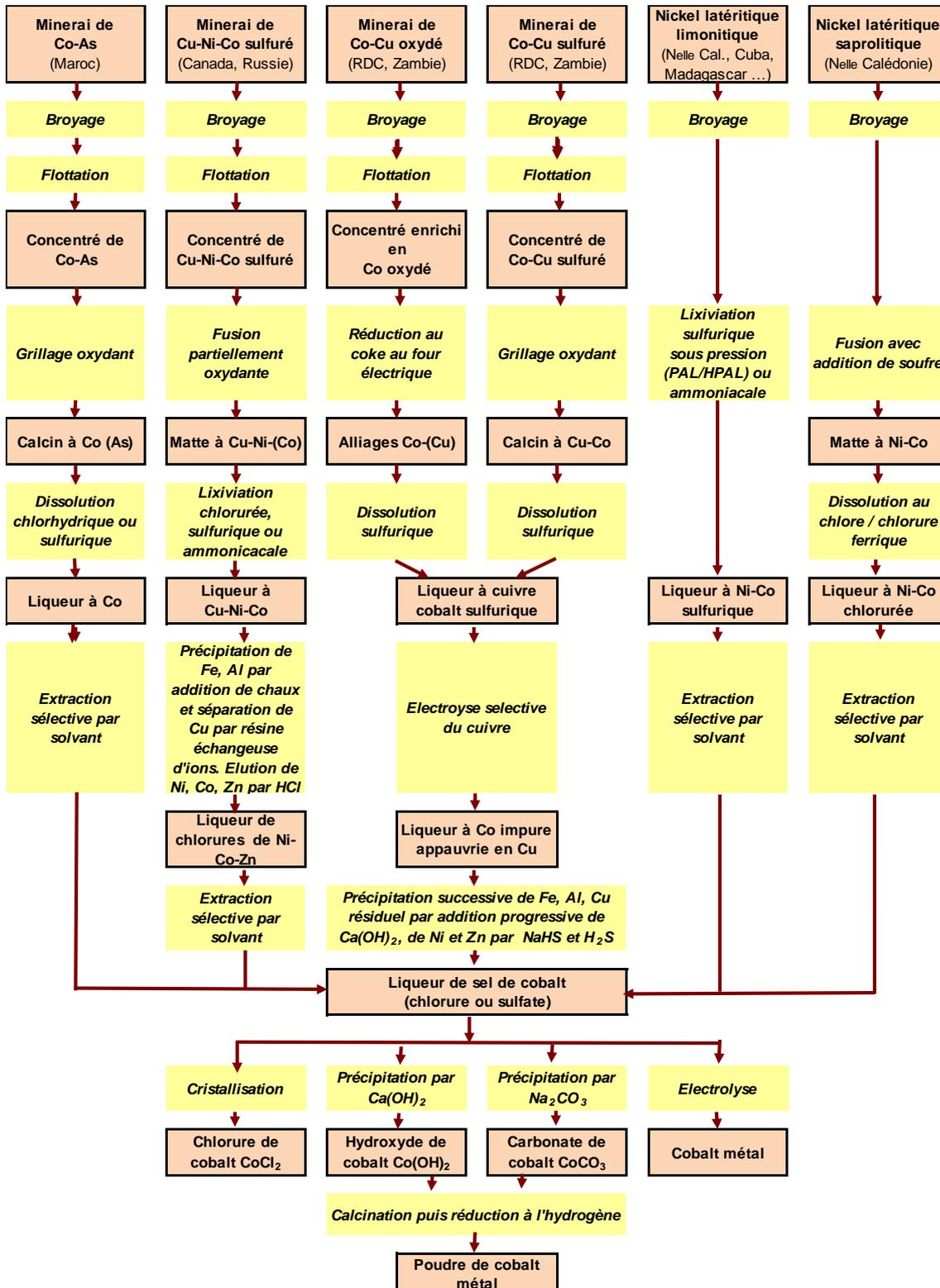


Figure 30 - Schéma simplifié des principaux processus d'extraction du cobalt (non exhaustif).

- soit précipitées sous forme d'hydroxyde de cobalt par du lait de chaux ou de carbonate de cobalt par du carbonate de sodium, puis commercialisés comme tels ;
- soit, après précipitation sous forme d'oxyde ou de carbonate, calcinées pour obtenir de l'oxyde de cobalt Co_3O_4 , qui peut ensuite être réduit par l'hydrogène en cobalt métallique sous forme de poudre ;
- soit électrolysées pour obtenir du cobalt métallique.

4.5. RECYCLAGE

4.5.1. Taux et potentialités de recyclage

En raison de son prix relativement élevé, le cobalt fait l'objet d'efforts significatifs de recyclage. Les chutes de fabrication (« new scrap ») sont largement recyclées, et nombre de produits en fin de vie (« old scrap ») sont retraités pour récupération du cobalt : batteries, carbures cémentés, catalyseurs.

En revanche, les usages du cobalt pour les pigments, les carboxylates (siccatifs et adhésifs), l'agriculture et la pharmacie sont dispersifs et ne permettent pas la récupération du cobalt.

Cependant, peu de statistiques explicites de production secondaire sont disponibles. Comme mentionné en 4.3.1, divers producteurs de cobalt raffiné peuvent inclure dans leurs intrants des scraps contenant du cobalt, et leur production peut donc inclure à la fois du cobalt primaire et du cobalt secondaire, sans que les parts d'origine primaire ou secondaire soient détaillées dans les données publiées.

L'USGS (2013) publie la production de cobalt secondaire aux États-Unis, estimée à 2 200 t de cobalt en 2011, soit 25 % de la consommation nationale de 2012. Il s'agirait pour l'essentiel de cobalt issu de recyclage d'outils en carbures cémentés.

Le PNUE (Allwood & Sonneman in Graedel *et al.*, UNEP, 2011) estime le taux de recyclage du cobalt en fin de vie à 68 %, et le contenu des approvisionnements en cobalt issu du recyclage à 32 %. Sur la base d'une production de cobalt raffiné de 85,56 kt Co en 2013, la part issue du recyclage serait, avec les taux estimés par le PNUE, de l'ordre de 27 kt. Roberts and Gunn (Gunn, 2014) estimaient la part de cobalt secondaire à 10 kt en 2005, ce qui aurait correspondu pour cette année-là à 18 % de la production totale. Roskill (février 2014) estimait l'approvisionnement du marché par le cobalt secondaire à 5 kt en 2012.

Le potentiel de la mine urbaine est significatif, néanmoins il ne doit pas faire illusion et reste très insuffisant pour satisfaire la demande en période de croissance. Umicore a publié, au printemps 2011, une estimation du contenu en divers métaux, dont le cobalt, des seuls téléphones et ordinateurs portables produits en un an, se référant à l'année 2009 (tab. 22).

Métal	Téléphones portables 1 300 M unités (2009)		Ordinateurs portables 300 M unités (2009)		Total (= "Mine urbaine" selon Umicore*)	% de la production primaire 2009
	Quantité unitaire	Masse totale	Quantité unitaire	Masse totale		
Ag	250 mg	325 t	1 000 mg	300 t	625 t	3%
Au	24 mg	31 t	220 mg	66 t	97 t	4%
Pd	9 mg	12 t	80 mg	24 t	36 t	16%
Cu	9 g	12 000 t	500 g	150 000 t	162 000 t	1%
	1 300 M batteries Li-ion		140 M batteries Li-ion			
Co	3.8 g	4 900 t	65.0 g	9 100 t	14 000 t	19%

* NDLA : Faire apparaître la consommation d'une année comme une ressource de type "mine urbaine" pour cette même année, comme le fait la publication d'Umicore de 2011, est un raccourci très contestable, et trompeur. C'est faire abstraction du fait qu'on consomme ces métaux pour produire des appareils destinés à être utilisés, au moins un certain temps, et non pas à être mis dans le circuit du recyclage dès qu'ils sont produits. Si c'était le cas, il aurait été inutile de produire ces appareils (voir texte ci-après).

Tableau 22 - Estimation du contenu en métaux, dont le cobalt, des téléphones et ordinateurs portables (traduit et adapté d'un tableau intitulé « Urban mining potential », Umicore, 2011).

Le tableau original présente le contenu des appareils produits en 2009 comme un potentiel de ressource en mine urbaine. Or ce n'est pas un potentiel immédiat : on ne produit pas ces appareils dans le seul but d'alimenter immédiatement le circuit de recyclage. Dans l'hypothèse d'une durée de vie de ces appareils, et surtout de leur batterie, de trois ans, et d'un taux de croissance attendu de la demande de 9 % par an (cf. 3.1.1 et tab. 5), le recyclage intégral (à 100 %), s'il était technologiquement et physiquement possible, du cobalt contenu dans les appareils produits trois ans auparavant ne couvrirait que 77 % de la demande du secteur concerné²⁰, et bien moins si on prend l'hypothèse d'une durée de vie supérieure.

Dans la réalité, les téléphones et ordinateurs portables de trois ans d'âge sont loin d'être tous détruits pour alimenter le circuit de production secondaire des métaux. Beaucoup servent encore, d'autres sont gardés, éventuellement pendant des années, en deuxième appareil de secours pour qui s'équipe d'un appareil neuf, d'autre se voient offrir une « seconde vie » par une cession d'occasion (éventuellement dans un pays en voie de développement), ce qui constitue en quelque sorte un recyclage, mais pas une production secondaire de métal.

Le recyclage des appareils en fin de vie est indispensable et à optimiser, d'une part pour éviter l'accumulation de déchets, d'autre part pour économiser d'autant les prélèvements de ressources non-renouvelables primaires et limiter les consommations

²⁰ Si on consomme 100 une année A, une croissance de 9 % par an conduit à consommer 129,5 trois ans plus tard (A+3). Le recyclage intégral, l'année A+3, des 100 consommés l'année A, ne couvrira que $100/129,5 = 77,2$ % des besoins.

d'énergie. Il peut encore être amélioré mais il devra toujours être complété par un apport minier, sauf situation de décroissance matérielle.

4.5.2. Règlements européens

La directive européenne n° 2006/66/CE du parlement européen et du conseil du 6 septembre 2006 relative aux piles et accumulateurs ainsi qu'aux déchets de piles et d'accumulateurs²¹ et abrogeant la directive 91/157/CEE fournit le détail suivant des « obligations et traitement et de recyclage » :

« PARTIE A : TRAITEMENT

1. Le traitement consistera, au minimum, en l'extraction de tous les fluides et acides.
2. Le traitement et tout stockage, y compris temporaire, dans les installations de traitement a lieu sur des sites offrant des surfaces imperméables et un recouvrement résistant aux intempéries ou dans des conteneurs appropriés.

PARTIE B : RECYCLAGE

3. Les processus de recyclage atteignent les rendements minimaux de recyclage suivants :
 - a) un recyclage d'au moins 65 % du poids moyen des piles et des accumulateurs plomb-acide, y compris un recyclage du contenu en plomb qui soit techniquement le plus complet possible tout en évitant les coûts excessifs ;
 - b) un recyclage de 75 % du poids moyen des piles et des accumulateurs nickel-cadmium, y compris un recyclage du contenu en cadmium qui soit techniquement le plus complet possible tout en évitant les coûts excessifs ; et
 - c) un recyclage d'au moins 50 % du poids moyen des autres déchets de piles et d'accumulateurs.

4.6. LES LIMITES DE L'OFFRE OU DE LA DISPONIBILITÉ

4.6.1. Le ban des exportations de minerais bruts de la RDC

La R.D. du Congo, premier producteur mondial de cobalt, qui exportait jadis en majorité des concentrés, a tenté plusieurs fois ces dernières années d'exercer des pressions pour favoriser davantage de transformation sur place pour augmenter la valeur ajoutée dans le pays. La RDC a émis plusieurs fois des interdictions (« ban ») ou restrictions d'exportations de concentré de cuivre et de cobalt. En avril 2010, une taxe à l'exportation de 60 US\$/t a été imposée sur les minerais et concentrés de cobalt. Puis en avril 2013, le gouvernement a signé un décret d'interdiction totale d'exportation de concentrés de cuivre et de cobalt, laissant un délai de 90 jours aux exploitants pour exporter leurs stocks de concentrés existants, après déclaration préalable. Ce décret a rencontré l'opposition des miniers mais aussi du puissant

²¹ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:266:0001:0014:fr:PDF>

gouverneur de la province du Katanga, Moïse Katumbi, dont les revenus dépendent fortement de l'activité minière, arguant en particulier de l'insuffisance de la production électrique pour fournir l'alimentation qui serait nécessaire à une transformation suffisante des concentrés sur place. Le constat de la pénurie énergétique a conduit, en juillet 2013, le Ministère des Mines à reporter la prise d'effet de l'interdiction au 31 décembre 2013, tout en accroissant la taxe à l'exportation à 100 US\$/t. Puis, fin décembre 2013, le moratoire a été reporté au 31 décembre 2014.

Les investissements en RDC pour développer la production minière de cuivre et de cobalt restent affectés par les incertitudes sur les évolutions possibles de réglementations, et par le niveau de « risque pays ».

Par ailleurs l'insuffisance de la production électrique disponible pour la province perdure. Ainsi les pénuries d'énergie ont fait perdre près de deux mois de production à Katanga Mining en 2013.

Pour faire face aux menaces d'interdiction de l'exportation de produits miniers sans valeur ajoutée de RDC, Freeport a annoncé en janvier 2013 vouloir développer une intégration verticale de sa filière cobalt de la mine jusqu'aux sels de cobalt de qualité batterie. En mars 2013, Freeport, Lundin Mining et Gécamines ont acquis la raffinerie de Kokkola de OM Group en Finlande. Celle-ci aurait la capacité de raffiner la totalité de la production de cobalt de Tenke pour le transformer en divers produits et en particulier de l'oxyde de cobalt de qualité batterie directement commercialisable aux fabricants de batteries Li-ion.

4.6.2. La loi Dodd Frank

Le Titre XV de la loi Dodd-Frank promulguée en juillet 2010 aux États-Unis entend proscrire les importations de substances minérales de là où elles sont susceptibles d'alimenter des conflits armés et des violations graves des droits de l'homme (« conflict minerals »), en particulier de la région des Grands-Lacs en Afrique Centre-Orientale (est de la R.D. du Congo et pays voisins).

Ces dispositions s'appliquent essentiellement à l'étain (cassitérite), au tantale (colombo-tantalite, « coltan ») et au tungstène (wolframite) des provinces du Nord et Sud Kivu et de Maniéma.

Elles ne s'appliquent pas au Katanga et à la production de cobalt de la RDC.

4.6.3. L'accroissement de la demande chinoise

Sur une production mondiale de cobalt raffiné de 86,1 kt Co en 2013, la production de la Chine a été de 35,6 kt Co (41,6 %), alors qu'elle n'était que de 1,2 kt en 2000 (soit 3,3 % de la production mondiale de l'année 2000).

Avant 2002, en plus de la production minière domestique chinoise de Jinchuan issue du gisement éponyme de nickel-cuivre sulfuré (à cobalt et platinoïdes) de taille mondiale, la Chine importait directement du cobalt métal pour ses besoins

domestiques en carbures pour outils et céramiques. L'industrie du cobalt chinoise a vraiment démarré en 2002 par l'importation de concentrés pour les transformer en produits chimiques ; avec une croissance rapide - Ganzhou Yihao (JV Umicore et Yantai) en 2001, Huayou Cobalt en 2002, Jiangsu Cobalt Nickel Metal en 2003, Zhejiang Galico Cobalt & Nickel Material, Ningbo Cobot Cobalt & Nickel, Ganzhou Tengyuan Cobalt Industrial en 2004, Natong Xinwei Nickel & Cobalt Hightech Development en 2005. Le prix du cobalt atteint alors un sommet historique à 51 US\$/lb (112 US\$/kg) en mars 2008, juste avant la crise de septembre 2008. En 2011, la Chine importe un record de 348,9 kt de concentrés (vs 41 kt en 2002) et sa consommation apparente de cobalt passe à 29 kt (vs 3,5 kt en 2002), en grande partie tirée par la production de batteries. La crise de 2012 a fait chuter les importations chinoises à 176,2 kt, soit une baisse de 49 %, déclenchant une guerre des prix et le début de la consolidation de l'industrie du cobalt en Chine. Fin 2012, les dix premiers producteurs représentaient 82 % du total de la production chinoise, vs 61 % en 2010. Cette concentration se poursuit encore et devrait conduire à quelques acteurs survivants dominant le secteur.

Les transformateurs chinois utilisent des concentrés ou de l'hydroxyde comme produits de base pour élaborer les produits chimiques. Ils sont donc directement affectés par les pressions du gouvernement de la RDC contre l'exportation d'exporter les concentrés non valorisés.

Face aux menaces de pénurie de concentrés, les transformateurs chinois devront :

- soit se tourner vers d'autres producteurs de cobalt, en particulier de nickel latéritique ;
- soit construire des unités de transformation en RDC ;
- soit acheter en RDC des produits transformés. Toutefois, une partie de la production transformée congolaise l'est sous forme de métal, alors que les besoins chinois sont surtout en produits intermédiaires (oxydes/hydroxydes et carbonates), et il ne serait pas techniquement ni économiquement justifié de retransformer le métal en composés.

4.6.4. Règlementation REACH

Les réglementations européennes sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions sur les produits chimiques (« Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals », « REACH ») lancées le 1^{er} juin 2007 entrent progressivement en vigueur en ce qui concerne le cobalt et ses composés. Elles devraient être généralisées à toute fabrication ou importation sur le marché européen de plus d'une tonne par an des produits concernés à partir de 2018, imposant des autorisations délivrées sur présentation de documentation suffisante sur les caractéristiques des produits et leurs risques associés.

L'Institut du Développement du Cobalt (www.thecdi.org) a mis en place un « Cobalt Reach Consortium » (www.cobaltreachconsortium.org) pour préparer l'industrie à ces échéances.

4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DÉSTOCKAGES

4.7.1. États-Unis

Les États-Unis avaient constitué un stock stratégique de cobalt métal (entre autres), qui atteignait un peu plus de 21 kt²² fin 1995. Depuis lors, considérant que ces stocks étaient excessifs, les États-Unis ont remis progressivement ce stock sur le marché, au rythme de 1 à 2 kt/an de 1995 à 2005 (Tab.23), puis de quelques centaines de tonnes de 2006 à 2009, pour un total 20,76 kt Co. Le stock résiduel au 30/09/2010 n'était plus que de 301 t de cobalt, demeuré inchangé depuis, les ventes ayant cessé en 2011 (USGS, 1996 à 2014).

Année	Déstockage des stocks de défense US
1995	1 830 t Co
1996	903 t Co
1997	1 060 t Co
1998	2 510 t Co
1999	1 960 t Co
2000	2 720 t Co
2001	2 210 t Co
2002	1 210 t Co
2003	2 060 t Co
2004	1 920 t Co
2005	1 120 t Co
2006	200 t Co
2007	388 t Co
2008	481 t Co
2009	187 t Co
2010	6 t Co
2011	0 t Co
2012	0 t Co
2013	0 t Co
Total	20 765 t Co

Tableau 23 - Déstockage annuel brut du stock de défense étatsunien de cobalt, selon l'USGS (1996 à 2014).

²² Ce stock était donc d'un ordre de grandeur comparable à la production annuelle mondiale à cette époque (la production mondiale de cobalt raffiné a été de 25,8 kt en 1995).

4.7.2. Japon

Le Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) maintient un stock national de certains métaux stratégiques dont le cobalt, censé correspondre à 42 jours de consommation. Il ne publie pas les quantités stockées ou déstockées.

4.7.3. Corée du Sud

Le Public Procurement Service de la République de Corée maintient un stock national de certains métaux stratégiques dont le cobalt, censé correspondre à 60 jours de consommation. Il ne publie pas les quantités stockées ou déstockées (RPA, 2012).

4.7.4. Chine

Selon l'analyse de RPA (2012), la Chine stockerait, et ferait stocker pour son compte par des sociétés productrices en Afrique, entre 300 t et trois à six mois d'importations nettes.

Selon Darton Commodities (2014), les stocks chinois détenus par les producteurs de cobalt se montaient, fin 2011, à 25 kt Co, sous forme de composés raffinés.

Le Fanya Metal Exchange (www.fyme.com.cn) publie un stock de cobalt électrolytique de 87,25 t par Wuxi Stainless Steel Electronic Exchange Center Co Ltd (mars 2014).

4.7.5. LME

Les stocks de cobalt dans les différents entrepôts du London Metal Exchange (LME) se montaient à 527 t fin novembre 2013, vs 429 t fin 2012.

4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

Plusieurs exploitations de la Copperbelt ont des projets d'accroissement de capacité (cf. tab.14) :

- Mutanda (RDC) prévoit passer à 23 kt/an Co (+ 10 kt) ;
- Tenké-Fungurumé (RDC) à 15 kt/an Co (+ 2 kt) ;
- Katanga Mining (Kamoto + KOV, RDC) prévoit passer à 8 kt/an Co (+ 5 kt) ;
- Mopani (Zambie) prévoit reprendre une production à partir de 2015 en visant 7 kt/an Co (Darton Commodities, 2014).

Ainsi Roskill (mai 2013) prévoit un accroissement de la production minière de cobalt contenu de la RDC de 51,8 kt en 2013 à 58 kt en 2014 (+11,9 %) à 68,9 kt en 2015 (+8,3 %) à 65,7 kt en 2016 (+4,5 %) et à 67,8 kt en 2017 (+3,2 %).

Le développement de la production de cuivre-cobalt de RDC reste dépendant de la disponibilité suffisante d'électricité sur place pour les unités de transformation, en

particulier si le gouvernement réactive ses pressions pour un plus grand degré de transformation sur place et limiter les exportations de simples concentrés.

Ailleurs dans le monde, plusieurs exploitations ayant démarré récemment sont encore en phase de montée en puissance (« ramp up ») et devraient accroître leur production :

- Goro / VNC (Nouvelle-Calédonie) vise une capacité de 4,5 kt/an Co (+3,4 kt) ;
- Ambatovy (Madagascar) vise une capacité de 5,6 kt/an Co (vs 4,54 kt prévus en 2014 et 2 kt produits en 2013) ;
- Ramu (PNG) prévoit atteindre 3,3 kt/an Co (+1,7 kt).

Par ailleurs, il existe au moins une dizaine de projets miniers avancés (faisabilité ou recherche de financement) susceptibles d'entrer en production d'ici quelques années selon les conditions du marché (cf. liste en tableau 16).

Toutefois, nombre de ces projets sont des projets de nickel latéritique, avec cobalt en sous-produit, comme par exemple le projet de Weda Bay (Indonésie), porté par Eramet. Leur avenir dépend donc davantage des perspectives du marché du nickel que de celui du cobalt, et les prix très déprimés du nickel en 2013 ont conduit Eramet à mettre ce projet en sommeil.

Globalement, la production minière de cobalt devrait pouvoir continuer à augmenter. Néanmoins, Darton Commodities estime que la croissance de la production devrait être de +2,8 %/an pour les trois prochaines années, donc inférieure aux prévisions de croissance de la demande (+5,8 %/an, cf. 3.3.2). Le marché du cobalt passerait alors d'une situation excédentaire à une situation déficitaire en 2016 (cf. fig. 18).

5. Prix du cobalt

5.1. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX

Depuis février 2010, le cobalt est coté au London Metal Exchange (LME), la bourse des métaux de Londres, désormais contrôlée par la bourse de Hong-Kong (HKEx). Les prix acheteur, vendeur et finaux, au comptant et à trois mois sont publiés quotidiennement sur le site du LME (www.lme.com).

Mais une grande partie des échanges de cobalt, sous diverses formes de métal ou de composés, continue à se faire par contrats entre acheteurs et vendeurs, éventuellement par l'intermédiaire de négociants (traders), comme c'était le cas général avant le début de la cotation au LME²³. Divers périodiques ou sites Internet spécialisés, comme Metal Bulletin (www.metalbulletin.com) ou Metal-pages (www.metal-pages.com), publient des fourchettes de prix d'échanges établies selon leurs enquêtes (Tab.24). Ces prix indicatifs peuvent ensuite servir de base de référence pour l'établissement de nouveaux contrats.

Description	Bas	Haut	unité	Date	Publié depuis
Prix publiés par Metal Bulletin					
Cobalt High Grade, marché libre, en entrepôt	14.3	15.7	US\$/lb Co	19/03/2014	
Cobalt Low Grade, marché libre, en entrepôt	14.2	15.0	US\$/lb Co	19/03/2014	
Concentré min.8% Co, CIF ports chinois	10.5	11.0	US\$/lb Co	19/03/2014	
Prix publiés par Metal Pages					
Cobalt 99,8%, "alloy grade" / "aerospace applications", Europe	14.75	15.75	US\$/lb Co	18/03/2014	janv 2002
Cobalt 99,6%, "chemical grade", Europe	14.5	15.25	US\$/lb Co	18/03/2014	mars 2011
Cobalt 99,3%, "Russian grade", Europe	15.5	15.0	US\$/lb Co	18/03/2014	janv 2002
Oxyde de cobalt 72 % ex entrepôt Chine	154	156	RMB/kg	18/03/2014	nov 2009
Chlorure de cobalt 24 % ex entrepôt Chine	49	51	RMB/kg	18/03/2014	nov 2009

Rappel : 1 lb = 0.4536 kg

Tableau 24 - Quelques prix du cobalt publiés par Metal Bulletin et Metal Pages mi-mars 2014.

La figure 32 illustre l'évolution des prix du cobalt sur le marché européen depuis 2002, d'une part le prix du cobalt à 99,8 % établi comme moyenne des prix hauts et prix bas publiés par Metal Pages, convertis en US\$/kg (l'échelle de droite indique l'équivalent en US\$/lb), et d'autre part le prix comptant de « settlement » en fin de journée du LME depuis février 2010.

On constate que les prix du cobalt ont été très volatils dans la période 2002-2008, atteignant un record de 51 US\$/lb (112,43 US\$/kg) en mars 2008. Ils ont chuté au

²³ Freeport-McMoRan Copper & Gold, qui contrôle la plus grosse raffinerie de cobalt du monde (Kokkola, Finlande, cf. 6.2.2) a déclaré en octobre 2013 qu'il établirait désormais ses prix de vente sur la base de la cotation du LME plutôt qu'en se référant au prix indicatifs du Metal Bulletin comme auparavant (Reuters, 25/0/2013).

deuxième semestre 2008, comme ceux de la quasi-totalité des métaux, avec la crise financière de 2008. Ils ont un peu remonté en 2009 jusqu'à 23,75 US\$/lb (52,36 US\$/kg, Metal-Pages) en janvier et avril 2010 (47 US\$/kg pour le LME en avril 2010), à un niveau bien en-dessous du record du printemps 2008. Ils ont ensuite baissé jusqu'à un nouveau minimum fin 2012 (10,85 US\$/lb, soit 23,925 US\$/kg en décembre 2012 pour Metal-Pages, ou 22,6 US\$/kg en novembre 2012 pour le LME).

Ces prix se sont légèrement raffermis, irrégulièrement, au cours de l'année 2013 et atteignaient 15,25 US\$/lb = 33,62 US\$/kg en mars 2014. Mais ces prix restent inférieurs à ce qu'ils ont été pendant l'essentiel de la période 2004-2012.

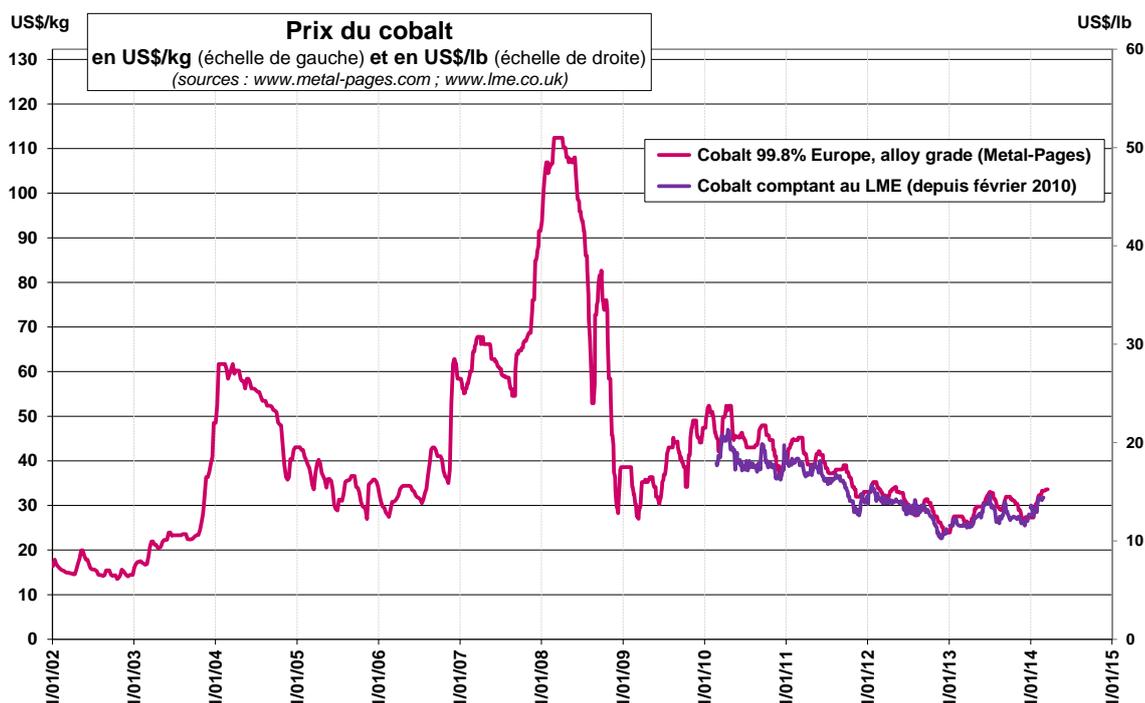


Figure 31 - Évolution du prix du cobalt depuis janvier 2002 (Metal-Pages, LME).

5.2. ÉVOLUTION HISTORIQUE DES PRIX

Le diagramme de la figure 33 illustre l'évolution des prix du cobalt depuis 1915, en moyenne annuelle. Les valeurs antérieures à 2011 sont celles publiées par l'USGS. Les valeurs à partir de 2011 sont les moyennes annuelles des prix LME. Le diagramme indique aussi les variations de prix en dollars constants de 2013.

On constate que ces prix ont toujours été assez volatils.

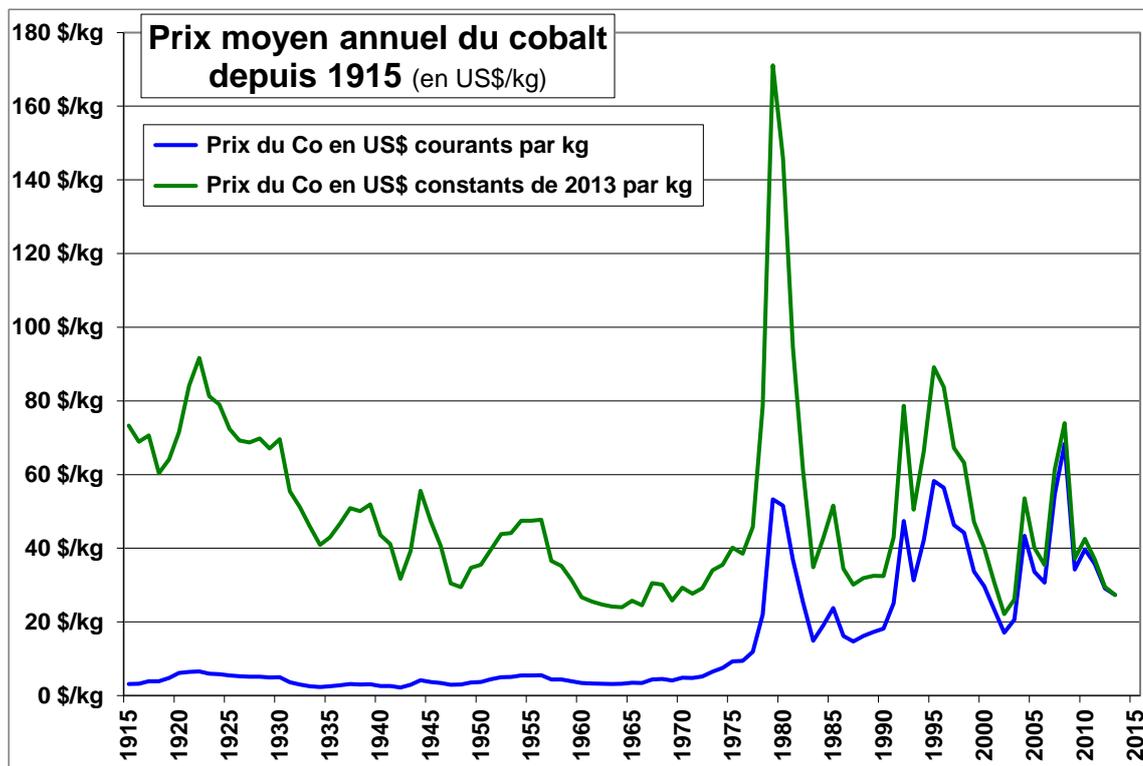


Figure 32 - Évolution historique du prix du cobalt depuis 1915.

5.3. ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX

La figure 18 illustre l'évolution comparée de l'offre et de la demande en cobalt depuis 1997.

Selon ce diagramme, le marché du cobalt est excédentaire depuis 2009 et devrait le rester en 2014 et 2015, pour devenir déficitaire en 2016. Il est en effet attendu une poursuite de la croissance de la demande de près de 6 % par an (cf. 3.3.2), alors que la production devrait croître à un rythme moindre (près de 3 % par an, cf. 4.8)

Les prix du cobalt pourraient alors se raffermir, ce qui pourrait éventuellement conduire à une meilleure valorisation du cobalt des minerais dans lesquels il est peu ou pas récupéré.

Il convient toutefois de rappeler, comme souligné en 4.3.1, que les statistiques de production sont assez variables d'une source à l'autre, avec des écarts bien supérieurs à la différence entre l'offre et la demande. Les statistiques de consommation sont tout autant sujettes à des d'incertitudes significatives (cf. 3.3.1). Le niveau et même le sens du déséquilibre du marché restent donc délicats à certifier et encore davantage à anticiper.

6. La filière industrielle

6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERS DE COBALT

Les principales sociétés productrices minières de cobalt sont récapitulées dans les tableaux 13, 14 et 15, et celles qui détiennent des projets avancés et pourraient devenir productrices à court terme sont récapitulées dans le tableau 16 (cf. 4.2.2).

Il n'y a pas d'exploitation minière en France métropolitaine, mais il y a une production minière de cobalt associé au nickel en Nouvelle-Calédonie (environ 4 % de la production mondiale). Dans l'Union Européenne, il y a une production minière modeste en Finlande (0,3 % de la production mondiale).

La production minière mondiale reste très concentrée sur la R.D. du Congo (54 %). Avec l'arrivée puis la montée en puissance des productions de nickel-(cobalt) latéritiques HPAL (« high pressure acide leaching » ou lixiviation à l'acide sulfurique sous pression en autoclave), cette production se répartit sur un plus grand nombre de pays (Goro en Nouvelle Calédonie, Ambatovy à Madagascar, Ravensthorpe en Australie, Ramu en PNG, Coral Bay aux Philippines), mais nombre de ces projets sont affectés et retardés par des difficultés techniques.

6.1.1. Producteurs miniers en Nouvelle-Calédonie

La **Société Le Nickel** (SLN, www.sln.nc) (**Eramet** (www.eramet.com) 56 %, Nisshin Steel 10 %, STPCI 34 %) exploite les sites de Thio, Kouaoua, Népouï-Kopéto, Thiébaghi (fig.34), Poum, à dominante saprolitique. Elle traite une partie de ses minerais (fig.35) – ainsi que des minerais fournis par des producteurs tiers (en particulier la SMGM) à son usine pyrométallurgique de Doniambo, qui produit entre 50 et 60 kt Ni par an (56 447 t Ni en 2012), sous forme de ferronickel (environ 80 % de la production) et sous forme de matte sulfurée à Ni-Co (environ 20 % de la production). Elle exporte une partie de ses minerais vers l'Australie et le Japon. Le cobalt n'est pas valorisé dans le ferronickel. Les mattes sont envoyées

pour raffinage à l'usine d'Eramet de Sandouville (76), où est produit du nickel raffiné et du chlorure de cobalt (300 à 350 t de Co contenu par an).



Figure 33 - Exploitation minière de Tiébaghi
(© www.sln.nc).

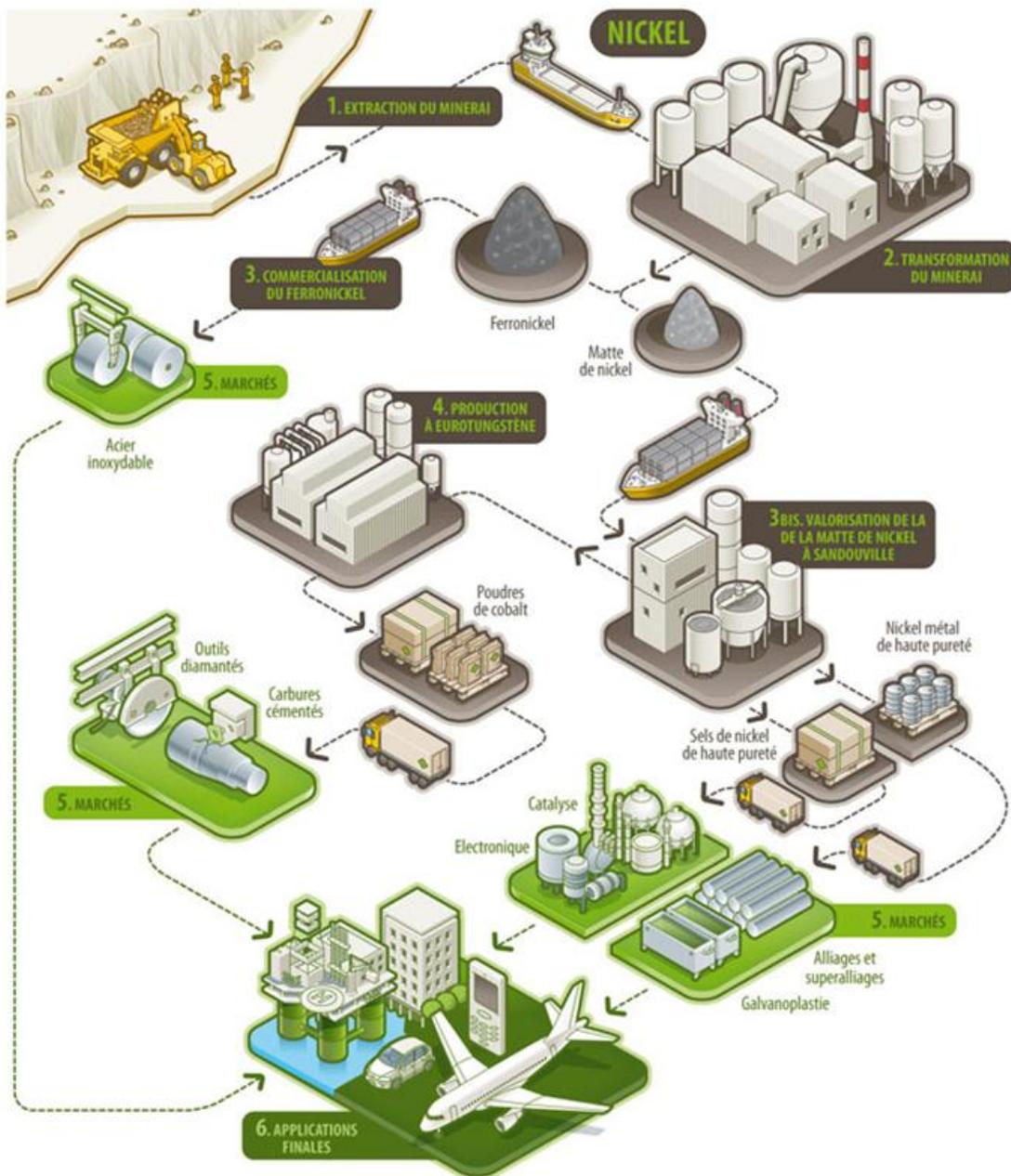


Figure 34 - La filière nickel-cobalt d'Eramet (© www.eramet.com).

Les ressources en nickel de SLN, évaluées à 3,86 Mt Ni en ressources mesurées, indiquées et supposées en 2012 (Eramet, 2013) pourraient couvrir 68 ans de production de nickel au rythme de 2012. Mais les ressources en cobalt ne sont pas publiées.

La société **Nickel Mining Company (NMC)**, (www.nmc.nc) est un partenariat entre la Société Minière du Sud Pacifique (SMSP, www.smsp.nc, 51 %) et l'aciériste sud-

coréen POSCO (49 %). Elle exploite les sites de Ouaco, Poya, Kouaoua et Nakéty. Elle produit principalement des minerais saprolitiques qui sont expédiés à la fonderie de ferronickel de Gwangyang, en Corée du Sud, de la société SNNC formée par le même partenariat. Cette filière ferronickel ne récupère pas le cobalt. NMC produit aussi un peu de minerais limonitiques exportés vers le Japon et l'Australie, où il est possible que du cobalt soit récupéré, mais NMC ne publie pas de production spécifique de cobalt.

La société **Vale-Nouvelle-Calédonie** (VNC, www.vale.nc) (Vale (www.vale.com) 74 % ; Sumitomo 11 % ; Mitsui 10 % ; SPMSC 5 %) exploite des gisements surtout limonitiques à Goro, dans le sud de l'île, qu'elle traite par lixiviation acide sous pression (HPAL, fig. 36). La production a démarré en 2011 et a connu une succession d'incidents qui ont ralenti sa montée en capacité et considérablement affecté cet énorme investissement de 6,5 milliards de US\$. L'objectif était d'atteindre une production annuelle de 57 kt Ni et 4,5 kt Co. Elle a atteint 16,3 kt Ni et 1,12 kt Co en 2013 (Vale, février 2014)²⁴. Le cobalt est produit sous forme de carbonate.

Les réserves prouvées et probables de VNC publiées par Vale (2013) sont de 122,5 Mt de minerai sec à 1,44 % Ni et 0,11 % Co, soit 1 764 kt Ni et 135 kt Co contenus. Vale prévoit un épuisement de ces réserves en 2042 au rythme théorique prévu de 57 kt Ni et 4,5 kt Co par an.



Figure 35 - L'usine hydrométallurgique de Vale-Nouvelle-Calédonie, à l'extrême sud de la Nouvelle-Calédonie (© www.vale.nc).

Pour mémoire, la société **Koniambo Nickel SAS** (www.koniambonickel.nc) (Glencore-Xstrata 49 %, Société Minière du Sud-Pacifique 51%) a commencé sa production de nickel sous forme de ferronickel dans son usine pyrométallurgique de Koniambo à partir des gisements du même nom (réserves de 62,5 Mt à 2,46 % Ni, capacité visée de 60 kt Ni contenu par an), mais elle ne produit pas de cobalt.

Plusieurs autres sociétés néocalédoniennes exploitent des minerais latéritiques (**Société des Mines de Tontouta, Société des Mines de Cap Bocage, Société Gestion-Exploitation des Mines de Nickel, Société des Mines de Poro, Société Minière du Kaala, Société des Mines de Nakéty, Société Nouméa Nickel, Société Minière Georges Montagnat, Maï Kouaoua Mines, Exploitation Dhoonan Mines, Société Mixte des Kanaks de Thio...**). La Société Minière Georges Montagnat livre une partie de son minerai à l'usine de SLN de Doniambo. Le reste est principalement

²⁴ Les statistiques publiées par la DIMENC (janvier 2014) ne mentionnent que 503 t de Co contenu.

exporté vers l'Australie et le Japon. Les exportations vers la Chine étaient encore significatives en 2007 (33 % des exportations de minerai) mais elles ont largement diminué et sont passées à zéro en 2013 (Dimenc, 2014).

Les sociétés qui exportent des minerais de nickel ne publient pas de production minière de cobalt. La Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC) publie des statistiques indiquant un contenu en cobalt valorisé uniquement dans les exportations de minerai vers l'Australie (1 960 t de Co contenu en 2012 et 1 768 t en 2013). Les ressources ou réserves détenues par ces diverses sociétés ne sont pas détaillées.

6.1.2. Producteurs miniers en UE28

Dans l'Union Européenne (UE28), seule la mine finlandaise de Talvivaara publie une production de cobalt.

Talvivaara Mining (www.talvivaara.com) exploite et traite par bio-hydrométallurgie en tas le gisement de nickel-zinc sulfuré disséminé basse teneur de Talvivaara, avec cobalt en sous-produit. La capacité visée était de 1,2 kt/an de cobalt, mais la production n'a été que de 355 t en 2012 et probablement moins en 2013 (estimée à 238 t Co). Les difficultés récurrentes de l'exploitation rencontrées depuis le démarrage de cette mine sont telles que la pérennité de sa viabilité est mise en question.

Les autres mines de cuivre nickel sulfurés finlandaises de Kevitsa (**First Quantum Inc.**, www.first-quantum.com), Hitura (**Belvedere Resources**, www.belvedere-resources.com) et Kylylahti (**Altona Mining**, www.altonamining.com) et espagnole d'Aguablanca (**Lundin Mining**, www.lundinmining.com) produisent des concentrés qui contiennent un peu de cobalt, mais ce métal n'est pas comptabilisé dans les rapports des sociétés exploitantes concernées (cf. tab. 15).

6.1.3. Producteurs miniers opérant dans la Copperbelt (RDC et Zambie)

Producteurs miniers en République Démocratique du Congo (RDC)

Toute la production de RDC provient de la province du Katanga (Copperbelt, fig. 37).

La société **Tenke Fungurume Mining** (TFM), contrôlée à 56 % par la société étatsunienne **Freeport McMoRan Copper & Gold** (www.fcx.com) et détenue à 24 % par **Lundin Mining** (www.lundinmining.com) et à 20 % par la société d'état congolaise **Gécamines** (<http://gecamines.cd>), exploite à ciel ouvert l'énorme gisement de Tenke Fungurume de 141 Mt de minerai à 2,6 % Cu et 0,4 % Co. TFM produit du cuivre mais aussi du cobalt, sous forme d'hydroxyde (environ 12 kt de Co contenu en 2013), qui était largement vendu en Chine mais alimente désormais aussi la raffinerie finlandaise de cobalt de Kokkola, rachetée par la JV Freeport-Lundin-Gécamines à OM Group en janvier 2013. TFM espère augmenter sa production à 13 kt en 2014.

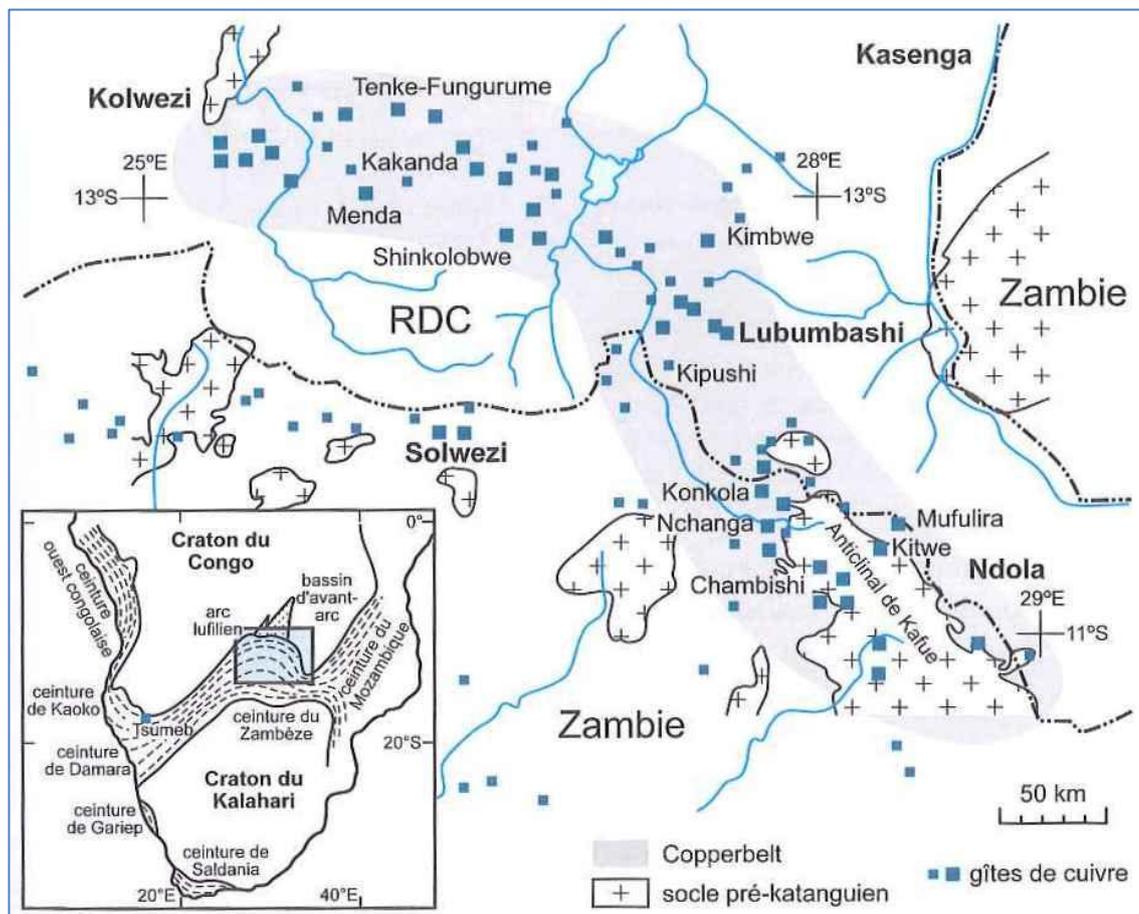


Figure 36 - Principaux gîtes de cuivre-cobalt de la Copperbelt (© Jébrak & Marcoux, 2008).

La société britannique à capitaux kazakhstanais **Eurasian Natural Resources Corp (ENRC, www.enrc.com)** contrôle à 70 % la société Boss Mining, qui exploite la mine de Mukondo Mountain, dont les teneurs en cobalt atteignent 1,2 % Co. La capacité de production est de 12 kt/an de cobalt en concentrés. Une usine de traitement par extraction par solvant et électro-extraction (SX/EW) permet de faire baisser le coût de production (cash costs) de 8 US\$/lb à moins de 5 US\$/lb et de réduire les coûts de transport vers la Chine (par rapport aux concentrés). En 2012, ENRC a pris le contrôle de la société Camrose pour 70 % du projet d'exploitation des tailings de Kolwezi-Roan (qui avait fait précédemment fait l'objet d'un litige entre l'État Congolais et la société First Quantum qui avait investi depuis 2004 pour développer le projet et s'en est fait exproprier en 2009). Ces tailings contiennent 112 Mt à 1,5 % Cu et 0,3 % Co (300 kt de cobalt contenu) et ENRC cible une production annuelle de 4 kt de cobalt Co pendant une cinquantaine d'années.

ENRC détient aussi 90 % de Chambishi Metals qui opère la raffinerie de cobalt de Chambishi (Zambie), l'une des plus importantes du monde après celle de Kokkola (Finlande) et qui a produit 4 900 t de cobalt raffiné en 2013 (cf. tab. 21). Cette raffinerie traite des concentrés zambiens mais aussi ceux de Boss Mining (RDC).

La société suisse **Glencore-Xstrata** (www.glencorexstrata.com) détient 69 % de Mutanda Mining, qui exploite la mine à ciel ouvert de cuivre-cobalt oxydés de Mutanda, en RDC, le plus gros producteur minier de cobalt du monde (13,7 kt Co produites en 2013). Elle détient aussi 75,2 % de Katanga Mining Ltd, qui détient 75 % (Gécamines en détenant 25 %) et opère la mine de cuivre-cobalt oxydés à ciel ouvert de KOV, la mine souterraine de cuivre-cobalt sulfurés de Kamoto, et l'usine métallurgique de Luilu. Celle-ci produit du cobalt métal raffiné (2 600 t Co en 2013), avec un projet d'expansion visant à faire passer sa production à 8 000 t/an après 2015.

L'entreprise d'état congolaise **Gécamines** (<http://gecamines.cd>) dispose de ses propres mines, concentrateurs et raffineries, mais elle est aussi présente à hauteur de 20 à 30 % dans de multiples projets (tab. 25) :

Société / Groupement	Part Gécamines	Partenaires	Opération
Boss Mining (BM)	30%	ENRC (70%)	Kakanda, Luita and Lubumbashi
Groupement du Terril de Lubumbashi (GTL)	30%	George Forrest International (70%)	Fonderie de Lubumbashi
Katanga Mining Company (KML) - Kamoto Copper Company (KCC) - Copper and Cobalt Project (DCP)	25%	Glencore Xstrata (75%)	KTO, KOV, Mashamba East, Musonoie-T17, mine de Kananga, concentrateur de Kamoto, fonderie de Luilu
Ruashi Mining (RM)	25%	Metorex (Jinchuan) (75%)	Mine et usine de Ruashi
Tenke Fungurume Mining (TFM)	20%	Freeport-McMoRan (56%), Lundin (24%)	Tenké-Fungurumé

Tableau 25 - Principales parts détenues par Gécamines dans les exploitations de cuivre-cobalt en RDC.

À son apogée, la Gécamines²⁵ était presque un état dans l'état. Elle employait directement plus de 30 000 personnes, et produisait jusqu'à 7 % de la production mondiale de cuivre et 60 % de celle du cobalt. La chute du prix du cuivre dans les années 1980 et le système de prédation du gouvernement Mobutu avait conduit au rapide déclin de la production jusqu'à l'effondrement de la portion centrale de la mine souterraine de Kamoto en 1990 suite à des années de sous-investissement.

La société chinoise **Jinchuan Group** (www.jnmc.com), qui exploite le gisement de nickel sulfuré de taille mondiale de Jinchuan, en Chine, détient 100 % de la société Metorex qui détient 75 % de la société Ruashi Mining (Gécamines détenant les 25 % restants) qui exploite plusieurs mines à ciel ouvert à Ruashi, en RDC. La production, qui a atteint 3 200 t de cobalt dans des hydroxydes en 2013, est expédiée pour raffinage à Jinchuan (Chine).

Plusieurs autres sociétés chinoises sont impliquées à des degrés divers dans le secteur minier du cobalt en RDC : China Railways Resources Group ; Corporate

²⁵ La société avait été créée au début du XX^e siècle par Cecil Rhodes et le roi des belges Léopold II. Elle est devenue Union Minière du Haut Katanga, fut nationalisée à l'indépendance du Congo, avant de prendre le nom de Générale des Carrières et des Mines ou Gécamines.

Congo Mining International (CIMCO) ; Guang'an Cota Metal ; Cota Mining ; Coco Mining ; Long Fei Mining ; Han Rui ; Metal Mines ; East China Capital Holdings ; Shituru Mining ; Zhejiang Huayou Cobalt ; Congo Dongfang International Mining ; (CDM) ; Minière de Kasombo (Mikas) ; Compagnie Minière de Musonoi (Commus). La création de la société Sino-Congolais des Mines (Sicomines) est détenue par Gécamines (32 %), China Railway Group (CREC) - Sinohydro - Zhejiang Huayou Cobalt (68 %), fait suite à un partenariat « minerai contre infrastructures ».

Le **Groupe George Forrest International** (GFI, www.forrestgroup.com) détient 70 % du Groupement pour le Traitement du Terril de Lubumbashi (Gécamines détenant les 30 % restant), qui est une énorme accumulation de scories issues des activités métallurgiques de l'Union Minière du Haut Katanga puis de la Gécamines entre 1924 et 1992. La partie exploitée représente 4,5 Mt de scories à 2,1 % de cobalt. Sa production a été de 3,1 kt de cobalt sous forme d'alliage blanc en 2013 (cf. tab. 13)

Enfin il existe en RDC une exploitation artisanale d'oxydés de cobalt en surface (hétérogénite, CoOOH), qui occuperait entre 50 000 et 150 000 personnes (CASM, 2009 ; Bedder, Roskill, 2013). La majorité de ces exploitations serait contrôlée par des chinois. Ainsi, à Likasi à 120 km de Lubumbashi, les premiers chinois sont arrivés à partir de 2002. En cinq ans, 140 chinois se sont installés. Sur les 60 sociétés minières de Likasi, 55 seraient chinoises. À la sortie de Likasi, la piste qui mène à Kolwezi, est baptisée « Route de Pékin ». Les Chinois de Likasi ont installé des fours pour transformer le minerai de cobalt et l'exporter vers la Chine via l'Afrique du Sud ou la Tanzanie sous forme de lingots. En octobre 2012, le gouverneur de la province, Moïse Katumbi en a fait fermer trois.

Roskill (fév. 2014) estime la capacité de production artisanale congolaise à 15,3 kt de cobalt, et estime la production artisanale à 7,76 kt Co pour l'année 2012.

Seule une faible partie de la production minière de la RDC est transformée en cobalt métal en RDC (Katanga Mining, contrôlée par Glencore-Xstrata, qui a produit 2,6 kt de cobalt métal en 2013). Le reste de la production minière de RDC est exportée sous forme de concentrés ou de produits intermédiaires.

Les concentrés exportés par la RDC le sont désormais tous vers la Chine. Les produits intermédiaires le sont en partie vers la Chine, en partie vers la Finlande (raffinerie de Kokkola) (fig. 38).

Les producteurs miniers de RDC sont affectés par l'insuffisance électrique de RDC qui ne produit qu'à 50 % de ses 2 400 MW de capacités (Banque Mondiale), une situation qui devrait perdurer et affecter la possibilité de créer davantage de valeur ajoutée localement.

Il faut un total de deux mois pour arriver en Chine, plus 75 jours pour que ces concentrés soient raffinés. En d'autres termes, ce laps de temps important signifie un risque élevé pour le raffineur compte tenue de la volatilité inhérente des cours du cobalt (selon Mrs. Zhang Baoyu de la société Jiangsu Xiongfeng Technology Co., Ltd., en 2012). Cela remet en cause les achats sur la base de contrats à long terme.

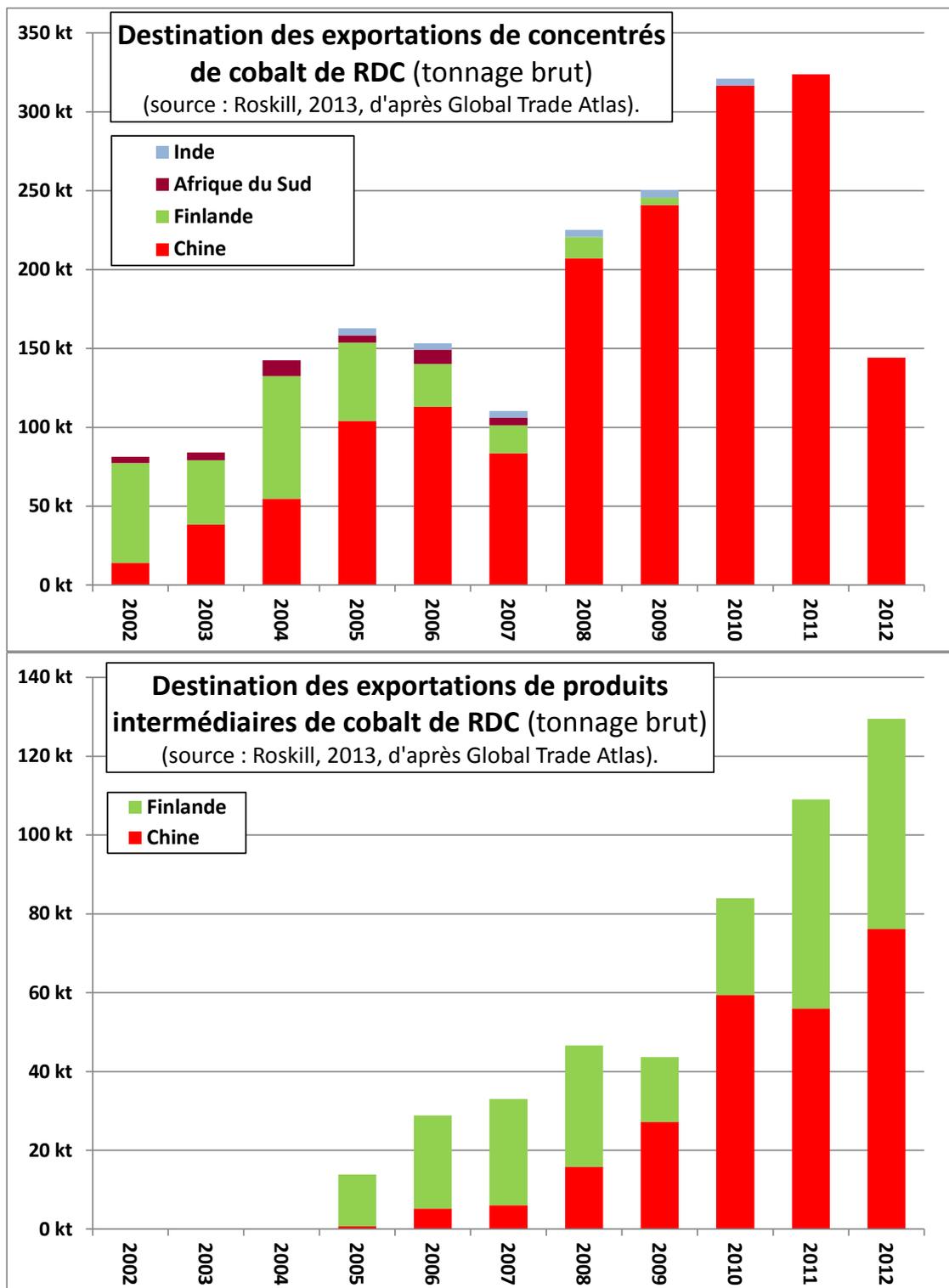


Figure 37 - Destination des exportations congolaises de minerais et concentrés de cobalt (en haut) et de produits intermédiaires (en bas) (source : Bedder, Roskill, 2013, d'après Global Trade Atlas).



Figure 38 - Sacs de concentrés et cathodes de cobalt prêts à rejoindre la Chine via l'Afrique du sud (3 000 km en dix jours) (© International Mining, juillet 2008²⁶).

Producteurs miniers en Zambie

La production de cobalt raffiné de Zambie a baissé à 4,9 kt en 2013 (vs 5,66 kt en 2012 et 5,96 kt en 2011).

La société **Konkola Copper Mines**, filiale à 79,4 % du groupe indien **Vedanta Resources Plc** (www.vedantaresources.com), produit des alliages de cuivre-cobalt non raffinés à sa fonderie de Nchanga à partir de la mine à ciel ouvert du même nom.

La raffinerie de cobalt de Chambishi (**Chambishi Metals Plc**, filiale à 90 % du groupe **ENRC** (www.enrc.com, cf. 6.1.3) traite les concentrés des mines congolaises de Boss Mining et de diverses mines zambiennes. Sa production a atteint 5,3 kt Co en 2012 puis a fléchi à 4,9 kt en 2013.

La société **Mopani Copper**, filiale à 73,1 % de **Glencore-Xstrata** (www.glencorexstrata.com) et à 19,6 % de **First Quantum** (www.first-quantum.com), qui produisait encore quelques centaines de tonnes de cathodes de cobalt en 2011, a cessé sa production en 2013. Elle envisage une reprise de la production à partir de développements souterrains de la mine de Nkana et d'un accroissement de la capacité de sa fonderie à 7 kt à partir de 2015 (Darton Commodities, 2014).

De nombreux autres groupes étrangers sont présents dans le cuivre en Zambie, qui contribuent aussi à la production de cobalt :

- Jinchuan Group Co., Ltd. (Chibuluma Mines Plc) ;

²⁶ www.infomine.com/library/publications/docs/InternationalMining/Chadwick2008t.pdf

- China Nonferrous Metal Mining (Group) Co Ltd. (Luanshya Copper Mines PLC, NFC Africa Mining Plc) ;
- First Quantum Minerals Ltd. (Kalumbila Minerals Limited, Kansanshi Mining plc, Kiwara Resources Zambia Ltd) ;
- Berkeley Mineral Resources plc. (Dumps 21, 22, 57 à Kabwe Mine, Silverlining Ventures Limited) ;
- African Eagle Resources plc (Mokambo Copper Project) ;
- Chrysalis Resources Ltd (Zambian Copper Pty Ltd.) ;
- Kasempa copper mine (Solwezi, H and S Mining Ltd (100 %) ;
- Lubambe copper mine (Chililabombwe, Vale 40 %, African Rainbow Minerals 40 %, Consolidated Copper Mines Investment Holdings 20 %) ;
- Muliashi copper operation (Luanshya, China Non-ferrous Mining Corp Ltd 80 %, ZCCM Investments Holdings 20 %).

6.1.4. Producteurs miniers dans le reste du Monde

Producteurs miniers en Australie

Glencore-Xstrata (www.glencorexstrata.com) exploite le gisement de nickel-cobalt latéritique de Murrin-Murrin (Australie-Occidentale) à travers sa filiale à 100 % **Minara Resources** (www.minara.com.au). Le minerai est traité par lixiviation acide sous pression (HPAL). Le cobalt est extrait par solvant puis électrolysé. La capacité de production est de 3 kt/an de Co métal.

La major anglo-australienne **BHP-Billiton** (www.bhpbilliton.com) exploite, à travers sa branche « Nickel-West », les gisements de nickel sulfuré de Mt Keith et Leinster, dans le district de Kambalda (Australie-Occidentale). Les concentrés de Ni-Cu-Co sont traités par la fonderie de Nickel-West de Kalgoorlie, qui produit des mattes. La production de cobalt contenu est estimée à quelques centaines de tonnes (Roskill, 2014). En mars 2014, BHP-Billiton cherchait à céder sa branche « Nickel-West ».

La société australienne **Mincor Resources** (www.mincor.com.au) exploite aussi des gisements de nickel sulfuré dans le district de Kambalda (Kambalda-North et Kambalda-South). Les concentrés sont expédiés à la fonderie de Nickel-West/BHP-Billiton de Kalgoorlie.

La société canadienne **First Quantum** (www.first-quantum.com) exploite le gisement de nickel-cobalt latéritique de Ravensthorpe, après l'avoir acheté à BHP-Billiton fin 2009. La production a commencé en 2011 et monte progressivement en puissance (1,2 kt Co produite en 2013).

Producteurs miniers au Brésil

Le groupe brésilien **Votorantim** (www.votorantim.com.br) exploite le gisement de nickel latéritique de Tocantins (Etat de Goiás), qui produit des carbonates impurs de nickel et de cobalt envoyés à la raffinerie du même groupe de São Miguel Paulista, près de São Paulo. Votorantim exploite aussi le gisement de nickel-cuivre sulfuré à cobalt de Fortaleza de Minas, qui produit des mattes envoyées à la raffinerie de nickel de Norilsk-Nickel de Harjavalta (Finlande).

Mirabela Nickel (www.mirabela.com.au) exploite depuis 2009 le gisement de nickel-cuivre sulfuré à cobalt de Santa Rita (Bahia) et produit des concentrés livrés pro parte à Votorantim et pro parte à Norilsk-Nickel.

Producteurs miniers au Canada

La société brésilienne **Vale** (www.vale.com) exploite plusieurs mines de nickel-cuivre-cobalt-platinoïdes à Sudbury (Vale Ontario Division), à Thompson (Vale Manitoba Division), ainsi que la mine de Voisey's Bay (Labrador) (cf. tab. 14). Vale a des unités pyrométallurgiques à Copper Cliff (Sudbury, Ontario) et à Thompson (Manitoba), qui produisent des mattes, et une unité de production de composés à Thompson. Ces produits intermédiaires sont envoyés pour l'essentiel à la raffinerie de Vale de Port Colborne (Ontario), et pour partie à la raffinerie de Vale de Clydach, au Pays de Galles (Royaume-Uni).

La mine de Voisey's Bay, qui extrait 6 000 t/jour de minerai et produit sur place un concentré de cuivre et un concentré mixte Ni-Cu-Co, envoie ces concentrés dans les raffineries pyrométallurgiques de Sudbury et de Thompson. Vale a construit par ailleurs une raffinerie par hydrométallurgie à Long Harbour (Terre Neuve), dont le lancement (« commissioning ») était prévu pour 2013 mais elle n'est pas encore opérationnelle.

Vale Canada a eu une production minière de cobalt de 2,4 kt Co en 2013 (cf. tab. 15), et une production de cobalt raffiné de 2,2 kt (cf. tab. 20).

La société suisse **Glencore-Xstrata** (www.glencorexstrata.com), déjà présente dans la production de cobalt en RDC, en Zambie et en Nouvelle-Calédonie (cf. plus haut) exploite deux mines souterraines à Sudbury (Fraser et Nickel Rim South, Ontario) et 4 mines souterraines à Raglan (Québec). Les concentrés miniers de Raglan sont expédiés à la fonderie Xstrata de Sudbury pour former des mattes qui sont affinées à Kristiansand, en Norvège.

Producteurs miniers en Chine

La société **Jinchuan Group** (www.jnmc.com) exploite le gisement de cuivre-nickel-cobalt sulfuré de Jinchuan, depuis 1963. Elle dispose sur place de fonderies-raffineries qui traitent non seulement les minerais locaux, mais aussi des produits nickelo-cobaltifères importés : hydroxydes bruts provenant de RDC (Ruashi) et de Ramu (PNG), mattes provenant d'Australie (Kalgoorlie / Nickel West), concentrés provenant

d'Australie (Savannah), etc. La production issue de la mine de Jinchuan est évaluée à 1,1 kt pour 2012 et 2013 (Darton Commodities, 2014).

La société **Xinjiang Xinxin Mining Industry** (<http://kunlun.wsfg.hk/en/index.php>) exploite la mine de nickel-cobalt de Kalatongke (Province du Xinjiang) et aurait produit de l'ordre de 100 t Co en 2012 (Roskill, 2014).

D'autres mines extraient du cobalt en Chine, mais en quantité modeste (ordre de grandeur de 50 t/an, selon Roskill (fev. 2014) : Shilu (Hainan Mining), Daye (Wuhan Iron and Steel), Jinling (Shandong Jinling Mining), Zhongtiaoshan (Shanxi, Zhongtiaoshan Nonferrous).

Producteurs miniers à Cuba

La société d'état cubaine **Cubaniquel** exploite des limonites nickélicifères de la province de Holguin et les usines de traitement de Nicaro et Punta Gorda qui produisent des oxydes mixtes après digestion ammoniacale et précipitation.

Moa Bay SA, détenue à 50-50 par la société canadienne **Sherrit International** (www.sherritt.com) et la société d'état cubaine General Nickel, exploite les gisements latéritiques de Moa Bay et traite le minerai par lixiviation acide sous pression. La production annuelle varie de 3,3 à 3,8 kt de cobalt contenu. La matte obtenue est ensuite expédiée à la raffinerie de Sherritt de Fort Saskatchewan (Alberta, Canada).

Producteurs et projets miniers en Indonésie

PT Aneka Tambang (PT Antam, www.antam.com) exploite les minerais de nickel latéritique de Pomalaa et Tapunopaka (Sulawesi) et Tanjung Buli (Halmahera), et des fonderies de ferronickel à Pomalaa (Sulawesi). Une partie des minerais est traitée à Pomalaa, sans récupération du cobalt, et une autre partie est exportée, mais le contenu en cobalt éventuellement récupérable n'est pas renseigné.

PT Vale Indonesia, détenue par Vale (58,73 %) et Sumitomo Metal Mining Co (20,09 %) exploite le gisement de nickel latéritique de Sorowako (Sulawesi), transformé sur place en matte à nickel-cobalt. La matte est expédiée au Japon pour raffinage.

PT Weda Bay Nickel (www.wedabaynickel.com), détenue à 10 % par PT Antam et à 90 % par la société singapourienne Strand Minerals, elle-même détenue à 66 % par Eramet (France, www.aramet.fr), 30 % par Mitsubishi Corp. (www.mitsubishicorp.com) et 4 % par PAMCO, détient les droits sur le gisement en projet d'exploitation de nickel latéritique de Weda Bay, sur l'île d'Halmahera, aux Moluques (175 Mt de minerai latéritique à 1,45 % Ni et 0,08 % Co). Eramet envisageait son exploitation par un procédé hydrométallurgique maison. Fin 2013, son développement a été suspendu en raison des prix très déprimés du nickel.

Producteur minier à Madagascar

Le projet **Ambatovy** (www.ambatovy.com), détenu par la société canadienne **Sherritt International** (www.sherritt.com, 40 %), l'organisme d'état sud-coréen **Korean Resources Corp (KORES)**, (<http://eng.kores.or.kr>, 27,5 %), la société japonaise **Sumitomo Corporation** (27,5 %) et la société canadienne **SNC-Lavalin** (5 %), a démarré en 2012 le projet d'exploitation de nickel latéritique d'Ambatovy. Le minerai est traité par lixiviation acide sous pression (HPAL). Elle a produit 2,1 kt de cobalt métal en 2013 et vise une production annuelle de 5,6 kt à pleine capacité.

Producteur minier au Maroc

La **Compagnie de Tifnout Tiranimine (CTT)**, filiale du groupe marocain **Managem** (www.managemgroup.com), a repris en 1987 l'exploitation en souterrain de la mine historique de cobalt et argent de Bou-Azzer. Elle traite le minerai localement à son usine hydrométallurgique de Guemassa et produit des cathodes de cobalt métal à 99,3 %. Sa production a atteint un pic de 1,7 kt en 2008 et a été de 1,3 kt Co en 2013.

Producteur minier en Ouganda

La société **Kasese Cobalt Company Ltd (KCCL)**, (www.kccl.co.ug) exploite depuis 1999 les anciens rejets miniers pyriteux (« pyrite stockpile ») de l'ancienne mine de cuivre-cobalt de Kasese. Le stock initial était de 922 kt à 1,38 % Co. Les concentrés de pyrite sont traités par biolixiviation en cuve, selon un procédé mis au point par le BRGM dans les années 1990, suivie d'une extraction par solvant et d'une électrolyse.

KCCL a produit depuis 1999 entre 400 et 700 t par an de cobalt >99,8 % Co. Sa production aurait encore été de 400 t en 2013 mais le stock de pyrite est arrivé à épuisement et la production arrive à sa fin.

Producteur minier en Papouasie-Nouvelle-Guinée

La JV **MCC Ramu NiCo** (www.ramunico.com), contrôlée à 61 % par la société chinoise **China Metallurgical Group Corp (MCC)**, (www.mccchina.com), détient 85 % du projet Ramu, 8,56 % étant détenus par la société australienne **Highlands Pacific** (www.highlandspacific.com) et 6,44 % par des intérêts locaux. Ce projet a démarré fin 2012 l'exploitation du gisement de nickel-cobalt latéritique de Ramu. Le minerai est traité par hydrométallurgie HPAL. Il a produit 1,2 kt Co en 2013, sur une capacité prévue de 3,3 kt

Producteurs miniers aux Philippines

La société philippine **Nickel Asia Corporation** (www.nickelasia.com) détient 60 % et 65 % respectivement des exploitations des latérites nickélifères de Rio Tuba (Palawan) et Taganito (Mindanao). Les minerais sont pro parte exportés tels quels en Chine et au Japon, et pro parte livrés à l'usine de lixiviation acide sous pression en autoclave HPAL

de Coral Bay, détenue et opérée par la société **Coral Bay Nickel Corporation** (<http://coralbaynickel.com>), filiale des sociétés japonaises **Sumitomo Metal Mining Co** (SMM, www.smm.co.jp, 54 %), **Mitsui** (18 %) et **Sojitz** (18 %). L'usine de Coral Bay produit des sulfures mixtes de nickel-cobalt qui sont traitées au Japon dans la raffinerie de SMM de Niihama, d'une capacité de production de 4,5 kt par an de cobalt électrolytique.

Producteurs miniers en Russie

MMC Norilsk Nickel (www.nornik.ru/en/), société russe dont le siège est à Moscou, est le premier producteur mondial de nickel et de palladium, le troisième de platine et de rhodium, et un important producteur de cuivre et de cobalt.

En Russie, ses unités de production sont regroupées en deux divisions intégrées :

- la « Polar Division », qui exploite les mines de nickel-cuivre-cobalt-platinoïdes des gisements de Norilsk et Talnakh, dans la péninsule de Taïmyr (Kraï de Krasnoïarsk), avec les unités de traitement métallurgiques sur place. Elle produit des cathodes de cuivre, du nickel et du cobalt métal ainsi que de l'oxyde de cobalt et des platinoïdes ;
- la « Kola Division », qui exploite les mines de nickel-cuivre-cobalt de la Péninsule de Kola, dans la région de Mourmansk. Elle produit du cuivre et du nickel ainsi que des produits intermédiaires. Norilsk-Nickel a construit une nouvelle raffinerie de cobalt.

Estimation de la répartition des revenus des opérations russes de Norilsk en 2011

(Oakdene Hollins, 2012, d'après données Norilsk et Metal-Pages)

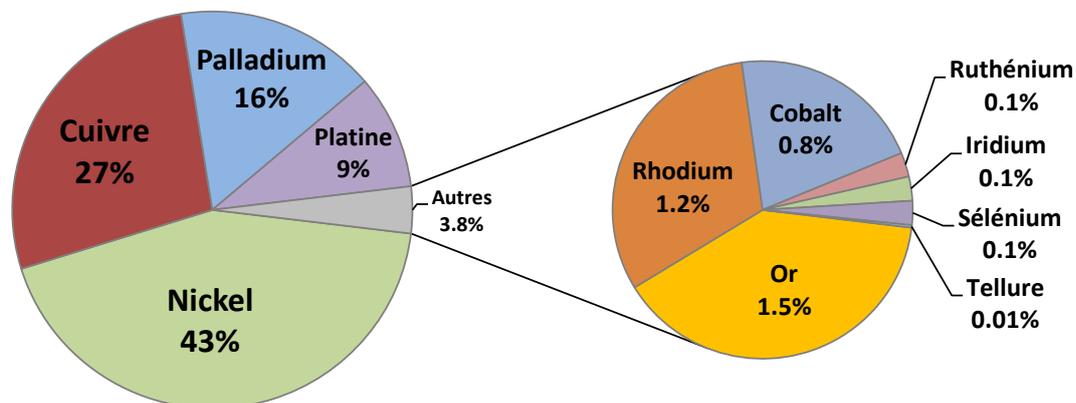


Figure 39 - Estimation de la répartition des revenus des opérations russes de Norilsk Nickel en 2011 (Oakdene Hollins, 2012).

Norilsk détient aussi la fonderie-raffinerie de nickel de Harjavalta, en Finlande, qui traite divers concentrés et semi-produits du groupe ou de producteurs tiers. Elle produit surtout du nickel, un peu de cuivre, platine et palladium. Le sous-produit cobaltifère, sous forme de solution sulfurique, était envoyé dans la raffinerie de cobalt de Kokkola

(désormais détenue par la JV Freeport McMoRan, Lundin Mining et Gécamines), toujours en Finlande, environ 300 km plus au Nord.

La production de cobalt représentait, en 2011, 0,8 % des revenus de Norilsk (fig. 39, Oakdene Hollins, 2012).

6.2. LES AUTRES PRODUCTEURS DE COBALT RAFFINÉ (MÉTAL ET COMPOSÉS)

Les principales unités de production de cobalt raffiné sont récapitulées dans le tableau 20 (cf. 4.2.2).

Les producteurs de cobalt sous forme raffinée rattachés à des opérations minières ont déjà été mentionnés en 6.1 : Minara/Glencore-Xstrata à Murrin-Murrin en Australie, Votorantim au Brésil, Vale à Thompson et Port Colborne au Canada, Jinchuan en Chine, Katanga Mining/Glencore-Xstrata en RDC, Ambatovy/Sherritt à Madagascar, CTT à Bou Azzer au Maroc, Kasese en Ouganda, Norilsk-Nickel à Norilsk en Russie, Chambish/ENRC en Zambie.

Parallèlement, plusieurs fonderies ou raffineries de cobalt ont été implantées par diverses sociétés en divers pays sans être sur des sites d'exploitations minières de cobalt, dont une en France et deux ailleurs en Union Européenne (Belgique et Finlande).

6.2.1. Producteur de cobalt raffiné en France

La société **Eramet** (www.eramet.com) détient et opère une raffinerie de nickel à Sandouville (76), qui traite les mattes nickelifères en provenance de l'unité pyrométallurgique de la Société Le Nickel à Doniambo (Nouvelle-Calédonie, cf. 6.1.1). Cette raffinerie produit du nickel métallique à 99,98 % Ni (capacité nominale de 16 kt/an Ni, production de l'ordre de 13,2 kt/an), ainsi que du chlorure de nickel et du chlorure de cobalt (production de 350 t de cobalt contenu en 2013). Le chlorure de cobalt est vendu pour l'essentiel aux fabricants français de pneumatiques.

6.2.2. Producteurs de cobalt raffiné dans le reste de l'Union Européenne (UE28)

Finlande

Freeport Cobalt (<http://freeportcobalt.com>), joint-venture rassemblant la société étatsunienne **Freeport McMoRan Copper & Gold** (www.fcx.com), 56 %, **Lundin Mining** (www.lundinmining.com), 24 %, et la société d'état congolaise **Gécamines** (<http://gecamines.cd>), détient et opère la **raffinerie de Kokkola**, sur la côte baltique finlandaise, après son rachat à OM Group en janvier 2013. Cette raffinerie traite désormais l'hydroxyde de cobalt venant de Tenké-Fungurumé, en RDC, opéré par le même consortium, ainsi que d'autres producteurs de RDC (Big Hill, cf. 6.1.3), et

d'autres produits intermédiaires à cobalt, comme les solutions sulfuriques de cobalt provenant de la raffinerie de Norilsk-Nickel de Harjavalta.

La raffinerie de Kokkola est depuis plusieurs années le plus gros producteur de cobalt raffiné du monde, avec une production de 10,6 kt Co en 2013, soit 12 % de la production mondiale.

Belgique

Umicore (www.umicore.com / www.umicore.fr), société belge basée à Bruxelles, cotée à l'Euronext, est un fondeur, recycleur et raffineur d'un large éventail de métaux et de leurs composés chimiques.

Sa branche **Umicore Cobalt & Specialty Materials** (CSM, www.csm.umicore.com) produit du cobalt dans ses raffineries d'Olen, en Belgique, et de Ganzhou, détenue par Ganzhou Yi Hao Umicore Industries Co Ltd (40 % Umicore).

Umicore présente cette branche comme un leader global du raffinage, de la transformation et de la commercialisation de composés de cobalt à destination d'une grande variété de marchés, et en particulier le cobaltate de lithium pour les batteries rechargeables. Umicore recycle du cobalt à partir des batteries usagées à Hoboken.

Sa production a été de 4,5 kt de cobalt en 2013, dont environ 1,4 kt produits en Belgique et 3,1 kt en Chine (Darton Commodities, 2014).

6.2.3. Producteurs de cobalt raffiné dans le reste du Monde

En plus des raffineries rattachées à des opérations minières et déjà citées en 6.1.1, il existe plusieurs raffineries produisant du cobalt à partir de matières premières extérieures.

Australie

Queensland Nickel Pty (www.qni.com.au) détient et opère la raffinerie de nickel-cobalt de Yabulu, cédée en 2009 par BHP-Billiton, et qui a produit 2,25 t de cobalt métal en 2013, à partir de minerais latéritiques d'Indonésie, des Philippines et de Nouvelle-Calédonie.

Canada

Sherritt International (www.sherritt.com) détient et opère la raffinerie de nickel et cobalt de **Fort Saskatchewan** (Alberta), qui traite en particulier les mattes de nickel-cobalt venant des exploitations de nickel latéritique de Cuba. Elle a produit 3,3 kt de cobalt en 2013.

Norvège

Glencore-Xstrata (www.glencorexstrata.com) détient et opère la raffinerie de nickel-cobalt de **Nikkelverk**, à **Kristiansand**, en Norvège. Cette raffinerie traite les mattes en provenance des mines de GlencoreXstrata au Canada (Sudbury, Raglan) et de fournisseurs tiers. Sa production a été de 3,2 kt en 2013.

Japon

Sumitomo Metal Mining Company Ltd (SMM, www.smm.co.jp) détient et opère la raffinerie de nickel et cobalt de **Niihama**, qui traite en particulier les mattes provenant de la fonderie de Coral Bay, aux Philippines, dans laquelle elle détient 54 % (cf. 6.1.4). La raffinerie de Niihama a produit 2,8 kt de cobalt en 2013, sur une capacité de 4,5 kt.

Inde

L'Inde n'a pas de production minière de cobalt mais a commencé à produire du cobalt raffiné à partir de 1998.

Nicomet (www.nicomet.com) opère une raffinerie à Goa qui produit des cathodes de cobalt (à 99,95 %), ainsi que divers composés de cobalt purifiés (sulfate, acétate, oxyde), ainsi que du nickel et du cuivre. Sa capacité de production est de 1 000 t/an Co. Sa production a été de 800 t en 2012 (Roskill, 2014), à partir de matières premières importées essentiellement de RDC.

Rubamin Ltd (www.rubamin.com) opère une raffinerie à Baroda (Gujarat) qui produit surtout du cuivre et des composés de zinc et de molybdène, à partir de concentrés congolais et de recyclage. Elle était adhérente au Cobalt Development Institute jusqu'en 2012, et le CDI publiait aussi une production de 200 t de cobalt raffiné par Rubamin en 2012 (280 t en 2012, selon Roskill, 2014). Rubamin a quitté le CDI en 2012, et son site Internet ne fait plus état de production de cobalt.

Chine

La Chine aurait produit au total 38,7 kt de cobalt raffiné en 2013, dont 4,3 kt sous forme de métal, 3,9 kt sous forme de poudre et 30,5 kt sous forme de composés.

Les statistiques fournies par le Cobalt Development Institute et reprises par Darton Commodities intègrent la production de la raffinerie de Ganzhou Yi Hao Umicore (Umicore 40 %), à Ganzhou (Jiangxi, Chine) à la production d'Umicore-Belgique. Ainsi la production de la Chine hors Umicore est estimée à 35,6 kt Co pour 2013 (tab. 20).

La production est répartie entre plus d'une vingtaine de producteurs, dont les dix principaux assurent près de 90 % de la production.

La société **Jinchuan Group** (www.jnmc.com), déjà citée en 6.2.1 et qui exploite le gisement de cuivre-nickel-cobalt sulfuré de Jinchuan, dispose sur place de fonderies-

raffineries qui traitent non seulement les minerais locaux, mais aussi des produits nickelo-cobaltifères importés de RDC, de PNG et d'Australie. La production issue des raffineries de Jinchuan est évaluée à 6,7 kt pour 2012, pour une capacité de 10 kt Co (Roskill, 2014).

Les autres producteurs chinois de cobalt raffiné qui ont dépassé 1 kt de cobalt en 2012 sont, avec leur production de cobalt en 2012 entre parenthèses, selon Roskill (2014) : **Shanghai Ningxi Industrial Resources** (www.shningxi.com, 4 kt), **Ningbo Coboto Cobalt & Nickel** (www.coboto.net, 3,8 kt), **Zhejiang Galico Cobalt & Nickel** (www.galico.com, 3 kt), **Sichuan FuYuZheng Mining** (2 kt), **Shenzhen Green Eco-Manufacture Hi-Tech** (www.gemchina.com, produisant du cobalt secondaire, 1,6 kt), **Nanjing Han Rui Cobalt** (1,5 kt), **Ganzhou Tengyuan Cobalt** (1,5 t).

6.3. LES PRINCIPAUX TRANSFORMATEURS, FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES ET RECYCLEURS DE COBALT EN FRANCE

Au-delà de la production minière en Nouvelle-Calédonie (cf. 6.1.1) et de la production de cobalt raffiné primaire sous forme de chlorure par Eramet à Sandouville (cf. 6.2.1), il existe en France diverses entreprises impliquées dans la transformation intermédiaire et le recyclage du cobalt et de ses dérivés.

6.3.1. Métallurgie

Eurotungstène poudres (www.eurotungstene.com), filiale d'**Eramet** (www.eramet.com) basée à Grenoble (38), propose une large gamme de poudres et granules de cobalt et de prémixes :

- gamme « Cobalt » pour outils diamantés : poudres et granules de cobalt pur, prémixes de cobalt et carbure de tungstène (poudres et granules WC-Co) ;
- gamme « Cobalt cc » pour carbures cémentés : poudres de cobalt en trois nuances (CO6004, CO6104 et CO6124) ;
- gamme de poudres élémentaires pour moulage par injection métallique, dont des poudres de cobalt faiblement agglomérées (CO6004, CO6104 et CO6106).

Aubert & Duval (www.aubertduval.com), de la branche Alliages d'Eramet, propose une large gamme d'aciers spéciaux et de superalliages, et notamment :

- aciers maraging (importante résistance et dureté, tout en gardant une bonne ductilité) : MARVAL18 (8 % Co) et MY19 (8,75 % Co) ;
- superalliages base nickel, dont PER72 (15 % Co) conçu pour les aubes de turboréacteurs et de turbines à gaz ;
- superalliages base cobalt : M64BC (> 64 % Co) conçu pour les implants chirurgicaux et XSH (> 53 % Co) conçu pour les pièces aéronautiques pour turbomachines soumises à des températures élevées (aubages, chambre de combustion, tuyères...) et implants chirurgicaux.

Erasteel (<http://www.erasteel.com/>), de la branche Alliages d'Eramet, propose une gamme de poudres d'aciers et alliages Pearl® pour la Compaction Isostatique à Chaud (CIC ou HIP en anglais) et la projection thermique, dont :

- aciers PM base nickel ;
- aciers PM base cobalt : Pearl® 6, Pearl® 12, Pearl® 21 ;
- compositions chimiques sur mesure.

Oric (www.stelloric.com), basé à Grenoble (38), propose une large gamme d'alliages spéciaux Stelloric© en mettant en œuvre trois procédés de fonderie différents (fonderie cire perdue, centrifugée ou sable), et de produits (baguettes, électrodes, poudres, fils...) et de pièces (pièces de révolution, pièces axiales...) à destination de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'alimentaire, l'automobile, le nucléaire ou encore la verrerie. Les différents alliages proposés sont à base fer, nickel ou cobalt, comme le Stelloric370© (C 2,5 % ; Cr 33 % ; W 18 % ; Co 46,5 %).

Hexametal (www.hexametal.com), basée à Chazelles-sur-Lyon (42), produit des pièces spéciales à partir de poudres de carbure de tungstène dans un liant de cobalt. Les ébauches produites sont destinées à des applications variées : pièces résistant à l'abrasion, pièces de découpe et de poinçonnage, pièces de frappe, ou nuances à la demande pour utilisations spécifiques. Hexametal élabore des produits standards ainsi que des nuances WC-Co sur demande (tab. 26).

Nuance		% Co	Divers	Densité (g/cm ³)	Dureté HV 30	Dureté HRA	Résistance à la flexion N/mm ²	Résistance à la compression N/mm ²	
ISO	HEXA								
K01	SMG 4	4	0,3	15,10	1 900	93,8	2 000	6500	Grain sub- micronique <1µm
K05 /K10	SMG 6	6	0,3	14,90	1 800	93,2	2 500	6400	
K10 /K15	SMG 8	8	0,3	14,70	1 700	92,8	2 800	6300	
K15/K20	SMG 10	10	0,3	14,50	1 600	92,1	3 200	6000	
K05	FG 5	5	0,3	15,00	1 850	93,1	2 000	6300	Grain fin [1µm-2µm]
K10	FG 6	6	0,3	14,90	1 750	93,0	2 200	6200	
	FG 7	7	0,3	14,80	1 600	92,4	2 400	6100	
	FG 12	12	0,3	14,30	1 400	90,4	3 000	4600	
K20	MG 7	7	-	14,80	1 550	91,7	2 500	5500	Grain moyen [2µm-4µm]
K30	MG 9	9	-	14,60	1 450	90,9	2 600	5200	
K35	MG 11	11	-	14,45	1 350	89,8	2 800	4500	
K40	MG 15	15	-	14,00	1 210	88,3	2 900	4100	
K50	MG 20	20	0,5	13,60	1 100	86,8	3 200	3900	
	CG 18	18	-	13,8	1 100	84,8	3 000	3800	Gros grain [6µm - 12µm]
	CG 20	20	-	13,6	1 000	86,2	2 900	3600	
	CG 22	22	0,5	13,4	940	84,5	2 850	3500	
K55	CG26	25,5	0,5	13,12	900	84,3	2 750	3400	
K60	CG25	25	-	13,15	830	84,0	2 800	3400	

Tableau 26 - Nuancier de produits standards proposés par Hexametal et leur composition en cobalt (www.hexametal.com).

6.3.2. Recyclage et valorisation

Aérométal (www.aerometal.fr), basée à Gergy (71), recycle les déchets d'industries spécialisées (nucléaire, médical, armement, pétrochimie, aéronautique) et valorise les métaux à partir des alliages et superalliages : nickel, titane, cobalt, zirconium, tungstène, molybdène et chrome. Ils sont ensuite préparés et conditionnés pour alimenter les fonderies.

Récupyl (www.recupyl.fr), basée à Domène (38), recycle les piles et les accumulateurs usagés et valorise les métaux qu'elles contiennent (fig. 40) :

- accumulateurs Li-ion et Li-polymères : valorisation du cobalt et du lithium grâce à un procédé hydrométallurgique breveté ;
- batteries de véhicules électriques : Récupyl propose aux fabricants de batteries ainsi qu'aux constructeurs automobiles un partenariat pour le développement d'une offre spécifique de recyclage pour leurs produits ;
- R&D : travail en partenariat avec des fabricants de batteries et de véhicules électriques sur l'éco-conception des batteries et le développement de solutions performantes pour le recyclage de ces batteries dans le futur (batteries NMC - Ni-Mn-Co, batteries LiFePO₄, etc.). Ils travaillent également à l'élaboration de procédés de valorisation des poussières d'aciéries, des panneaux photovoltaïques, des écrans plats ainsi que des Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinérations des Ordures Ménagères (REFIOM) ;

La **SNAM** (Société Nouvelle d'Affinage des Métaux, www.snam.com), basée à Viviez (12), filiale du groupe Floridienne, procède au tri des piles issues des collectes ménagères et au recyclage de piles alcalines/salines et des batteries Ni-Cd, Ni-MH et Li-ion.

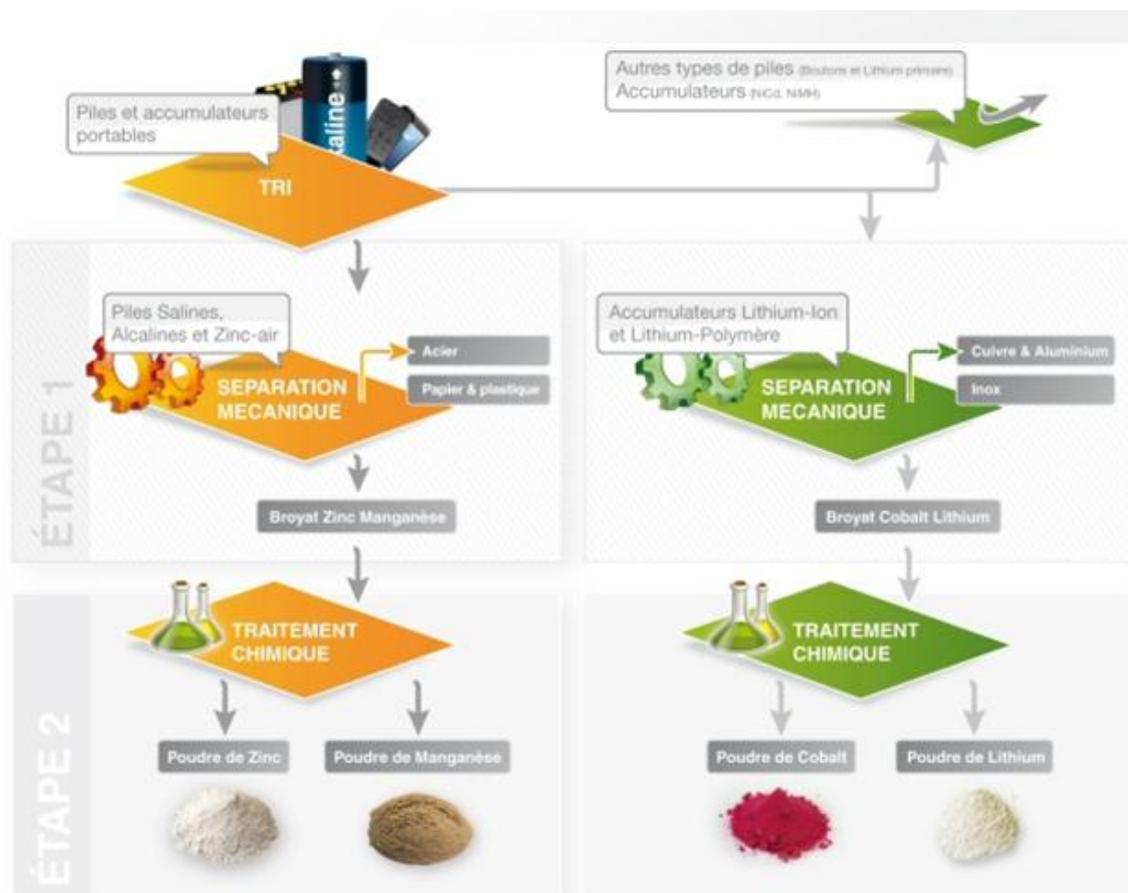


Figure 40 - Valorisation par hydrométallurgie par Récupyl du zinc, du manganèse, du cobalt et du lithium à partir de piles et d'accumulateurs (www.recupyl.fr).

6.3.3. Fabricants de batteries d'accumulateurs

Saft (www.saftbatteries.com), basé à Bagnolet (93), est le leader mondial des batteries de haute technologie. Il possède 3 sites de production en France, Poitiers (86), Nersac (16) et Bordeaux (33) ainsi qu'indirectement, le site d'ASB à Bourges (18) dont il est actionnaire à 80 %. Le groupe est implanté à l'international à travers des sites de production aux États-Unis, en Chine, en Inde, en Australie, au Royaume-Uni, en Allemagne, en Suède et en République Tchèque. Saft propose notamment une large gamme d'accumulateurs Li-ion, Ni-MH et Ni-Cd, qui contiennent potentiellement du cobalt, pour des utilisations diverses : transport urbain, équipements électroniques personnels, appareils médicaux, alimentations électriques de secours, applications militaires et de Défense, etc.



Figure 41 - Modèles de batteries proposés par Saft (www.saftbatteries.com).

De gauche à droite : batterie de secours Ni-Cd pour trams ou métros, batterie Ni-MH pour systèmes à énergie renouvelable ou véhicules hybrides, batteries rechargeables à Li-ion à forte autonomie.

E4V (www.e4v.eu) est basé au Mans (72). D'après un communiqué de presse publié le 31 janvier 2013, la société produit des batteries lithium-ion sans oxydes de cobalt ou oxydes mixtes de nickel, cobalt et manganèse. E4V s'est, en effet, tourné vers l'utilisation de phosphate de fer lithié (LFP).

ASB²⁷ group (www.asb-group.com), basé à Bourges (18), au Royaume-Uni (MSB à Glasgow) et aux États-Unis (ATB Inc., dans le Maryland), est le leader européen et numéro deux mondial sur le secteur industriel à très haute valeur ajoutée technique des piles thermiques (étude, conception, production et commercialisation) (fig. 42).

Les piles thermiques sont des piles non rechargeables qui possèdent les puissances spécifiques les plus élevées du marché. Elles sont constituées d'une anode à base d'alliage lithium-calcium ou LAN (Lithium Anode pour les piles thermiques de forte puissance), d'une cathode principalement composée de disulfure de fer (pyrite) avec l'ajout de disulfure de cobalt pour les applications nécessitant une forte puissance, ainsi que d'un électrolyte habituellement formé d'un mélange de chlorure de lithium et de chlorure de potassium. Le groupe fabrique jusqu'à 5 000 piles par mois grâce au procédé du pastillage (chaque pastille intègre l'anode, l'électrolyte et la cathode). Ces piles peuvent être utilisées dans des applications variées, telles que les sièges éjectables d'avions de chasse, les énergies de secours pour des applications industrielles, les alimentations de systèmes électroniques embarqués (Défense, aéronautique) ou encore les lanceurs spatiaux.

Sa branche ASB Hermetics produit des dispositifs de « traversée hermétique » permettant de réaliser une barrière parfaitement « hermétique » entre deux milieux différents, tout en permettant le passage d'une information électrique. Ces traversées sont utilisées dans l'aéronautique (encapsulation de composants électroniques...), sur les installations offshore, dans le secteur médical, en optique ou encore dans le

²⁷ ASB pour Aérospatiale Batteries

domaine de l'énergie (couvercles de piles thermiques et de piles au lithium). ASB Hermetics développe trois technologies différentes de scellement :

- le scellement compression, très utilisé en connectique, comporte différents matériaux pour le boîtier (inox, Inconel © (superalliage base Ni-Cr avec entre 1 et 15 % Co) ou acier doux) et des broches à base d'alliages Fe-Ni, Fe-Ni-Co ou Fe-Co ;
- le scellement accordé, utilisé pour réaliser des boîtiers dans la microélectronique, nécessite des alliages Fe-Ni ou Fe-Ni-Co ;
- le scellement basse température, qui utilise différents alliages pour le boîtier (Inox, Fe-Ni, titane, aluminium, laiton ou acier doux) ainsi que des broches composées de Fe-Ni, Fe-Co ou de cuivre.

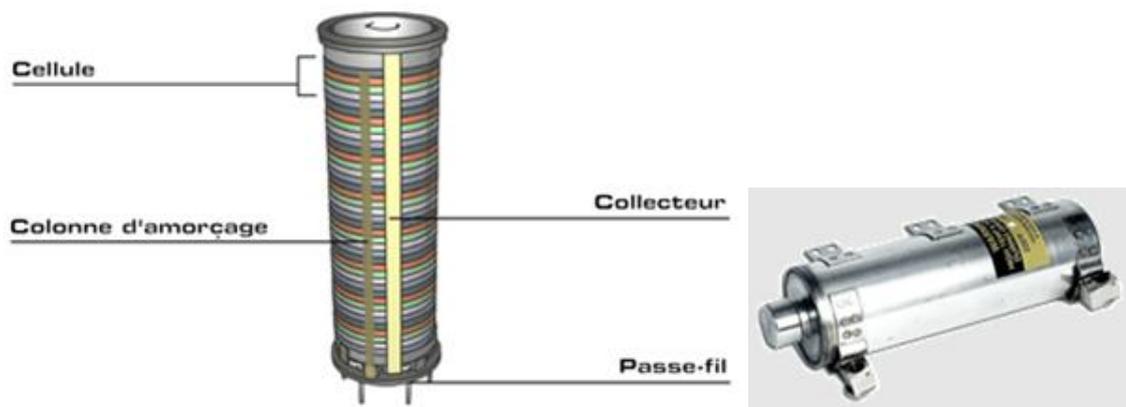


Figure 42 - Schéma d'une pile thermique et modèle de pile proposé par ASB Group (www.asb-group.com)

6.3.4. Fabricants d'aimants permanents

Euromag (www.euromag-magnets.com), basé à Saint-Pierre d'Allevard (38), fabrique une large gamme d'aimants permanents (fig.44) pour des applications variées : automobile (systèmes de filtration, moteurs électriques à courant continu...), aéronautique (génératrice tachymétrique pour mesure la vitesse de rotation du moteur...), BTP (sabot magnétique de fixation...), industrie, levage-manutention (porteur et plateau à aimant permanent pour fraiseuse, centre d'usinage...), etc.

Euromag propose notamment des aimants de type :

- AlNiCo : aimants à base d'aluminium, de nickel, de cobalt et de fer. Euromag propose 20 nuances différentes, comme Alnico600, Alnico700 ou Alnico1500, et sont découpés suivant la forme souhaitée (barreaux cylindriques et parallélépipédiques, aimants en U...);
- Sm-Co : ces aimants frittés composés de poudres de samarium et de cobalt sont principalement de deux types : SmCo_5 et $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, plus performants ;

- Nd-Fe-B : aimants frittés composés principalement de poudre de néodyme, de fer et de bore ainsi que de cobalt (entre 1 et 5 % d'après le CDI). Ce sont les aimants présentant l'énergie spécifique (BHmax) la plus élevée à température ambiante ;
- outils magnétiques, comme un aimanteur à aimants permanents néodyme-fer-bore.

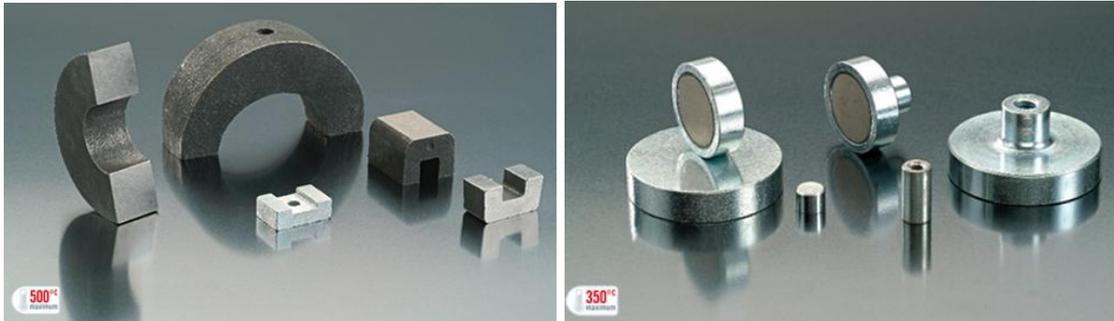


Figure 43 - Aimants Alnico (à gauche) et Sm-Co (à droite) proposés par Euromag (www.euromag-magnets.com).

First Magnetic France (www.firstmagneticfrance.com), basé à Roncq (59), propose une large gamme d'aimants, d'accessoires magnétiques et d'outils pour le triage magnétique. Il propose notamment, outre les traditionnels ferrites, des aimants permanents à Nd-Fe-B, Sm-Co et AlNiCo.

Emile Maurin (www.emile-maurin.fr), basé à Lyon (69), possède dix implantations en France. Il est spécialisé dans la conception et la fabrication d'éléments standard mécaniques (manœuvre, montage, bridage, éléments magnétiques), d'éléments de fixation (visserie, boulonnerie), et produits métallurgiques (aciers de construction, aciers à outils et aciers inoxydables). Il dispose d'une gamme d'aimants plats, cylindriques ou en U (ferrites, AlNiCo, NdFeB ou SmCo).

De nombreuses autres PME et TPE françaises spécialisées dans la fabrication et la vente d'aimants permanents. Un annuaire professionnel (www.hellopro.fr) en liste quelques-unes :

- Maizeray Electro-Aimants (Glos, 14, avec 1 salarié), fabrique des aimants permanents « terres rares » sur mesure ;
- Aimants Goudsmit France (Neuville-Ferrain, 59, 6-9 personnes), est la filiale française du néerlandais Goudsmit Magnetic Systems (www.goudsmit-magnetics.nl), spécialisé dans la fourniture d'aimants permanents de haute qualité et de systèmes magnétiques pour l'industrie automobile, électronique et médicale. Il propose notamment une gamme d'aimants permanents NdFeB, Alnico et SmCo, ainsi que des systèmes magnétiques utilisés pour la séparation et le recyclage des métaux ;
- Mecamag (Chambéry, 73, 3-5 salariés, www.mecamag.fr), est spécialisé dans les systèmes de bridage magnétiques, mécaniques, hydrauliques et à dépression, les systèmes de levage ainsi que les aimants. Il propose notamment une gamme d'aimants permanents NdFeB, Alnico et SmCo sous forme d'aimants nus ou de ventouses magnétiques ;

- **Brailon Magnetics** (Montmélian, 73, 20 à 49 salariés, www.brailon.com), conçoit et fabrique des fixations magnétiques universelles : bridage de pièces sur machines-outils travaillant par enlèvement de métal et de moules sur presse haute température, manutention, fixation, entraînement sans contact. Il propose une large gamme d'accessoires magnétiques, dont des aimants et ventouses Alnico, NdFeB et SmCo ainsi que des coupleurs magnétiques à aimants permanents.

6.3.5. Fabricants de cibles de pulvérisation

Praxair MRC SAS (www.praxair.fr), basée à Toulouse (31), filiale du groupe étatsunien Praxair (www.praxair.com), est leader sur le marché européen dans la fabrication de cibles de pulvérisation (sputtering) destinées à la fabrication de puces électroniques par technique de dépôt sous vide pour le marché des semi-conducteurs (Intel, NXP, Infineon, ST Microelectronics...). Praxair commercialise l'équivalent de quelques dizaines de kg de cobalt pur (99,99 %) ou sous forme d'alliages de cobalt. Le cobalt est travaillé par transformation métallurgique à partir de lingots obtenus par fusion et coulée.

6.3.6. Fabricants de composés chimiques du cobalt pour diverses applications

En plus d'Eramet qui produit du chlorure de cobalt primaire à Sandouville, déjà cité (cf. 6.2.1), plusieurs sociétés fabriquent divers composés chimiques de cobalt.

OMG Borchers France (www.borchers.fr), basé à Castres (81), filiale française d'OMG Advanced Organics, est un spécialiste des additifs pour peintures, vernis et encres d'imprimerie :

- catalyseurs : Octa-Soligen® Cobalt accelerators (Carboxylate de cobalt en solution dans un ester d'acide gras), accélérateur utilisé dans la réticulation des résines polyester insaturées ;
- siccatifs : plusieurs produits à base de cobalt (Octa-Soligen® Cobalt-Driers, COBALT TEN-CEM, 21 % COBALT HYDROXY TEN-CEM, Soligen® Cobalt...).

Merck (www.merckgroup.com) est une importante société chimique et pharmaceutique allemande, basée à Darmstadt, implantée dans de nombreux pays. Elle possède plusieurs implantations en France, et notamment :

- **Merck Performance Materials** (www.merck-performance-materials.com). La branche « Matériaux de Performance », basée à Fontenay-sous-Bois (94), développe des pigments et des additifs de spécialité utilisés notamment dans les dispositifs d'affichage (écrans LCD...), les cosmétiques, l'alimentation, les produits pharmaceutiques, les peintures, les plastiques et les revêtements. Elle propose notamment de l'acétate tétrahydraté de cobalt(II), du chlorure hexahydraté de cobalt(II) et du nitrate hexahydraté de cobalt(II) très purs ;
- **Millipore SAS**, basée à Molsheim (67), filiale de la branche Merck Millipore (www.merckmillipore.fr), avec six implantations en France, est spécialisé dans les

biosciences, les solutions pour les laboratoires ainsi que les solutions pour les procédés chimiques. Il propose un ensemble de composés chimiques du cobalt, de solutions étalons et de tests.

6.3.7. Fabricants de catalyseurs

Axens (groupe IFP Energies Nouvelles, <http://france.axens.net/fr/>), basé à Rueil-Malmaison, avec bureaux et services à Solaize (69) et site de production à Salindres (30), est un fournisseur international de technologies, de catalyseurs, d'adsorbants et de services pour les industries du raffinage, de la pétrochimie, du gaz et des carburants alternatifs. Il propose une grande variété de catalyseurs dont certains sont à base de cobalt pour :

- désulfuration : CoMo, Al₂O₃ (catalyseur pour le traitement des gaz de combustion) ;
- traitement de l'eau : CoMo, Al₂O₃, NiCoMo, Al₂O₃ ;
- hydrogénation : CoMo, Al₂O₃ (hydrotraitement d'essence) ;
- catalyseurs de spécialité : phtalocyanine de cobalt sulfonée, simple ou sur charbon actif (adoucissement (démercaptanisation) d'hydrocarbures).

6.4. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX

De très nombreux secteurs industriels utilisent indirectement du cobalt, comme composants de superalliages (secteurs aérospatiaux et militaires), comme catalyseur (secteurs chimiques et pétroliers), comme composant de batteries (très nombreux secteurs industriels, et en particulier l'industrie automobile qui s'oriente vers des véhicules hybrides ou électriques), comme carboxylate adhésif (fabricants de pneumatiques et tous leurs utilisateurs), comme siccatif (fabricants de peintures), comme pigment (peintures, céramiques etc.), comme composant des carbures cémentés pour tout ce qui est découpe et usinage de métaux, comme composant de certains types d'aimants permanents, etc. La liste des utilisateurs est très longue.

Quelques-uns sont cités dans les sous-sections ci-dessous, mais la liste est loin d'être exhaustive.

Enfin, une grande partie de l'économie française, et en particulier tout son secteur tertiaire, utilise – et est devenue dépendante de l'utilisation – des ordinateurs portables et divers autres appareils nomades (tablettes, téléphones). De même une grande partie des citoyens français utilisent de tels appareils, la grande majorité d'entre eux étant alimentés par des batteries au lithium à cathode au cobalt.

6.4.1. Aéronautique, espace et Défense

La plupart des industries des secteurs de l'aéronautique, du spatial et de la défense utilisent des superalliages, en particulier pour les parties chaudes des moteurs, dont de nombreux contiennent du cobalt. Elles utilisent par ailleurs des outils de coupe et

d'usinage en carbures cémentés dont la matrice est généralement en cobalt (cf. 3.1.4) carbure de tungstène. Parmi ces sociétés, on pourra citer :

- **Snecma** (91 Courcouronnes, www.snecma.com), filiale du **Groupe Safran** (www.safran-group.com), conçoit et fabrique des moteurs pour l'aéronautique civile et militaire ainsi que des moteurs spatiaux (Ariane) ;
- **Turbomeca** (64 Bordes, www.turbomeca.com), une autre filiale du **Groupe Safran**, spécialisée dans les turbines pour hélicoptères ;
- **MBDA** (92 Le Plessis-Robinson, www.mbda-systems.com), concepteur et fabricant de missiles ;
- Le **Groupe Thalès** (92 Neuilly-sur-Seine, www.thalesgroup.com), et en particulier sa filiale TDA Armements SAS (45 La Ferté-Saint-Aubin) ;
- **Airbus SAS** (33 Blagnac, www.airbus.com), du Groupe Airbus (ex-EADS, www.airbus-group.com), qui construit plus de la moitié des avions de ligne produits dans le monde, avec trois sites de production en France (Nantes, Saint-Nazaire et Toulouse-Blagnac) ;
- **Airbus Defence & Space** (<http://airbusdefenceandspace.com>), du Groupe Airbus (ex-EADS, www.airbus-group.com), regroupe désormais les activités spatiales et militaires du group (anciennes filiale d'EADS Cassidian, Astrium, etc.) ;
- **Dassault Aviation** (92 Saint-Cloud, www.dassault-aviation.com) conçoit et construit des avions civils (Falcons) et militaires (Rafale, etc.) ;
- **Eurocopter** (13 Marignane, www.eurocopter.com), est le premier fabricant d'hélicoptères civils au monde et le quatrième sur le marché des hélicoptères militaires ;
- **l'ONERA** (Office national d'études et recherches aérospatiales, www.onera.fr) développe des superalliages pour aubes monocristallines et des superalliages pour disques élaborés par métallurgie des poudres, utilisés notamment dans les moteurs Snecma M-88 et les moteurs d'hélicoptères de Turboméca. Les tableaux 27 et 28 illustrent quelques compositions de superalliages, dont des alliages au cobalt, développés par l'Onera.

Alloy	Ni	Co	Cr	Mo	W	Re	Ru	Al	Ti	Ta	Others
MC2	Bal.	5	8	2	8	-	-	5	1.5	6	-
MC653	Bal.	-	4	4	5	3	4	5.8	-	6	0.1 Si; 0.1 Hf
MC544 (MC-NG)	Bal.	-	4	1	5	4	4	6	0.5	5	0.1 Si; 0.1 Hf
MC653	Bal.	-	4	1	6	5	3	5.3	1	6.2	0.1 Si; 0.1 Hf
CMSX-10M	Bal.	1.75	2	0.4	5.4	6.5	-	5.78	0.24	8.2	0.08 Nb
René N6	Bal.	12.5	4.5	1.1	5.7	5.3	-	6	-	7.5	0.15 Hf; 0.05 C; 0.004 B
AM1	Bal.	6.5	7.8	2	5.7	-	-	5.2	1.1	7.9	-
MC-NG-LGP	Bal.	-	4	1	5	4	4	5.52	0.46	4.6	0.1 Si; 0.1 Hf
MC-NG-Mod	Bal.	-	4	1	4	4	5	4.8	1.2	7.7	0.1 Si; 0.1 Hf
MC-NG-Co	Bal.	10	4	1	5	4	4	6	0.5	5	0.1 Si; 0.1 Hf

Tableau 27 - Composition de superalliages pour aubes monocristallines développés à l'Onera, en % massiques (Caron P. et Lavigne O., 2011).

Alloy	Ni	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	Hf	C	B	Zr
N18	Bal.	15.7	11.5	6.5	-	4.35	4.35	-	0.50	0.015	0.015	0.03
NR3	Bal.	14.7	12.3	3.5	-	3.80	5.50	-	0.30	0.020	0.010	0.05
NR6	Bal.	15.1	13.8	2.1	4.0	3.20	4.50	-	0.30	0.020	0.010	0.05
SMO43(N19)	Bal.	12.2	13.3	4.6	3.0	2.90	3.60	1.5	0.25	0.015	0.010	0.05
SMO48	Bal.	14.9	12.3	3.6	4.0	3.20	4.40	0.8	0.30	0.030	0.010	-

Tableau 28 - Composition de superalliages pour disques développés à l'Onera, en % massiques (Locq D. et Caron P., 2011).

6.4.2. Énergie, Transports

Alstom (92 Levallois, www.alstom.com), concepteur et fabricant de toutes sortes de systèmes pour la génération d'énergie (thermique, nucléaire, hydraulique, éolienne) et fabricant de trains et systèmes ferroviaires, utilise des superalliages, notamment dans ses turbines au gaz.

6.4.3. Pneumatiques

Michelin (63 Clermont-Ferrand, www.michelin.com) est le n° 2 mondial en termes de ventes de pneus, derrière le japonais Bridgestone et devant l'américain Goodyear. Il avait 69 sites de production dans 18 pays à la fin 2012. Il est le leader mondial sur le marché des pneus radiaux pour poids lourds, génie civil, avions et matériel agricole ainsi que sur le marché des pneus économes en énergies pour les véhicules de tourisme et les utilitaires.

Le groupe informe que plus de 200 matières premières interviennent dans la fabrication d'un pneu.

Il utilise du cobalt sous forme de carboxylates pour augmenter l'adhésion de la gomme sur les armatures métalliques de ses pneus radiaux.

6.4.4. Constructeurs automobiles

Le contenu en cobalt dans les aciers et structures des véhicules automobiles est très faible. Du cobalt peut être utilisé dans les divers aimants permanents qui équipent ces véhicules. Par ailleurs, les constructeurs, ainsi que leurs sous-traitants et équipementiers, utilisent des outils de découpe et d'usinage de métaux qui utilisent vraisemblablement des carbures cémentés à matrice de cobalt. Mais, c'est surtout la perspective de développement des véhicules électriques ou hybrides qui devrait avoir un impact progressivement significatif sur le marché du cobalt.

Renault (www.renault.fr) a lancé progressivement la commercialisation de plusieurs modèles de véhicules entièrement électriques à batterie Li-ion (Kangoo ZE, Fluence ZE, Twizy ZE, Zoé), dont les batteries peuvent contenir plusieurs kilogrammes de cobalt.

PSA Peugeot Citroën (www.psa-peugeot-citroen.com) commercialise des compactes citadines électriques (Peugeot-iOn et Citroën C-Zéro) assemblées au Japon, mais développe en France des véhicules hybrides qui devraient utiliser progressivement des batteries Li-ion à cobalt. Peugeot-Cycles (www.cycles.peugeot.fr) fabrique et commercialise des vélos électriques à batteries au lithium, et Peugeot Scooters (www.peugeot-scooters.com) des scooters électriques.

6.4.5. Industrie pétrolière

Le groupe pétrolier français **Total** (<http://total.com/fr>) utilise du cobalt comme catalyseur dans son secteur raffinage (désulfuration des essences et gazoles). Il a un stock immobilisé de plusieurs dizaines de tonnes de cobalt sous forme de catalyseurs dans ses installations de raffinage, mais sa consommation annuelle n'est que de l'ordre de la dizaine de tonnes, car le processus de catalyse ne « consomme » pas le cobalt, et les catalyseurs sont largement recyclés lorsqu'ils sont trop usés.

Esso SAF (92 Courbevoie, www.esso.fr), filiale française du groupe pétrolier américain ExxonMobil, dispose aussi de raffineries de pétrole en France, probables utilisatrices de catalyseurs au cobalt.

6.4.6. Prothèses orthopédiques

Marle (www.marle.fr), basé à Nogent (52), est un important producteur industriel de prothèses orthopédiques, qui propose aux concepteurs d'implants un service de production industrielle complet, allant de l'ingénierie à la fabrication et conditionnement des pièces, en particulier en chrome-cobalt. Après rachat et consolidation de plusieurs sociétés, Marle dispose désormais de cinq sites de production complémentaires en France : fonderie ATS à Alès (30), forge Marle à Nogent (52), unité d'usinage Sferic à

Menars (41), unité d'usinage-revêtement-nettoyage-conditionnement SEEP à Sorbiers (42), unité de polissage H.M.P. à Sarrey (52).

Marle est le leader français des prothèses médicales coulées (hanche, genou, épaule...). Il fabrique 70 % des implants coulés en cobalt-chrome en France, sur commandes des prothésistes français, comme Tornier, ou des filiales françaises de groupes internationaux, comme Biomet-Merck, Wright-Cremascoli et DePuy. Il propose aussi désormais des fabrications en impression 3D.

Marle fabrique aussi des pièces aéronautiques (éléments de roues, de freins et de trains d'atterrissage), des pièces industrielles pour l'électromécanique, la serrurerie, les pompes et vannes, l'armement, les machines-outils et le secteur ferroviaire.



Figure 44 - Prothèses orthopédiques de marle (© www.marle.fr).

6.4.7. Secteur pharmaceutique

Sanofi (www.sanofi.fr) est la première entreprise pharmaceutique française. Son site de Saint-Aubin-lès-Elbeuf (76), qui emploie environ 250 personnes, est spécialisé dans la production d'intermédiaires pour la fabrication d'antibiotiques ainsi que de cyanocobalamine, la forme commercialement la plus courante de la vitamine B12 car la plus stable à l'air libre et la plus facile à cristalliser. En 2008, Sanofi était l'un des quatre producteurs mondiaux de cette vitamine (14 % des 35 t produites mondialement) aux côtés de trois entreprises chinoises (Chemical business newsbase, 2009).

Le **Laboratoire Aguettant** (www.aguettant.fr), basé à Lyon (69), est un laboratoire pharmaceutique spécialisé dans l'injectable. Il se positionne sur des créneaux de niche (Anesthésie-Réanimation, Micronutriments Essentiels et Neurologie) et sur le

développement de systèmes d'administration innovants. Il utilise un peu de gluconate de cobalt dans un mélange d'oligo-éléments injectables.

BioMérieux (www.biomerieux.com), basé à Macy-l'Étoile (69), utilise des quantités infimes de chlorure de cobalt pour fabriquer certains réactifs de diagnostic in vitro.

Integra NeuroSciences, filiale française basée à Sophia Antipolis (06) d'Integra (www.integralife.com), utilise des fils en alliage de cobalt pour la fabrication d'électrodes pour les enregistrements électroencéphalographiques.

6.4.8. Alimentation animale

SAFE (www.safe-diets.com, Scientific Animal Food & Engineering), basé à Augy (89), conçoit, formule et fabrique plusieurs gammes de composés concentrés (prémix) qui entrent dans la fabrication d'aliments pour animaux, qui peuvent contenir du cobalt (tab. 29). Le carbonate basique de cobalt ($2\text{CoCO}_3 \cdot 3\text{Co}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) contenu dans ces prémix provient de leur fournisseur **SFPS** (Vannes) :

Libellé	Quantité de carbonate basique de cobalt dans le prémix (mg/kg)	Quantité de prémix utilisée sur le site (kg/an)	Quantité annuelle de carbonate basique de cobalt utilisée sur le site
prémix A	95	4 508,88	428,06 kg/an
prémix B	10	0	0
prémix C	130	22 274,58	2 895,7 kg/an
prémix D	25	700,55	17,5 kg/an
prémix E	41	1 675	60,5 kg/an
Total			3 401,8 kg/an

Tableau 29 - Utilisation de carbonate basique de cobalt dans les prémix destinés à l'alimentation animale fabriqués par SAFE (source : échange direct avec SAFE).

Invivo (www.invivo-group.com) est un groupement coopératif qui rassemble 223 coopératives agricoles. Sa branche « nutrition et santé animale » incorpore des prémix à 10 à 130 mg/kg de cobalt sous forme de carbonate comme oligo-élément dans ses aliments pour animaux.

6.4.9. Sources radioactives

Cegelec NDT-PES (www.cegelec-ndt-pes.com), basé au Plessis-Paté (91), du groupe Vinci, fournit des gammagraphes industriels utilisant des sources de Co-60.

6.4.10. Verrerie et céramique

L'utilisation et la consommation de cobalt par les industries françaises du verre et de la céramique restent à documenter.

7. Commerce extérieur de la France

Les tableaux suivants présentent les données françaises d'importations et d'exportations, en valeur (k€) et en volume (t), de composés et ouvrages au cobalt sur les années 2010 à 2013. Suivant la nomenclature combinée des Douanes françaises (NC8), huit catégories de produits bruts ou intermédiaires contenant du cobalt ont été prises en compte (Le Kiosque - Portail des statistiques du Commerce extérieur, <http://lekiosque.finances.gouv.fr>) :

- 26050000 - minerais de cobalt et leurs concentrés ;
- 28220000 - oxydes et hydroxydes de cobalt ; oxydes de cobalt du commerce ;
- 28273930 - chlorure de cobalt ;
- 81052000 - mattes de cobalt et autres produits intermédiaires de la métallurgie du cobalt ; cobalt sous forme brute ; poudres de cobalt ;
- 81053000 - déchets et débris de cobalt (sauf cendres et résidus contenant du cobalt) ;
- 81059000 - ouvrages en cobalt, n.d.a. (« non désigné ailleurs ») ;
- 28332930 - sulfates de cobalt et de titane ;
- 28342920 - nitrates de baryum, de béryllium, de cadmium, de cobalt, de nickel, de plomb.

Les six premières nomenclatures sont bien un indicateur du commerce extérieur du cobalt, même si les tonnages peuvent difficilement se traduire par des tonnages de cobalt contenu : pour les minerais et les mattes, il aurait fallu une indication de leur teneur, qui peut être assez variable. Et pour les oxydes, hydroxydes, chlorures, le contenu exact en cobalt peut dépendre de leur forme (hydratée ou pas²⁸). Il est donc difficile d'en déduire un bilan massique des échanges de cobalt.

Quant aux deux dernières nomenclatures (28332930 et 28342920, mentionnées en italique), elles ne peuvent pas être considérées comme des indicateurs du commerce extérieur du cobalt puisqu'elles peuvent rassembler des tonnages de matières qui n'en contiennent pas du tout. Elles sont donc inutilisables pour les bilans cobalt.

Par ailleurs, la source du cobalt raffiné en France (raffinerie d'Eramet à Sandouville) provient d'importations qui ne figurent pas dans les nomenclatures ci-dessus, puisque ce cobalt est extrait de matière importée sous la nomenclature des mattes de nickel.

²⁸ Le chlorure de cobalt est généralement commercialisé soit sous forme anhydre, CoCl_2 , qui contient 45,4 % de Co, ou sous forme hexahydratée $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, qui contient 24,8 % de Co, soit presque moitié moins. L'éventail des teneurs des oxydes et hydroxydes est moins large : l'hydroxyde de cobalt $\text{Co}(\text{OH})_2$ contient 63,4 % Co, l'oxyde Co_3O_4 contient 73,4 % Co, et l'oxyde CoO contient 78,6 % Co.

- 75011000 - mattes de nickel

Or, ces mattes contiennent au moins la quantité de cobalt qui en est extraite à Sandouville, soit 300 à 350 t de cobalt contenu par an (cf. tab. 20).

Enfin du cobalt peut être contenu dans les carbures de tungstène importés, selon qu'ils sont importés sous forme de carbure de tungstène pur ou déjà cémenté : les carbures de tungstène cémentés contiennent de 3 à 15 % de cobalt (cf. 3.1.4).

- 28499030 - Carbures de tungstène, de constitution chimique définie ou non (suite)

Et presque tous les outils de coupe importés qui contiendraient des carbures cémentés contiennent aussi du cobalt

Il est à noter par ailleurs que les chiffres du kiosque excluent le cobalt entrant dans le matériel militaire.

Le tableau 30 rassemble les échanges correspondant aux six premières nomenclatures, avec leur cumul en bas de tableau.

Le tableau 31 présente, pour mémoire, les nomenclatures 28332930 et 28342920, tout en sachant qu'elles peuvent ne pas correspondre à du cobalt et sont donc ininterprétables dans le cadre de cette étude.

Le tableau 32 présente les échanges de matre de nickel, avec mention ajoutée du cobalt qui en a été extrait, et le tableau 33, à titre indicatif, les échanges de carbure de tungstène, qui peuvent ou non contenir du cobalt (voir plus haut).

La grande majorité des postes sont déficitaires, du moins en valeur, et le cumul des six premières nomenclatures correspondant clairement à du cobalt représente des déficits du commerce extérieur en valeur de 38,0 M€ en 2010, 50,3 M€ en 2011, 38,3 M€ en 2012, et 26,5 M€ en 2013 (bas du tableau 29), et ce même en ne tenant pas compte du cobalt importé à l'intérieur des mattes de nickel néocalédoniennes.

Le seul poste excédentaire en tonnage comme en valeur, pour l'année 2013 (après avoir été déficitaire en 2012), est celui des déchets et débris de cobalt. Ce qui n'est pas un bon indicateur pour l'industrie et l'économie française, puisque cela signifie que même les déchets (ou du moins une part significative d'entre eux) ne sont plus valorisés en France.

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.									
26050000 - Minerais de cobalt et leurs concentrés												
Exportations FAB												
Maroc				36 k€	12 t							
Belgique	45 k€	16 t	2.81 €/kg									
Cameroun	5 k€	1 t										
Côte d'Ivoire												
Russie										32 k€	1 t	
Israël										27 k€	1 t	
Turquie										13 k€	0 t	
Australie										2 k€	0 t	
Autres pays												
TOTAL	50 k€	17 t		36 k€	12 t		0 k€	0 t		74 k€	2 t	
Importations CAF												
Autriche				38 k€	2 t							
Turquie				48 k€	11 t	4.36 €/kg	26 k€	5 t	5.20 €/kg			
Allemagne	19 k€	0 t		16 k€	0 t		14 k€	0 t		30 k€	1 t	
Pays-Bas				7 k€	1 t		0 k€	0 t				
Royaume-Uni				7 k€	7 t		26 k€	4 t		52 k€	9 t	5.78 €/kg
Japon										117 k€	5 t	23.40 €/kg
Chine										85 k€	4 t	21.25 €/kg
Etats-Unis												
TOTAL	19 k€	0 t		116 k€	21 t		66 k€	9 t		284 k€	19 t	
Excédent/Déficit	31 k€	17 t		-80 k€	-9 t		-66 k€	-9 t		-210 k€	-17 t	
28220000 - Oxydes et hydroxydes de cobalt; oxydes de cobalt du commerce												
Exportations FAB												
Belgique	11 k€	0 t		14 k€	0 t		16 k€	0 t		20 k€	0 t	
Allemagne	27 k€	1 t		10 k€	0 t		13 k€	0 t		19 k€	0 t	
Suède				9 k€	0 t		3 k€	0 t				
Espagne				8 k€	0 t							
Portugal	25 k€	1 t		8 k€	0 t		8 k€	0 t		1 k€	0 t	
Cameroun	3 k€	1 t		7 k€	0 t		7 k€	1 t		4 k€	0 t	
Algérie				3 k€	1 t							
Angola				3 k€	0 t							
Japon				2 k€	0 t		3 k€	0 t				
Italie	5 k€	0 t		1 k€	0 t		2 k€	0 t		8 k€	0 t	
Royaume-Uni	6 k€	0 t		1 k€	0 t							
Brésil												
Chine							4 k€	0 t				
Honduras	5 k€	1 t										
Suisse												
Tunisie	4 k€	0 t										
Qatar							20 k€	0 t				
Etats-Unis							13 k€	1 t				
Croatie							5 k€	0 t				
Tchéquie				1 k€	0 t		4 k€	0 t		11 k€	1 t	
Iran										20 k€	0 t	
Inde										11 k€	0 t	
Turquie										11 k€	0 t	
Pologne										5 k€	0 t	
Slovénie										4 k€	0 t	
Autres pays				2 k€	0 t		1 k€	0 t		2 k€	0 t	
TOTAL	86 k€	4 t		69 k€	1 t		99 k€	2 t		116 k€	1 t	
Importations CAF												
Royaume-Uni	7 832 k€	381 t	20.56 €/kg	8 084 k€	454 t	17.81 €/kg	5 762 k€	326 t	17.67 €/kg	5 494 k€	402 t	13.67 €/kg
Japon	265 k€	7 t	37.86 €/kg	3 311 k€	72 t	45.99 €/kg	726 k€	18 t	40.33 €/kg	1 215 k€	36 t	33.75 €/kg
Belgique	3 719 k€	155 t	23.99 €/kg	3 281 k€	153 t	21.44 €/kg	2 846 k€	147 t	19.36 €/kg	2 236 k€	103 t	21.71 €/kg
Finlande	1 433 k€	58 t	24.71 €/kg	2 297 k€	101 t	22.74 €/kg	1 304 k€	67 t	19.46 €/kg	1 287 k€	81 t	15.89 €/kg
Allemagne	232 k€	5 t	46.40 €/kg	861 k€	9 t	95.67 €/kg	324 k€	27 t	12.00 €/kg	161 k€	4 t	40.25 €/kg
Retour France	552 k€	21 t	26.29 €/kg	529 k€	25 t	21.16 €/kg						
Autres pays	191 k€	7 t	27.29 €/kg	222 k€	27 t	8.22 €/kg	493 k€	25 t	19.72 €/kg	264 k€	14 t	18.86 €/kg
TOTAL	14 224 k€	634 t		18 585 k€	841 t		11 455 k€	610 t		10 657 k€	640 t	
Déficit	-14 138 k€	-630 t		-18 516 k€	-840 t		-11 356 k€	-608 t		-10 541 k€	-639 t	

Tableau 30 - Statistiques françaises d'import-export de produits bruts et intermédiaires de cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire. Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>.

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
28273930 - Chlorure de cobalt												
Exportations FAB												
Etats-Unis	278 k€	75 t	3.71 €/kg	269 k€	69 t	3.90 €/kg	731 k€	206 t	3.55 €/kg	615 k€	214 t	2.87 €/kg
Belgique	37 k€	2 t		56 k€	3 t		42 k€	2 t		149 k€	50 t	2.98 €/kg
Allemagne	31 k€	3 t		15 k€	1 t		30 k€	4 t		45 k€	6 t	
Hongrie				8 k€	1 t		22 k€	3 t				
Espagne	78 k€	14 t	5.57 €/kg	6 k€	0 t							
Pologne	31 k€	5 t	6.20 €/kg									
Italie							3 k€	0 t		20 k€	2 t	
Autres pays	22 k€	0 t		4 k€	1 t		14 k€	1 t		28 k€	2 t	
TOTAL	477 k€	99 t		358 k€	75 t		842 k€	216 t		857 k€	274 t	
Importations CAF												
Belgique	513 k€	15 t	34.20 €/kg	2 687 k€	88 t	30.53 €/kg	1 712 k€	64 t	26.75 €/kg	1 168 k€	52 t	22.46 €/kg
Royaume-Uni	2 594 k€	104 t	24.94 €/kg	973 k€	71 t	13.70 €/kg	391 k€	37 t	10.57 €/kg	314 k€	15 t	20.93 €/kg
Chine							62 k€	10 t	6.20 €/kg	86 k€	15 t	5.73 €/kg
Autres pays	93 k€	10 t		97 k€	16 t	6.06 €/kg	25 k€	0 t		11 k€	0 t	
TOTAL	3 200 k€	129 t		3 757 k€	175 t		2 190 k€	111 t		1 579 k€	82 t	
Excédent/Déficit	-2 723 k€	-30 t		-3 399 k€	-100 t		-1 348 k€	105 t		-722 k€	192 t	
81052000 - Mattes de cobalt, autres produits intermédiaires de la métallurgie du cobalt; cobalt sous forme brute; poudres de cobalt												
Exportations FAB												
Allemagne	4 974 k€	131 t	37.97 €/kg	4 956 k€	190 t	26.08 €/kg	2 583 k€	95 t	27.19 €/kg	4 597 k€	181 t	25.40 €/kg
Luxembourg	1 901 k€	102 t	18.64 €/kg	2 384 k€	66 t	36.12 €/kg	1 470 k€	51 t	28.82 €/kg	1 590 k€	55 t	28.91 €/kg
Japon	1 445 k€	29 t	49.83 €/kg	2 150 k€	52 t	41.35 €/kg	1 404 k€	36 t	39.00 €/kg	748 k€	23 t	32.52 €/kg
Italie	1 800 k€	42 t	42.86 €/kg	1 373 k€	30 t	45.77 €/kg	1 393 k€	34 t	40.97 €/kg	1 283 k€	33 t	38.88 €/kg
Etats-Unis	1 035 k€	25 t	41.40 €/kg	1 203 k€	50 t	24.06 €/kg	2 014 k€	70 t	28.77 €/kg	1 401 k€	78 t	17.96 €/kg
Chine	345 k€	8 t	43.13 €/kg	798 k€	23 t	34.70 €/kg	526 k€	14 t	37.57 €/kg	532 k€	16 t	33.25 €/kg
Turquie	641 k€	14 t	45.79 €/kg	781 k€	19 t	41.11 €/kg	820 k€	28 t	29.29 €/kg	812 k€	32 t	25.38 €/kg
Inde	672 k€	16 t	42.00 €/kg	383 k€	10 t	38.30 €/kg	710 k€	19 t	37.37 €/kg	1 007 k€	33 t	30.52 €/kg
Pologne	268 k€	10 t	26.80 €/kg	367 k€	11 t	33.36 €/kg	150 k€	3 t		120 k€	3 t	40.00 €/kg
Espagne	318 k€	6 t	53.00 €/kg	320 k€	7 t	45.71 €/kg	197 k€	5 t		153 k€	4 t	38.25 €/kg
Finlande	94 k€	7 t		227 k€	12 t	18.92 €/kg	173 k€	12 t	14.42 €/kg			
Suisse	46 k€	1 t		189 k€	5 t		66 k€	2 t		297 k€	4 t	74.25 €/kg
Corée du Sud	298 k€	7 t		179 k€	4 t		393 k€	10 t	39.30 €/kg	348 k€	10 t	34.80 €/kg
Royaume-Uni	214 k€	8 t		171 k€	6 t		217 k€	6 t		82 k€	3 t	27.33 €/kg
Slovaquie	77 k€	2 t		148 k€	6 t		176 k€	8 t		121 k€	6 t	20.17 €/kg
Autriche	193 k€	4 t		144 k€	3 t		95 k€	3 t				
Portugal	139 k€	3 t		132 k€	6 t		190 k€	5 t		172 k€	5 t	34.40 €/kg
Belgique	235 k€	39 t	6.03 €/kg	130 k€	29 t	4.48 €/kg	140 k€	5 t		269 k€	12 t	22.42 €/kg
Liban	50 k€	1 t		77 k€	2 t		258 k€	7 t		186 k€	5 t	37.20 €/kg
Iran	0 k€	0 t		62 k€	2 t							
Brsil	96 k€	3 t		22 k€	1 t							
Suède				14 k€	0 t		160 k€	6 t		47 k€	3 t	15.67 €/kg
Hong-Kong				58 k€	1 t		100 k€	2 t		112 k€	28 t	4.00 €/kg
Russie										104 k€	3 t	34.67 €/kg
Autres pays	468 k€	11 t		408 k€	7 t		433 k€	7 t		404 k€	10 t	40.40 €/kg
TOTAL	15 309 k€	469 t		16 676 k€	542 t		13 668 k€	428 t		14 385 k€	547 t	
Importations CAF												
Etats-Unis	10 074 k€	420 t	23.99 €/kg	11 708 k€	476 t	24.60 €/kg	7 031 k€	337 t	20.86 €/kg	8 989 k€	407 t	22.09 €/kg
Allemagne	1 203 k€	117 t	10.28 €/kg	2 197 k€	180 t	12.21 €/kg	1 657 k€	139 t	11.92 €/kg	1 377 k€	96 t	14.34 €/kg
Canada	1 081 k€	27 t	40.04 €/kg	1 927 k€	62 t	31.08 €/kg	1 643 k€	58 t	28.33 €/kg	739 k€	24 t	30.79 €/kg
Rep. Congo	139 k€	5 t	27.80 €/kg	1 218 k€	62 t	19.65 €/kg	1 079 k€	63 t	17.13 €/kg	1 241 k€	87 t	14.26 €/kg
Australie	928 k€	31 t	29.94 €/kg	1 604 k€	58 t	27.66 €/kg	192 k€	9 t	21.33 €/kg	1 783 k€	87 t	20.49 €/kg
Royaume-Uni	1 754 k€	60 t	29.23 €/kg	1 463 k€	59 t	24.80 €/kg	905 k€	56 t	16.16 €/kg	364 k€	39 t	9.33 €/kg
Norvège	1 811 k€	50 t	36.22 €/kg	1 421 k€	46 t	30.89 €/kg	1 363 k€	65 t	20.97 €/kg	2 685 k€	138 t	19.46 €/kg
Finlande	992 k€	24 t	41.33 €/kg	1 351 k€	35 t	38.60 €/kg	865 k€	19 t	45.53 €/kg	756 k€	20 t	37.80 €/kg
Zambie	31 k€	1 t		569 k€	26 t	21.88 €/kg	1 249 k€	54 t	23.13 €/kg			
Russie	730 k€	23 t	31.74 €/kg	559 k€	19 t	29.42 €/kg						
Brsil	294 k€	9 t		401 k€	14 t	28.64 €/kg	931 k€	40 t	23.28 €/kg	109 k€	8 t	13.63 €/kg
Chine	136 k€	4 t		296 k€	10 t	29.60 €/kg	23 k€	1 t		258 k€	9 t	28.67 €/kg
Irlande	222 k€	4 t		99 k€	1 t							
Italie	141 k€	4 t		84 k€	3 t							
Suède	216 k€	5 t		58 k€	2 t		235 k€	9 t	26.11 €/kg	72 k€	5 t	
Belgique	143 k€	4 t		43 k€	1 t		454 k€	20 t	22.70 €/kg	962 k€	65 t	14.80 €/kg
Pays-Bas	330 k€	11 t					135 k€	8 t	16.88 €/kg	213 k€	9 t	23.67 €/kg
Suisse				116 k€	16 t	7.25 €/kg	291 k€	26 t	11.19 €/kg	24 k€	0 t	
Autres pays	217 k€	8 t		333 k€	13 t	25.62 €/kg	405 k€	27 t	15.00 €/kg	528 k€	19 t	27.79 €/kg
TOTAL	20 442 k€	807 t		25 447 k€	1 083 t		18 458 k€	931 t		20 100 k€	1 013 t	
Déficit	-5 133 k€	-338 t		-8 771 k€	-541 t		-4 790 k€	-503 t		-5 715 k€	-466 t	

Tableau 30 (suite) - Statistiques françaises d'import-export de produits bruts et intermédiaires de cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire.

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
81053000 - Déchets et débris de cobalt												
Exportations FAB												
Etats-Unis	1 566 k€	172 t	9.10 €/kg	1 774 k€	198 t	8.96 €/kg	1 644 k€	235 t	7.00 €/kg	1 202 k€	256 t	4.70 €/kg
Suède				364 k€	33 t	11.03 €/kg	114 k€	7 t	16.29 €/kg	102 k€	7 t	14.57 €/kg
Canada				209 k€	21 t	9.95 €/kg	451 k€	52 t	8.67 €/kg	249 k€	35 t	7.11 €/kg
Royaume-Uni	336 k€	30 t	11.20 €/kg	167 k€	15 t	11.13 €/kg	465 k€	65 t	7.15 €/kg	645 k€	54 t	11.94 €/kg
Italie	3 k€	0 t		113 k€	4 t							
Allemagne	2 k€	0 t		38 k€	5 t		153 k€	25 t	6.12 €/kg	365 k€	63 t	5.79 €/kg
Autres pays	14 k€	3 t		69 k€	38 t	1.82 €/kg	49 k€	31 t	1.58 €/kg	43 k€	37 t	1.16 €/kg
TOTAL	1 921 k€	205 t		2 734 k€	314 t		2 876 k€	415 t		2 606 k€	452 t	
Importations CAF												
Royaume-Uni	700 k€	31 t	22.58 €/kg	3 767 k€	166 t	22.69 €/kg	6 729 k€	350 t	19.23 €/kg	1 138 k€	97 t	11.73 €/kg
Etats-Unis	113 k€	9 t	12.56 €/kg	837 k€	62 t	13.50 €/kg	892 k€	74 t	12.05 €/kg	120 k€	10 t	12.00 €/kg
Canada	536 k€	20 t	26.80 €/kg	551 k€	20 t	27.55 €/kg						
Allemagne	237 k€	65 t	3.65 €/kg	324 k€	20 t	16.20 €/kg	363 k€	47 t	7.72 €/kg	43 k€	4 t	
Suisse	256 k€	18 t	14.22 €/kg	86 k€	5 t					157 k€	8 t	
Pays-Bas	193 k€	12 t	16.08 €/kg	13 k€	0 t							
Bahamas	126 k€	5 t	25.20 €/kg									
Belgique	805 k€	51 t	15.78 €/kg							487 k€	24 t	20.29 €/kg
Suède	8 k€	4 t					117 k€	43 t	2.72 €/kg	129 k€	42 t	3.07 €/kg
Autres pays	14 k€	2 t		121 k€	6 t		4 k€	1 t		7 k€	0 t	
TOTAL	2 988 k€	217 t		5 699 k€	279 t		8 105 k€	515 t		2 081 k€	185 t	
Excédent/Déficit	-1 067 k€	-12 t		-2 965 k€	35 t		-5 229 k€	-100 t		525 k€	267 t	
81059000 - Ouvrages en cobalt, n.d.a.												
Exportations FAB												
Allemagne	757 k€	7 t	108.14 €/kg	1 656 k€	32 t	51.75 €/kg	2 028 k€	35 t	57.94 €/kg	2 304 k€	42 t	54.86 €/kg
Suisse	863 k€	11 t	78.45 €/kg	879 k€	19 t	46.26 €/kg	853 k€	10 t	85.30 €/kg	609 k€	8 t	76.13 €/kg
Royaume-Uni	358 k€	50 t	7.16 €/kg	671 k€	111 t	6.05 €/kg	996 k€	115 t	8.66 €/kg	743 k€	88 t	8.44 €/kg
Chine	980 k€	2 t	490.00 €/kg	569 k€	3 t	189.67 €/kg	1 005 k€	3 t	335.00 €/kg	971 k€	3 t	323.67 €/kg
Italie	367 k€	5 t	73.40 €/kg	563 k€	9 t	62.56 €/kg	956 k€	13 t	73.54 €/kg	1 052 k€	16 t	65.75 €/kg
Inde	2 813 k€	15 t	187.53 €/kg	460 k€	3 t	153.33 €/kg	602 k€	6 t	100.33 €/kg	628 k€	2 t	314.00 €/kg
Etats-Unis	85 k€	0 t		395 k€	23 t	17.17 €/kg	1 033 k€	22 t	46.95 €/kg	962 k€	20 t	48.10 €/kg
Belgique	186 k€	2 t		338 k€	2 t		130 k€	2 t		100 k€	1 t	
Japon	238 k€	0 t		193 k€	0 t		218 k€	0 t		180 k€	0 t	
Tchéquie	126 k€	3 t		174 k€	4 t		178 k€	3 t		237 k€	6 t	
Espagne	45 k€	1 t		160 k€	3 t		70 k€	1 t		118 k€	3 t	
Turquie	108 k€	3 t		153 k€	3 t		203 k€	4 t		366 k€	7 t	
Nouvelle-Zélande	8 k€	0 t		126 k€	1 t		122 k€	1 t		27 k€	0 t	
Luxembourg	78 k€	2 t		99 k€	2 t		47 k€	1 t		107 k€	2 t	
Roumanie	21 k€	1 t		98 k€	3 t		76 k€	2 t		91 k€	2 t	
Autriche	39 k€	0 t		93 k€	1 t		67 k€	1 t		142 k€	5 t	
Pologne	50 k€	1 t		90 k€	1 t		89 k€	1 t		117 k€	2 t	
Brésil	72 k€	1 t		73 k€	0 t		69 k€	0 t		4 k€	0 t	
Russie	58 k€	1 t		53 k€	1 t		60 k€	1 t				
Pays-Bas	39 k€	1 t		46 k€	1 t		295 k€	10 t		52 k€	1 t	
Hongrie	15 k€	0 t		24 k€	0 t		71 k€	0 t		106 k€	1 t	
R.D. Congo	101 k€	1 t		17 k€	0 t							
Autres pays	337 k€	3 t		296 k€	3 t		563 k€	21 t		527 k€	7 t	
TOTAL	7 744 k€	110 t		7 226 k€	225 t		9 731 k€	252 t		9 443 k€	216 t	
Importations CAF												
Etats-Unis	5 387 k€	95 t	56.71 €/kg	6 687 k€	87 t		9 314 k€	119 t	78.27 €/kg	7 025 k€	111 t	63.29 €/kg
Allemagne	3 524 k€	75 t	46.99 €/kg	4 104 k€	69 t	59.48 €/kg	2 667 k€	48 t	55.56 €/kg	2 426 k€	37 t	65.57 €/kg
Russie	2 529 k€	173 t	14.62 €/kg	3 144 k€	549 t	5.73 €/kg	2 555 k€	117 t	21.84 €/kg			
Royaume-Uni	5 604 k€	187 t	29.97 €/kg	3 000 k€	89 t	33.71 €/kg	5 129 k€	118 t	43.47 €/kg	3 880 k€	96 t	40.42 €/kg
Norvège	1 820 k€	60 t	30.33 €/kg	1 990 k€	72 t	27.64 €/kg	2 510 k€	109 t	23.03 €/kg	18 k€	1 t	
Brésil	90 k€	3 t		1 466 k€	52 t	28.19 €/kg	125 k€	5 t				
Suisse	1 008 k€	3 t		1 090 k€	5 t	218.00 €/kg	866 k€	4 t		1 168 k€	3 t	
Canada	394 k€	5 t		1 045 k€	26 t	40.19 €/kg	855 k€	21 t	40.71 €/kg	858 k€	30 t	28.60 €/kg
Australie	961 k€	28 t	34.32 €/kg	385 k€	14 t							
Retour France	116 k€	1 t		167 k€	3 t							
Italie	277 k€	3 t		129 k€	3 t		31 k€	1 t		237 k€	5 t	
Autriche	252 k€	4 t		54 k€	1 t							
Belgique				213 k€	4 t		484 k€	6 t		696 k€	5 t	
Pays-Bas							111 k€	3 t		1 832 k€	3 t	
Zambie										492 k€	24 t	20.50 €/kg
Autres pays	754 k€	17 t	44.35 €/kg	288 k€	7 t		634 k€	15 t	42.27 €/kg	685 k€	20 t	34.25 €/kg
TOTAL	22 716 k€	654 t		23 762 k€	981 t		25 281 k€	566 t		19 317 k€	335 t	
Déficit	-14 972 k€	-544 t		-16 536 k€	-756 t		-15 550 k€	-314 t		-9 874 k€	-119 t	
Cumul des produits bruts et intermédiaires de cobalt (concentrés, poudres, composés, déchets, ouvrages)												
Déficit	-38 002 k€	-1 537 t		-50 267 k€	-2 211 t		-38 339 k€	-1 429 t		-26 537 k€	-782 t	

Tableau 30 (suite) - Statistiques françaises d'import-export de produits bruts et intermédiaires de cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire.

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
28332930 - Sulfates de cobalt et de titane												
Exportations FAB												
Brésil				73 k€	3 t							
Allemagne	171 k€	2 140 t		69 k€	52 t		119 k€	83 t		117 k€	75 t	
Belgique	22 k€	2 t		59 k€	7 t		45 k€	66 t		11 k€	0 t	
Espagne	9 k€	1 t		16 k€	2 t		112 k€	20 t		366 k€	63 t	
Turquie	30 k€	4 t		16 k€	2 t		31 k€	4 t		35 k€	5 t	
Italie	27 k€	4 t		14 k€	2 t		24 k€	3 t		17 k€	3 t	
Autriche				10 k€	0 t							
Pays-Bas				9 k€	1 t		10 k€	2 t		19 k€	4 t	
Suisse	2 k€	1 t		1 k€	0 t		4 k€	2 t		12 k€	3 t	
Egypte	8 k€	0 t										
Hongrie							8 k€	3 t		12 k€	5 t	
Luxembourg										16 k€	24 t	
Norvège										12 k€	2 t	
Autres pays	4 k€	0 t		8 k€	0 t		13 k€	0 t		10 k€	0 t	
TOTAL	273 k€	2 152 t		275 k€	69 t		366 k€	183 t		627 k€	184 t	
Importations CAF												
Finlande	150 k€	20 t		140 k€	21 t		227 k€	42 t		397 k€	69 t	
Japon	120 k€	30 t		90 k€	20 t		202 k€	30 t		151 k€	30 t	
Allemagne	53 k€	44 t		59 k€	21 t		55 k€	41 t		49 k€	20 t	
Royaume-Uni	15 k€	4 t		33 k€	8 t		3 k€	0 t				
Espagne										26 k€	28 t	
Belgique	8 k€	1 t		11 k€	0 t		1 k€	0 t				
Italie	7 k€	1 t		11 k€	1 t		3 k€	0 t				
Chine	66 k€	10 t										
Autres pays	6 k€	1 t		9 k€	0 t		3 k€	0 t		16 k€	1 t	
TOTAL	425 k€	111 t		353 k€	71 t		494 k€	113 t		639 k€	148 t	
Excédent/Déficit	-152 k€	2 041 t		-78 k€	-2 t		-128 k€	70 t		-12 k€	36 t	
28342920 - Nitrates de baryum, de béryllium, de cadmium, de cobalt, de nickel, de plomb												
Exportations FAB												
Allemagne	108 k€	40 t		544 k€	213 t		729 k€	352 t		437 k€	320 t	
Belgique	1 150 k€	267 t		315 k€	119 t		49 k€	6 t		100 k€	10 t	
Italie	248 k€	43 t		281 k€	51 t		298 k€	56 t		237 k€	41 t	
Espagne	403 k€	80 t		272 k€	79 t		310 k€	94 t		135 k€	46 t	
Danemark	978 k€	290 t		266 k€	69 t		93 k€	25 t		87 k€	25 t	
Royaume-Uni	121 k€	17 t		37 k€	15 t		46 k€	5 t		13 k€	3 t	
Autriche				31 k€	6 t							
Afrique du Sud	2 k€	0 t		8 k€	1 t		16 k€	2 t		29 k€	6 t	
Pays-Bas	199 k€	20 t		2 k€	1 t							
Egypte												
Liban	8 k€	1 t										
Côte d'Ivoire							32 k€	2 t				
Autres pays	9 k€	7 t		23 k€	7 t		49 k€	11 t		35 k€	5 t	
TOTAL	3 226 k€	765 t		1 779 k€	561 t		1 622 k€	553 t		1 073 k€	456 t	
Importations CAF												
Belgique	2 626 k€	1 116 t		1 628 k€	502 t		2 149 k€	924 t		1 455 k€	760 t	
Allemagne	582 k€	222 t		1 062 k€	383 t		567 k€	233 t		229 k€	101 t	
Royaume-Uni	757 k€	188 t		783 k€	117 t		319 k€	91 t		92 k€	30 t	
Chine	3 k€	4 t		517 k€	300 t		939 k€	870 t		971 k€	856 t	
Italie	48 k€	11 t		40 k€	10 t							
Australie							337 k€	597 t				
Autres pays	85 k€	80 t		49 k€	98 t		66 k€	12 t		133 k€	42 t	
TOTAL	4 101 k€	1 621 t		4 079 k€	1 410 t		4 377 k€	2 727 t		2 880 k€	1 789 t	
Déficit	-875 k€	-856 t		-2 300 k€	-849 t		-2 755 k€	-2 174 t		-1 807 k€	-1 333 t	

Tableau 31 - Statistiques françaises d'import-export de certains composés pouvant contenir (ou non) du cobalt. Données CAF-FAB hors matériel militaire.

Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>.

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
75011000 - Mattes de nickel												
Exportations FAB												
Mexique										1 k€	0 t	
Maroc							34 k€	2 t				
TOTAL							34 k€	2 t		1 k€	0 t	
Importations CAF												
Nouvelle-Calédonie							165 673 k€	19 391 t	8.54 €/kg	139 029 k€	19 050 t	7.30 €/kg
Autres pays							33 k€	2 t		21 k€	0 t	
TOTAL BRUT							165 706 k€	19 393 t		139 050 k€	19 050 t	
Cobalt contenu récupéré		302 t			354 t			326 t			350 t	

Tableau 32 - Statistiques françaises d'import-export de mattes de nickel cobaltifères.

Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

	2010			2011			2012			2013		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
28499030 - Carbures de tungstène, de constitution chimique définie ou non												
Exportations FAB												
Royaume-Uni	1 738 k€	60 t	28.97 €/kg	3 049 k€	73 t	41.77 €/kg	2 132 k€	44 t	48.45 €/kg	1 531 k€	36 t	42.53 €/kg
Allemagne	3 434 k€	132 t	26.02 €/kg	2 859 k€	76 t	37.62 €/kg	3 115 k€	79 t	39.43 €/kg	5 091 k€	126 t	40.40 €/kg
Italie	1 372 k€	45 t	30.49 €/kg	2 702 k€	55 t	49.13 €/kg	1 987 k€	39 t	50.95 €/kg	1 574 k€	32 t	49.19 €/kg
Japon	398 k€	16 t	24.88 €/kg	651 k€	13 t	50.08 €/kg	976 k€	22 t	44.36 €/kg	712 k€	17 t	41.88 €/kg
Belgique	197 k€	5 t	39.40 €/kg	447 k€	10 t	44.70 €/kg	542 k€	9 t	60.22 €/kg	586 k€	11 t	53.27 €/kg
Autriche	1 k€	0 t		329 k€	12 t	27.42 €/kg	2 484 k€	92 t	27.00 €/kg			
Etats-Unis	271 k€	5 t		265 k€	4 t		750 k€	9 t	83.33 €/kg	1 017 k€	12 t	84.75 €/kg
Suisse	16 k€	1 t		238 k€	5 t		969 k€	20 t	48.45 €/kg	631 k€	14 t	45.07 €/kg
Brésil	105 k€	1 t		221 k€	5 t		289 k€	6 t	48.17 €/kg	424 k€	9 t	47.11 €/kg
Espagne	222 k€	6 t		175 k€	3 t		137 k€	10 t	13.70 €/kg	101 k€	12 t	8.42 €/kg
Corée du Sud	45 k€	1 t		130 k€	2 t		51 k€	1 t		143 k€	3 t	
Canada	48 k€	1 t		87 k€	1 t							
Portugal	25 k€	1 t		85 k€	1 t							
Suède	22 k€	0 t		81 k€	4 t		300 k€	12 t		10 k€	0 t	
Turquie	117 k€	5 t		35 k€	1 t							
Finlande	77 k€	2 t		4 k€	0 t							
Chine							217 k€	1 t		122 k€	1 t	
Algérie										287 k€	3 t	
Autres pays	270 k€	4 t		393 k€	4 t		599 k€	10 t	59.90 €/kg	564 k€	9 t	62.67 €/kg
TOTAL	8 358 k€	285 t	29.33 €/kg	11 751 k€	269 t	43.68 €/kg	14 548 k€	354 t		12 793 k€	285 t	
Importations CAF												
Autriche	1 030 k€	41 t	25.12 €/kg	6 662 k€	135 t	49.35 €/kg	12 794 k€	268 t	47.74 €/kg	11 718 k€	286 t	40.97 €/kg
Allemagne	3 107 k€	69 t	45.03 €/kg	5 729 k€	96 t	59.68 €/kg	5 046 k€	87 t	58.00 €/kg	5 253 k€	101 t	52.01 €/kg
Chine	3 786 k€	170 t	22.27 €/kg	5 020 k€	155 t	32.39 €/kg	4 840 k€	125 t	38.72 €/kg	3 379 k€	100 t	33.79 €/kg
Etats-Unis	2 474 k€	65 t	38.06 €/kg	3 726 k€	79 t	47.16 €/kg						
Tchéquie	159 k€	5 t	31.80 €/kg	1 898 k€	38 t	49.95 €/kg	2 235 k€	49 t	45.61 €/kg	2 145 k€	53 t	40.47 €/kg
Suède	191 k€	3 t	63.67 €/kg	934 k€	35 t	26.69 €/kg						
Royaume-Uni	19 k€	1 t		466 k€	20 t	23.30 €/kg						
Canada										637 k€	16 t	39.81 €/kg
Retour France							287 k€	5 t		20 k€	1 t	
Autres pays	193 k€	4 t	48.25 €/kg	947 k€	21 t	45.10 €/kg	1 031 k€	18 t	57.28 €/kg	1 015 k€	16 t	63.44 €/kg
TOTAL	10 959 k€	358 t	30.61 €/kg	25 382 k€	579 t	43.84 €/kg	26 233 k€	552 t		24 167 k€	573 t	
Déficit	-2 601 k€	-73 t		-13 631 k€	-310 t		-11 685 k€	-198 t		-11 374 k€	-288 t	

Tableau 33 - Statistiques françaises d'import-export de mattes de carbure de tungstène.

Source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

8. Criticité

La criticité du cobalt est résumée comme suit (fig.45) :

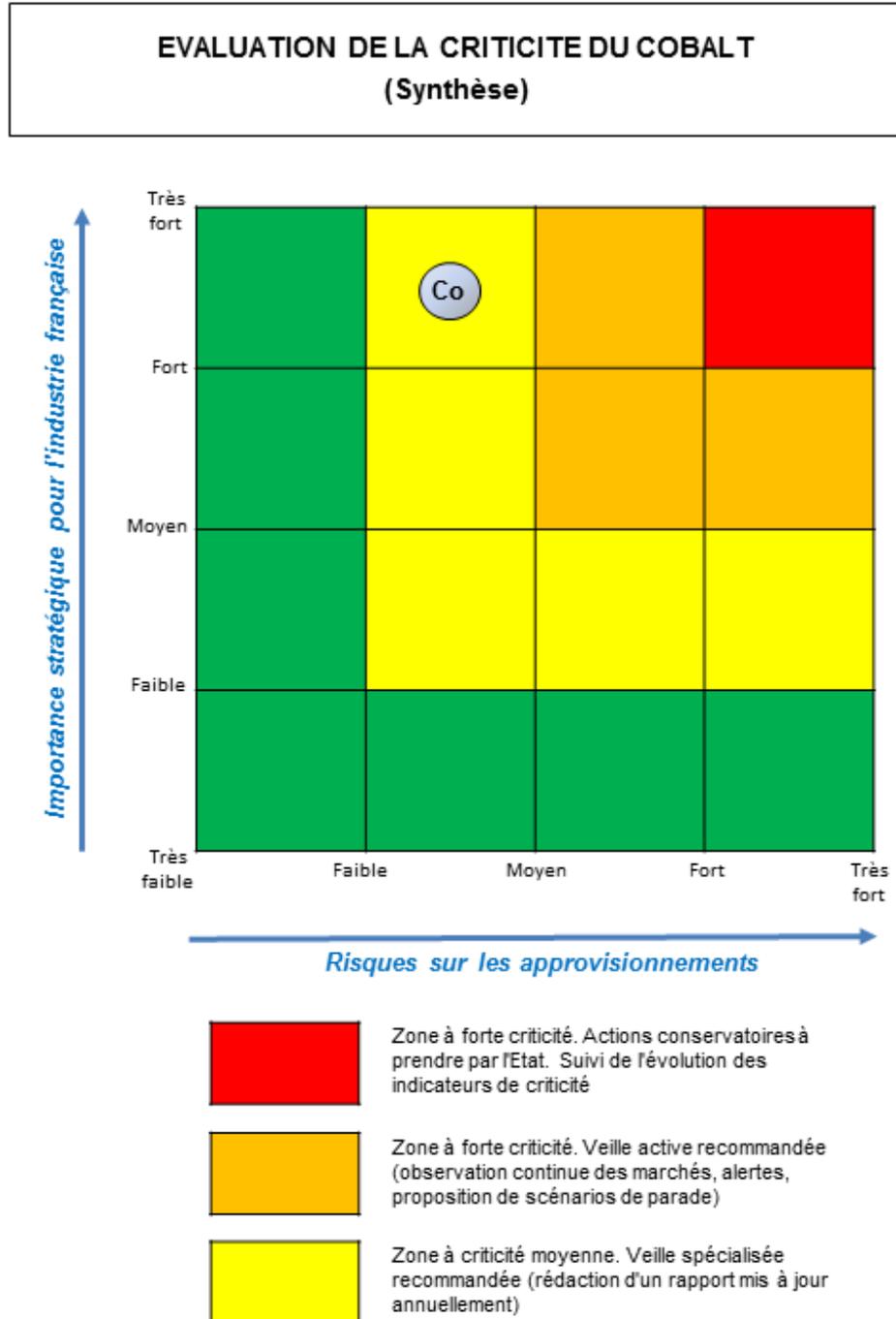


Figure 45 - Synthèse de la criticité du cobalt.

Bibliographie

Ad-hoc Working Group (European Commission, 2010) - Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 53 p. et 5 ann.

Adam C., Garnier-Laplace J., Roussel-Debet S. (IRSN, 2010) - Fiche Radionucléide. Cobalt 60 et environnement. 33 p. www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/environnement/Documents/Co60%20-%20v2010_complet.pdf.

Angerer G., Erdmann L. et al. (2009) - Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung / Institut für Zukunfts studien und Technologiebewertung, 83 p.

Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'Environnement et du travail (ANSES, 2012) - Table de composition nutritionnelle Ciqual 2012 : vitamine B12, disponible en ligne : www.afssa.fr/TableCIQUAL/index.htm.

Audion A.S., Labbé J.F. (2012) - Panorama mondial 2011 du marché du tungstène. BRGM/RP-60461-FR, 109 p., 29 fig., 17 tabl.

Barthélémy F., Boisson P., Christmann P., Gentilhomme P., Labbé J.F., Laval M., Martel-Jantin B. (2009) - Ressources minérales et développement en Afrique, opportunités pour neuf substances. Rapport final. BRGM/RP-57821-FR. 259 p., 49 fig., 49 tabl.

Bisson M., Gay G., Houeix N., Lacroix G., Lefevre J.P., Magaud H., Migne V., Morin A., Tissot S. (INERIS, 2006) - Cobalt et ses dérivés, fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, avril 2006, 55 p., disponible en ligne : www.ineris.fr/substances/fr/.

Bedder J. (Roskill, 2013) - Cobalt production in the DRC. Major changes, minor implications? Présentation 31 p., 23 mai 2013, disponible en ligne : www.roskill.com/reports/minor-and-light-metals/news/.

Boland M.A., Kropschot S.J. (USGS, 2011) - Cobalt, for strength and color. Cobalt fact sheet 2011, 2 p., disponible en ligne : <http://minerals.usgs.gov>.

British Geological Survey (2009) - Mineral profile: Cobalt, 18 p. www.mineralsuk.com.

British Geological Survey (2012) - Risk list 2012, 12 p. www.mineralsuk.com.

British Geological Survey (2013) - European mineral production 2007-2011., 12 p. www.mineralsuk.com.

British Geological Survey (2013) - World mineral production 2007-2011., 12 p.
www.mineralsuk.com.

Buchert M., Schüler D., Bleher D. (Öko-Institut eV for UNEP, 2009) - Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential, United Nations Environment Programme, juillet 2009, 112 p.

Caron P., Lavigne O. (2011) - Recent Studies at Onera on Superalloys for Single Crystal Turbine Blades, in Aerospace Lab, The Onera Journal, Issue 3, novembre 2011, disponible en ligne: <http://publications.onera.fr/>.

Centre International pour la Recherche sur le Cancer (2013) - Monographies du CIRC sur l'évaluation des risques de cancérogénicité pour l'homme, mises à jour le 16 juillet 2013. <http://monographs.iarc.fr/FR/Classification/index.php>.

Chemical business newbase (2009) - New round of price slashing in vitamin B12 sector, 26 janvier 2009, www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-36658634_ITM.

Cobalt Development Institute (2012) - Cobalt Facts: History, Properties and main Uses, Cobalt in metallurgical uses, Magnetic alloys, Cobalt in chemicals, Cobalt in cemented carbides, Cobalt in electronics, Cobalt health and environment, Cobalt supply and demand, Cobalt supply chain-conflict minerals, mis à jour en 2012. www.thecdi.com/cobaltfacts.php.

Darton Commodities Ltd (2013) - Cobalt Market review 2012-2013, 35 p, janvier 2013. www.dartoncommodities.co.uk.

Darton Commodities Ltd (2014) - Cobalt Market review 2013-2014, 46 p, janvier 2013. www.dartoncommodities.co.uk.

DIMENC (Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de la Nouvelle-Calédonie) (2014) - Productions et exportations minières & métallurgiques – décembre 2013, 3 p., disponible en ligne : www.dimenc.gouv.nc.

DMM Advisory Group (2013) - Focus Cobalt, A changing market. In Mining Journal, 6 décembre 2013.

Giaccone D. (Avere-France mobilité électrique) - Les technologies utilisées dans les batteries d'accumulateurs, En savoir plus sur les véhicules électriques, disponible en ligne : www.france-mobilite-electrique.org/.

Graedel T.E. et al. (UNEP, 2010) - Metal stocks in society, scientific synthesis. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 44 p., 7 fig., 8 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocksinsociety.pdf

Graedel T.E. et al. (UNEP, 2011) - Recycling rates of metals, a status report. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 48 p., 4 fig., 2 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf.

Gunn G. (2014) - Critical metals handbook. BGS, Nottingham / Wiley & Sons, Chichester, 439 p.

Ifremer (2010) - Différentes phases d'exploration (des nodules polymétalliques). Brochure 11 p., disponible en ligne : <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Nodules-polymetalliques/Differentes-phases-d-exploration>.

Ifremer (2010) - Différentes phases d'exploration (des nodules polymétalliques). Brochure 11 p., disponible en ligne : <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Nodules-polymetalliques/Differentes-phases-d-exploration>.

Moulin J.J., Schneider O., Vincent R., Dornier G. (INRS, 2001) - Le point des connaissances sur ... le cobalt. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), 4 p. www.inrs.fr.

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN, 2012) - Fiche Cobalt 60 et environnement. 8 p. www.irsn.fr.

International Seabed Authority (ISA) - Nodules polymétalliques. 8 p., disponible en ligne : www.isa.org.jm/files/documents/FR/Brochures/7_FRE.PDF.

Labbé J.F., Dupuy J.J. (2013) - Panorama mondial 2012 du marché des platinoïdes. Rapport final. BRGM/RP-62306-FR. 223 p., 78 fig., 45 tab.

Locq D., Caron P. (2011) - On Some Advanced Nickel-Based Superalloys for Disk Applications, in Aerospace Lab, The Onera Journal, Issue 3, novembre 2011. <http://publications.onera.fr/>.

Meinert L. (USGS, 2012) - Overview of critical materials – the view from the USA. September 12-13th, 2012, US-EU workshop on "Informed policy-making through improved mineral raw material data": http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/eu-us-meinert1_en.pdf.

Ministère des Mines de la République Démocratique du Congo (2013) - Statistiques minières de 2003 à 2012. www.mines-rdc.cd/fr/documents/Statistiques/stat_min_2003_2012.pdf.

Monier V., Escalon V., Cassowitz L., Massari F., Deprouw A. (Bio IS pour ADEME, 2010) - Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, 1^{ère} partie, 2010, 222 p., p. 35-42 ; 2^{ème} partie, 2010, 153 p., p. 9-24.

Minor Metals Trade Association (MMTA, 2013) - Cobalt Market Review. www.mmta.co.uk/cobalt-market-overview

Moulin J.J., Schneider O., Vincent R., Dornier G. (INRS, 2001) - Le point des connaissances sur le cobalt, tiré à part de Travail et Sécurité, juillet-août 2001, n° 609 ED 5011.

U.K. National Oceanography Centre (2014) - Metals, sulphides and nodules. <http://noc.ac.uk>.

Oakdene Hollins (2012) - Study of by-products of copper, lead, zinc and nickel, a report for International Study Groups for Nickel, Lead & Zinc and Copper, avril 2012, 209 p.

OPEC (2012) - World oil outlook 2012, 300 p., disponible en ligne: www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO2012.pdf.

Pillot C. (Avicenne Energy, 2013) - The worldwide battery market 2012-2025. Présentation au congrès Batteries 2013, Nice, 14-16 octobre 2013, 41 p., disponible en ligne : www.avicenne.com.

Reichl C., Schatz M., Zsak G. (2013) - World Mining Data, Vol.28. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ), Vienne, 2013, 246 p. www.bmwfj.gv.at.

Reuter M. et al. (International Resource Panel UNEP, 2013) - Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure, report 2b of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP, 2013, 320 p., disponible en ligne: www.unep.org/resourcepanel/.

Risk and Policy Analysts Ltd (2012) - Stockpiling of non-energy raw materials. Final report for the Directorate-General Enterprise and Industry of the European Commission, March 2012. 327 p. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/stockpiling-report_en.pdf.

Ritzema F. (Metal Bulletin, 2013) - Production of Uganda's Kasese cobalt will enhd in 2013. Metal Bulletin, 4 septembre 2013.

Ritzema F. (Metal Bulletin, 2014) - Producer tightness keeps cobalt market firm. Metal Bulletin, 12 mars 2014.

Roskill Information Services (2007) - The Economics of cobalt, Eleventh edition, janvier 2007, 291 p.

Roskill Information Services (2014) - Cobalt as a by-product of copper and nickel. A report for the International Copper Study Group / International Nickel Study Group. 17 février 2014. 49 p., 5 app.

Ruby F. (2006) - La vitamine B12, juillet 2006. www.passeportsante.net/fr/Solutions/PlantesSupplements/Fiche.aspx?doc=vitamine_b_12_ps#P143_5265.

Shedd K.B. (USGS, 2013) - 2011 Minerals Yearbook: Cobalt, avril 2013, 22 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/>.

Shedd K.B. (USGS, 2013) - 2013 Mineral Commodity Summaries: Cobalt, janvier 2013, 2 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/>.

Shedd K.B. (USGS, 2014) - 2014 Mineral Commodity Summaries: Cobalt, février 2014, 2 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/>.

SNL Metals and Mining (2014) - SNL database (base de données). www.snl.com.

Société Chimique de France (2012) - Produit du jour : cobalt. www.societechimiquedefrance.fr

Sotto J.J. (2005) - Anémies macrocytaires et mégalo-blastiques in Corpus médical de la faculté de médecine de Grenoble, juillet 2005. www.sante.ujf-grenoble.fr/SANTE/corpus/disciplines/hemato/hemacell/297b/lecon297b.htm.

Ujicas V. et al. (Institut des Statistiques et des Études Économiques de la Nouvelle-Calédonie, 2013) - Tableaux de l'Économie calédonienne 2013, 136 p. Chapitre Nickel, p. 101-107. www.isee.nc/publication/telechargement/tec2013.pdf.

U.S. Department of Energy (2011) - Critical materials strategy, décembre 2011, 195 p, disponible en ligne : <http://energy.gov/>.

Van der Voet E. et al. (International Resource Panel UNEP, 2013) - Environmental risks and challenges of anthropogenic metal flows and cycles, report 3 of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP, 2013, 234 p., disponible en ligne : www.unep.org/resourcepanel/.

Vignes J.L. (2012) - Cobalt, disponible en ligne : www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/metaux/co/cadco.htm.

Vulcan T. (2013) - Cobalt: increasing use, reduced production & finding the right price. Hard Assets Investors. www.hardassetsinvestor.com/features/4585-cobalt-increasing-use-reduced-production-a-finding-the-right-price.html.

Webmineral - Base de données minéralogiques en ligne, page dédiée au cobalt : <http://webmineral.com/chem/Chem-Co.shtml>.

Wilburn D.R. (USGS, 2012) - Cobalt mineral exploration and supply from 1995 through 2013. USGS Scientific investigation report 2011-5084, 16 p.

Willis P., Chapman A., Fryer A. (Oakdene Hollins, 2012) - Study of by-products of copper, lead, zinc and nickel. A report prepared for ILZSG, INSG and ICSG, June 2012, 216 p.

Wood D.A., Nwaoha C., Towler B.F. (2012) - Gas-to-liquids (GTL): A review of an industry offering several routes for monetizing natural gas. Journal of Natural Gas Science and Engineering 9(2002), p. 196-2080.

Sites généraux sur le cobalt et certains usages

Cobalt Development Institute: www.thecdi.com.

Cobalt Investing News: <http://cobaltinvestingnews.com>.

Sites des sociétés minières et industriels concernés

Liens cités le long du texte.



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34