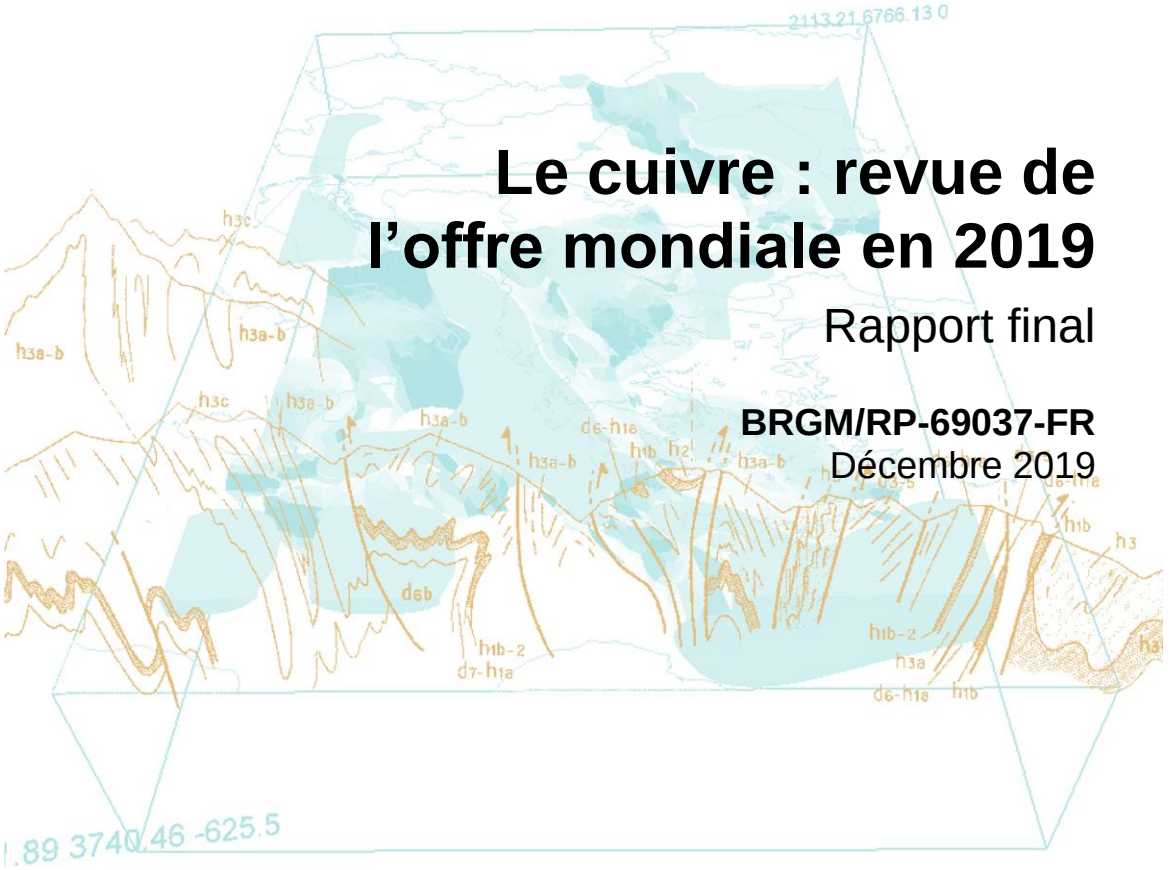
Document public



Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019

Rapport final

BRGM/RP-69037-FR
Décembre 2019

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

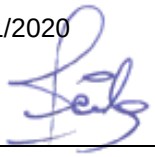
Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019

Rapport final

BRGM/RP-69037-FR
Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM 2019

M. Leguérinel, M. Le Gleuher

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Fenintsoa Andriamasinoro	Nom : Didier Bonijoly
Fonction : Modélisateur économique	Fonction: Directeur adjoint
Date :20/01/2020	Date : 18/12/2019
Signature **:** 	Signature **:**

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Cuivre, Ressources, Réserves, Production, Prix, Marché, Approvisionnement, Matières premières minérales, Anodes, Cathodes, Chine, Chili, Gisements, Recyclage, Géopolitique, Raffinerie, Fonderie.

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

Leguérinel M. et **Le Gleuher M**. (2019) - Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. Rapport final. BRGM/RP-69037-FR, 86 p., 62 fig., 10 tab.

© BRGM, **2019**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Contexte de l'étude

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2019 n° 2102743970 relative aux ressources minérales, au littoral et aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique, signée le 4 septembre 2019 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MTES) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

L'étude envisagée vise à développer la compréhension du marché du cuivre, de manière à mieux appréhender la chaîne d'approvisionnement en cuivre, en particulier de l'exploration minière à la fabrication de cathodes de cuivre, elles-mêmes utilisées pour la fabrication des produits semi-finis puis des produits manufacturés. Le présent rapport se concentre donc sur la partie offre primaire (mine) et secondaire (recyclage) en cuivre.

Synthèse

Géologie du cuivre

Le cuivre est un métal relativement abondant dans l'écorce terrestre puisque son abondance naturelle est de 60 ppm (parties par million), soit 60 grammes par tonne. Il entre dans la composition de près de 600 espèces minérales dont les plus fréquentes sont les sulfures, les sulfosels, les sulfates et les oxydes. Les gisements de cuivre sont très largement distribués autour du globe et sont de natures variées. Actuellement, ce sont les gisements de type porphyres qui assurent plus de 70 % de la production mondiale (Amérique du Sud, Indonésie). Cependant, d'autres catégories de gisements fournissent une part importante du cuivre mondial, dont les gisements sédimentaires (Pologne, Zambie, République Démocratique du Congo) ou encore les gisements d'oxyde de fer, cuivre et or (Australie).

Les deux principaux types de gisements de cuivre sont les suivants :

- les porphyres cuprifères : ce sont généralement des gisements à basse teneur et gros volume, associés à un système plutonique de faible profondeur (entre 1 et 5 km sous la surface) et situés initialement sous un volcan (aujourd'hui érodé ou non). Les teneurs d'exploitation sont relativement faibles et sont généralement comprises entre 0,2 et 1,5 % Cu, de 50 ppm à 5 000 ppm Mo et entre 0,07 et 1,3 ppm Au. L'exploitation, dans un premier temps à ciel ouvert ou « open pit », y est toutefois possible du fait des énormes tonnages avec plusieurs millions de tonnes de cuivre (par exemple, le gisement de Chuquicamata au Chili représente plus de 10 milliards de tonnes de minerai, soit environ 60 Mt de cuivre contenu). Enfin, il existe plusieurs catégories de porphyres : les porphyres à cuivre-molybdène-or, les porphyres à or, les porphyres à molybdène et enfin les porphyres (et coupoles) à étain-tungstène ;
- les gisements de cuivre sédimentaires : ce sont des gisements sédimentaires syngénétiques et stratiformes, représentant entre 9 et 20 % des ressources mondiales de cuivre et ils sont bien répartis à l'échelle du globe. Ils ont été formés dans un milieu réducteur en bordure de mer ou de lagune, sous une couche d'eau plutôt faible. Ils prennent place au sein de pélites et de grès. Dans la catégorie des shales cuprifères, il existe deux grandes provinces, mondialement connues : le Kupferschiefer (de l'Angleterre à la Pologne) et la « Copperbelt » qui s'étend du Katanga (RDC) au nord de la Zambie.

Production minière mondiale

La croissance de la production minière mondiale est relativement constante depuis 1900, avec un Taux de Croissance Annuel Moyen (TCAM) de 3,2 %. L'humanité a extrait autant de cuivre sur les 21 dernières années (1998 à 2018) que sur les 98 années précédentes (1900 à 1997), soit environ 320 Mt de cuivre. Ce TCAM veut également dire que si cette croissance se poursuit, il faudra produire autant de cuivre sur les 22 prochaines années (entre 2019 et 2040) que ce qui a été produit entre 1900 et 2018 (soit environ 640 Mt).

En 20 ans, l'industrie du cuivre a bien évoluée. La production minière est passée de 14,7 à 20,5 Mt de cuivre par an, entrainant avec elle certains changements d'acteurs. Si elle reste dominée par le Chili, plusieurs États sont aussi apparus sur le devant de la scène comme le Pérou, la RDC, la Chine ou le Mexique et ce, au détriment d'autres pays comme l'Indonésie, la Pologne ou dans une moindre mesure, les États-Unis. À noter que les 20 mines les plus importantes représentent plus de 40 % de la production minière mondiale et que les 10 plus grosses sociétés contrôlaient 46 % de la production minière mondiale de cuivre en 2018, soit environ 9,5 Mt.

Production métallurgique mondiale

Il existe deux types de minerais : les minerais sulfurés (80 % du cuivre primaire produit) et les minerais oxydés (20 % du cuivre primaire produit) :

- les minerais sulfurés : ils proviennent essentiellement des porphyres cuprifères, notamment ceux de la bordure ouest du continent américain et de l'Asie du Sud-Est. Ces minerais, titrant généralement entre 0,5 et 1 % Cu, subissent des traitements minéralurgiques (concassage, broyage et flottation) sur le même site de production pour obtenir un concentré de cuivre à environ 30 % Cu. La majorité de ce concentré va ensuite être traité par des procédés pyrométallurgiques (fonderie et affinage) pour donner tout d'abord un « blister » ou cuivre ampoulé (98-99 % Cu) puis des anodes (98,5-99,5 % Cu) d'environ 300 kg et enfin des cathodes de 8 kg (99,9 % Cu) ;
- les minerais oxydés : ils correspondent le plus souvent à la partie superficielle (supergène) des gisements sulfurés (porphyres, skarns etc.). Il peut s'agir de minerais à faible voire très faible teneur. Cependant, ils restent économiques du fait de leur accessibilité en surface et de leur faible coût de traitement. En effet, ce type de minerai ne nécessite pas toujours de broyage ou de flottation et le coût du traitement hydrométallurgique par lixiviation à l'acide sulfurique (in situ ou en tas) est relativement peu élevé. Le cuivre est ensuite extrait par la méthode solvant-électrolyse (SX-EW) pour obtenir des cathodes titrant 99,9 % Cu.

Sur les 57 fonderies renseignées dans les bases de données de l'ICSG en 2016, 16 se trouvent en Chine et 7 au Chili. Si ce dernier détenait encore 13 % des capacités de fusion-affinage en 1990, ce chiffre est descendu à 8 % en 2016 et devrait encore continuer de décroître pour atteindre 5 % en 2030, au profit des capacités chinoises qui ne cessent de croître (31 % des capacités en 2016, 43 % en 2030). La Chine a produit 8 Mt de blisters de cuivre en 2018, sur une production mondiale de quasiment 20 Mt. Tout comme la fabrication de blisters, la production de cuivre raffiné sous forme de cathodes est largement dominée par la Chine (9,2 Mt), qui produit en 2018 quasiment 40 % du total mondial évalué à 24,1 Mt.

Réserves et ressources

Les ressources mondiales en cuivre contenu sont estimées par l'USGS à environ 2 000 Mt pour les continents et environ 700 Mt pour les ressources maritimes (nodules, encroutements, fumeurs etc. Quant aux réserves mondiales de cuivre, elles ont été estimées par l'USGS à 830 Mt en 2018, dont 21 % rien qu'au Chili. D'autres pays possèdent dans leur sol de grandes quantités de cuivre, comme l'Australie, le Pérou, la Russie, l'Indonésie, le Mexique ou encore les États-Unis. Le nombre d'années de réserves reste aux alentours des 30-40 ans car c'est l'horizon d'évaluation des études de faisabilité menées par les compagnies minières. Bien que les budgets d'exploration sur les dernières années soient en hausse, le rythme de découverte de nouveaux gisements s'étiole, en particulier depuis 2014. Le manque de découverte de nouveaux gisements, qui pourraient potentiellement prendre le relais des grands gisements en fin de vie, pourra poser de sérieux problèmes d'approvisionnement dans les années futures, du moins à moyen terme.

Recyclage

Le recyclage occupe une place importante et sans cesse croissante sur le marché du cuivre. Cela inclut les déchets neufs ou « new scraps » (généralement les chutes de fabrication) et les vieux déchets ou « old scraps » (produits en fin de vie).

Les déchets neufs : L'International Copper Study Group (ICSG) a évalué la quantité de ces déchets neufs à environ 5,7 Mt en 2018. À noter que certaines études se concentrent sur les vieux déchets et passent un peu sous silence la boucle des « déchets neufs » qui n'ont pas transité par un usage final.

Les vieux déchets : Il est communément évalué que 85 % du cuivre en circulation peut être récupéré et sa durée de vie peut s'étaler de quelques années (électronique) à plus de 100 ans (construction). L'ICSG estime qu'en 2018, environ 3 Mt de vieux déchets ont été utilisés par les fondeurs et 4 Mt par les affineurs.

En additionnant tous les types de déchets, c'est environ 9,7 Mt (5,7 Mt de déchets neufs et 4 Mt de vieux déchets utilisés par les affineurs) de cuivre secondaire qui ont été consommés en 2018, soit environ 1/3 de la demande en cuivre total (environ 30 Mt).

Place de l'Amérique du Sud sur le marché du cuivre

Production, réserves et ressources

L'Amérique du Sud est la zone qui produit le plus de concentrés de cuivre annuellement avec 42 % de la production minière mondiale, mais seulement 12 % du cuivre raffiné mondial. Parmi les pays producteurs de cuivre sud-américains, le Chili en est l'acteur historique et en occupe encore la première place. Cependant, la montée du Pérou sur le devant de la scène est à souligner. Les autres pays produisant du cuivre sont le Brésil, l'Argentine, la Colombie, la Bolivie et, depuis 2019, le Panama[1] et l'Équateur.

[1] Dans cette étude, nous tiendrons compte du Panama dans l'ensemble « Amérique du Sud », même si, au sens strict, ce pays se situe en Amérique Centrale.

S&P Global rapporte que les budgets totaux alloués par les compagnies ou par les gouvernements à l'exploration minière en 2018 ont été de 9 625 milliards de dollars, en hausse de 21 % sur un an. L'Amérique du Sud continue de drainer la grande majorité des investissements avec 28 % des parts de marché, en hausse de 14 % par rapport à 2017. Le cuivre représente à lui seul 44 % du budget total, soit plus de 900 millions de dollars.

La Colombie et le Panama comme nouveaux acteurs sud-américains

Plusieurs acteurs souhaitent développer et/ou améliorer leur production de cuivre. C'est le cas de la Colombie qui possède un potentiel géologique démontré mais encore peu étudié d'une part et où le climat social s'est quelque peu apaisé avec la paix conclue entre le gouvernement et les groupes rebelles d'autre part. La Colombie, qui ne possède actuellement qu'une seule mine de cuivre en activité, a néanmoins attiré plusieurs compagnies minières via de nouveaux projets. Le Panama, quant à lui, a vu la mise en production de l'énorme mine de Cobre Panama, exploitée par la société canadienne First Quantum Minerals. Les premiers concentrés de cuivre ont été exportés en juin 2019 et la mine devrait produire plus de 350 kt de cuivre par an d'ici 2023.

Mises aux normes des fonderies chiliennes

Le Chili possède sept fonderies dont trois sont associées à des raffineries (Chuquicamata, Ventanas et Potrerillos). Dans un contexte de réduction de risques sanitaires et environnementaux, le Chili a décidé en 2013 d'imposer des standards d'émission plus restrictifs portant sur les particules fines, le dioxyde de soufre (SO_2), l'arsenic et le mercure. Les conséquences de la mise en place de ces nouvelles normes sont relativement importantes. D'une part, les investissements engagés sont conséquents (entre 50 millions et 1 milliard de dollars). D'autre part, les fonderies doivent être fermées temporairement, le temps des travaux, ce qui impacte de fait les exportations chiliennes en cuivre raffiné. En effet, celles-ci ont baissé (- 109 kt en 2019 selon l'agence chilienne Cochilco) au profit des exportations en concentrés de cuivre (+ 239 kt).

Conséquences de la baisse des teneurs dans les gisements

Si la baisse des teneurs dans les gisements exploités est en grande partie due à des avancées technologiques apparues il y a plusieurs années (productivité accrue grâce à l'augmentation de la taille des engins miniers et donc possibilité d'exploiter à des teneurs plus faibles tout en réalisant des bénéfices), elle s'explique aujourd'hui davantage par des facteurs géologiques. En effet, la teneur moyenne des gisements exploités a chuté de 41 % en presque 30 ans, passant de 1,68 % à 0,98 % entre 1990 et 2017. Par ailleurs, la teneur moyenne des mines en exploitation est d'environ 0,62 % Cu et celle des mines récemment ouvertes de seulement 0,53 %. Une des principales causes de la baisse des teneurs est que les meilleurs gisements ont été exploités en premier et sont maintenant épuisés. Par exemple, les parties riches superficielles des grands gisements porphyriques des Andes ont été exploitées et les compagnies utilisent maintenant les minerais sulfurés, moins riches en cuivre.

Consommation d'eau au Chili

En Amérique du Sud et tout particulièrement au Chili, la consommation d'eau nécessaire à la production minière pose de plus en plus de problèmes, à tel point que plusieurs projets sont stoppés par les autorités, sous la pression de la population locale. Au Chili, la plupart des grandes mines de cuivre sont situées au nord de Santiago, dans le désert d'Atacama, l'un des plus secs du monde. L'accès à l'eau et surtout aux nappes souterraines est donc devenu un enjeu stratégique.

La production minière, dont le taux de croissance annuel moyen est attendu à 2,1 % entre 2018 et 2029, va tirer la demande en eau à un rythme de 4,2 % par an. Pour faire face à la demande croissante en eau et aux problèmes qui y sont associés, plusieurs usines de concentration de minerais utilisent maintenant de l'eau de mer, dessalée ou telle quelle. Cochilco a également calculé que si la consommation en eau « continentale » devrait croître de 12 % en 10 ans pour atteindre 14,5 m^3 pour produire 1 tonne de cuivre, celle de l'eau de mer devrait s'envoler avec une hausse de 230 % entre 2018 et 2029. Cette consommation représenterait alors 43 % de la demande totale en eau. Néanmoins, construire des usines de dessalement et les utiliser demande de très gros investissements et contribue à faire monter les coûts de production. En 2013, les coûts de traitement au Chili pour dessaler l'eau de mer étaient de 5 $ par m^3, contre seulement 2,5 $/$m^3$ aux USA. Les dépenses des usines à cet effet peuvent atteindre plusieurs centaines de millions de dollars, voire dépasser le milliard de dollars.

Le marché des déchets de cuivre : impact des nouvelles régulations chinoises sur l'offre

Les déchets de cuivre consommés en Chine

Environ 60 % des déchets de cuivre utilisés dans l'économie chinoise étaient importés en 2018, contre 80 % dix ans plus tôt. En effet, si l'urbanisation du pays et l'amélioration du niveau de vie ont décuplé la consommation chinoise de cuivre, une large proportion des produits contenant ce cuivre est encore en usage. Cependant, à partir de la prochaine décennie, des quantités considérables de déchets devraient arriver sur le marché intérieur avec la mise au rebut des équipements et des biens de consommation en fin de vie. Ces déchets proviendraient du remplacement des lignes électriques (30 %), des appareils électroménagers (25 %) et du secteur du bâtiment (22 %).

Les déchets et débris de cuivre importés relèvent de l'une des deux catégories suivantes :

- catégorie 6 : ces déchets ne nécessitent aucun démantèlement et la teneur moyenne en cuivre des lots est d'environ 75 %. Environ 10 % de ces déchets sont des matériaux de choix (99 % Cu) comme les câbles électriques dénudés, 50 % renvoient au cuivre « mêlé » (> 95 % Cu) et enfin 40 % concernent les bronzes et laitons ;
- catégorie 7 : ces déchets sont constitués de matériels qui doivent être préalablement démontés pour récupérer le cuivre et la teneur moyenne des lots est d'environ 25 % (câbles électriques avec isolant, parties de moteur etc.).

En juillet 2017, le gouvernement chinois a annoncé à l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) sa volonté de réduire ou d'interdire l'importation d'un certain nombre de déchets solides, dont les déchets cuivreux. Cela inclut :

- un resserrement du seuil d'impuretés autorisé à 1 % depuis le 1er mars 2018 ;
- une restriction sur les importations de déchets de cuivre nécessitant un démantèlement avant leur utilisation (déchets de catégorie 7 de la classification chinoise) en 2018 ;
- l'interdiction d'importer des déchets de cuivre nécessitant un démantèlement avant leur utilisation (déchets de catégorie 7) depuis le 1er janvier 2019 ;
- une restriction sur des importations de déchets de cuivre pouvant être directement utilisés (déchets de catégorie 6, Code HS 7404000090), avec l'introduction de quotas et de permis d'importation depuis le 1er juillet 2019.

Parallèlement à ces restrictions s'est ajoutée, dans un contexte de guerre commerciale entre les États-Unis et la Chine, l'imposition d'un droit de douane de 25 % sur les importations de déchets de cuivre en provenance des États-Unis en riposte aux taxes américaines, en août 2018.

Portées par le développement économique du pays, les importations chinoises de déchets de cuivre ont plus que doublé de 2000 à 2008 pour culminer à 5,6 Mt, avant la crise financière globale. En 2018, et selon les chiffres des douanes chinoises, ces importations ne s'élevaient plus qu'à 2,4 Mt car limitées par la nouvelle politique environnementale. Les teneurs en cuivre des arrivages ont par contre augmenté : n'excédant pas 15 % en 2000, elles se sont maintenues à environ 35-40 % sur la période 2008-2017.

Reconfiguration des flux mondiaux de déchets de cuivre

Les États-Unis, premier producteur et exportateur mondial de déchets de cuivre, ont été le principal fournisseur de la Chine durant 16 années. En 2017, la Chine et Hong Kong accueillaient 72 % des exportations de déchets de cuivre et d'alliages de cuivre des États-Unis (724 kt). Mais ces importations chinoises provenant, soit directement des États-Unis, soit via Hong Kong, ont chuté considérablement avec l'imposition de droits de douanes dès 2018. Les pays producteurs ont donc dû stocker leurs déchets ou trouver de nouveaux exutoires. Une partie de la valorisation des déchets de catégorie 7 est redirigée vers les pays de l'Asie du Sud-Est comme la Malaisie, la Thaïlande et les Philippines notamment. Les matériaux y sont démantelés et purifiés avant d'être exportés vers la Chine en tant que déchets de catégorie 6.

Le Ministère chinois de l'écologie et de l'environnement a annoncé un arrêt total de toutes les importations de déchets solides d'ici à la fin de l'année 2020. Face aux difficultés d'approvisionnement en déchets des industriels chinois, les autorités chinoises seront certainement amenées à autoriser les déchets de catégorie 6 à sortir du statut de déchet après préparation pour être reclassifiés en tant que « matières premières issues du recyclage ».

Augmentation des importations de concentrés de cuivre

Pour pallier le resserrement de l'offre en déchets cuivreux, les raffineurs et fondeurs chinois ont acheté plus de concentrés de cuivre en 2019, pour atteindre 18 Mt (en masse brute) sur la période janvier-octobre 2019, une augmentation de 8 % par rapport à 2018.

Enjeux et perspectives du marché mondial du cuivre

La plupart des analystes prévoient que la demande en cuivre continuera de croître à court et moyen termes, pour tenter de satisfaire trois grandes problématiques sociétales :

- l'évolution démographique : hausse de la population mondiale couplée à une hausse des niveaux de vie, en particulier dans les pays émergents ;
- un développement toujours plus soutenu des technologies : internet mobile, objets connectés, automatisation, robotique etc. ;
- une transition énergétique et écologique : développement des énergies renouvelables, véhicules électriques, stockage de l'énergie etc..

Par exemple, la société minière Teck Resources et Wood Mackenzie prévoient que la demande en cuivre pour le seul secteur des véhicules électrifiés augmente de 7,5 Mt d'ici 2040, soit plus d'un tiers de la production actuelle.

Pour répondre à ces besoins d'approvisionnement croissant, le renouvellement des réserves connues et le développement du recyclage ne sont pas les principales sources d'inquiétude. En revanche, la gestion des questions sociales et environnementales associées au développement de nouvelles mines semblent désormais jouer un rôle déterminant, voire être le principal élément bloquant pour la mise en exploitation future des plus gros gisements identifiés.

Dans ce cadre, les principaux relais identifiés pour la production primaire à court terme se limitent aux entrées en production des mines au Panama (Cobre Panama) et en RDC (Kamoa-Kakula), voire au Pérou et en Équateur, ainsi que des extensions en souterrain des projets existants au Chili. À moyen terme, de nombreuses incertitudes quant aux modèles d'exploitation des nouveaux gisements et leurs impacts sont à lever.

Le rôle des acteurs chinois sur le marché du cuivre devrait continuer à s'intensifier, non seulement par la concentration des capacités de fonderie et raffinage mondiales, mais également par un déplacement vers l'amont de la chaine, illustré notamment par des prises de position importantes d'un seul et même groupe : Zijin Mining, à la fois dans le développement du projet Kamoa-Kakula et le rachat des actifs de Freeport-Mcmoran en Serbie à l'été 2019.

Sommaire

1. Contexte de l'étude 19

1.1. DÉFINITIONS 19

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE 20

1.3. SOURCES DES DONNÉES 20

2. Introduction 21

3. Quelques fondamentaux sur la production de cuivre 25

3.1. LE CUIVRE PROVIENT DE GISEMENTS ET MINERAIS VARIÉS 25
3.1.1. Les porphyres cuprifères 26
3.1.2. Les gisements de cuivre sédimentaires 28
3.1.3. Gisements d'oxyde de fer, cuivre et or (IOCG) 30
3.1.4. Complexes ignés lités 30
3.1.5. Skarns cuprifères 31
3.1.6. Les amas sulfurés volcano-sédimentaires (VMS) 31
3.1.7. Les gisements exhalatifs sédimentaires (SEDEX) 33
3.1.8. Épithermaux 33
3.1.9. Autres 33

3.2. LA PRODUCTION MINIÈRE MONDIALE EN HAUSSE CONTINUE DEPUIS 1900 34
3.2.1. Autant de cuivre produit en 23 ans que sur les 96 années précédentes 34
3.2.2. Les 20 plus grosses mines produisent 40 % du cuivre mondial 35
3.2.3. Les 10 plus grandes sociétés produisent un peu moins de la moitié du cuivre mondial 36

3.3. UNE PRODUCTION MÉTALLURGIQUE MONDIALE EN MUTATION 36
3.3.1. Les procédés utilisés dépendent du type de minerai 37
3.3.2. Les smelters dans le monde 39
3.3.3. Les raffineries dans le monde 43

3.4. ÉTAT DES RESERVES ET RESSOURCES 44
3.4.1. Définitions 44
3.4.2. Les ressources mondiales 45
3.4.3. Les réserves mondiales 46
3.4.4. Les principaux projets en cours de développement 48

3.5. RECYCLAGE 54
3.5.1. Les déchets neufs 54
3.5.2. Les vieux déchets : 54

3.6. COURS DU CUIVRE 55

4. La place de l'Amérique du Sud sur le marché du cuivre 59

4.1. ÉTAT DE LA PRODUCTION 59

4.2. RÉSERVES ET RESSOURCES EN AMÉRIQUE DU SUD 64

4.3. DE NOUVEAUX ACTEURS ENTRENT EN JEU 66
4.3.1. La Colombie souhaite développer son industrie du cuivre 66
4.3.2. Le Panama fait sa place sur l'échiquier mondial 66

4.4. FERMETURES ET MISES AUX NORMES DES FONDERIES CHILIENNES 67

4.5. BAISSE DES TENEURS ET CONSÉQUENCES 68

4.6. AUTRES FACTEURS POUVANT IMPACTER LA PRODUCTION DE CUIVRE 70

4.7. CONSOMMATION D'EAU : EXEMPLE DU CHILI 71

5. Le marché des déchets de cuivre : impact des nouvelles régulations chinoises sur l'offre 75

5.1. PLACE DU CUIVRE SECONDAIRE DANS LA PRODUCTION MONDIALE 75

5.2. LES DÉCHETS DE CUIVRE CONSOMMÉS EN CHINE 76
5.2.1. Les déchets générés en Chine 76
5.2.2. Les déchets importés et les nouvelles régulations chinoises 77

5.3. RECONFIGURATION DES FLUX MONDIAUX DE DÉCHETS DE CUIVRE 81

5.4. AUGMENTATION DES IMPORTATIONS DE CONCENTRÉS DE CUIVRE 82

5.5. VERS UNE RECLASSIFICATION DES DÉCHETS EN MATIÈRES PREMIÈRES ISSUES DU RECYCLAGE 82

6. Perspectives 83

7. Bibliographie 85

Liste des figures

Figure 1 : Taille des marchés de certains métaux en 2018. 21
Figure 2 : Les principaux usages du cuivre en 2016. 22
Figure 3 : Évolution de la production minière mondiale de cuivre depuis 1726. 23
Figure 4 : Projection de la demande en cuivre par différents types de véhicules jusqu'en 2040. 24
Figure 5 : Modèle de genèse des porphyres cuprifères (modifié d'après Jébrak et Marcoux, 2008). ..26
Figure 6 : La mine à ciel ouvert d'Escondida au Chili (© BHP). 27
Figure 7 : Schéma simplifié d'un porphyre cuprifère. 27
Figure 8 : Schéma figurant la limite du Zechstein et des gisements du Kupferschierfer associés (source : Jébrak et Marcoux, 2008). 28
Figure 9 : La mine souterraine de Lubin en Pologne (© KGHM). 29
Figure 10 : Schéma simplifié de la Copperbelt et des gisements de cuivre associés (source : Jébrak et Marcoux, 2008). 30
Figure 11 : La mine souterraine de Norislk (Polar Division) appartenant à Nornickel (© Nornickel). 31
Figure 12 : Schéma de mise en place d'un gisement de type VMS (source : Jébrak et Marcoux, 2008). 32
Figure 13 : Évolution de la production minière de cuivre depuis 1900. 34
Figure 14 : Évolution des pays producteurs de cuivre, entre 1998 et 2018. 35
Figure 15 : Les 20 plus importantes mines de cuivre en 2018. 35
Figure 16 : Répartition des principales sociétés productrices de concentrés cuivre en 2018. 36
Figure 17 : Schéma simplifié des procédés de production de cuivre : filières des minerais sulfurés et oxydés. 37
Figure 18 : Schéma du passage des anodes aux cathodes de cuivre. 38
Figure 19 : Production minière de cuivre en fonction du procédé choisi : concentrés-pyrométallurgie ou hydrométallurgie-SX-EW. 39
Figure 20 : Évolution de la production des fonderies de cuivre par région, de1990 à 2017 (source : ICSG, 2018). 40
Figure 21 : Production mondiale de blisters de cuivre en 2018. 40
Figure 22 : Répartitions du coût opératoire et des recettes des fonderies de cuivre en 2015. 41
Figure 23 : Répartition de la production de cuivre raffiné en 2018. 43
Figure 24 : Évolution de la production des raffineries de cuivre de 1960 à 2017 (source : ICSG, 2018). 44
Figure 25 : Définitions des notions de ressources et réserves selon l'approche CRIRSCO. 45
Figure 26 : Répartition des ressources mondiales en cuivre, identifiées (gauche) et hypothétiques (droite) en 2015. 46
Figure 27 : Répartition par pays des réserves mondiale de cuivre en 2018. 46
Figure 28 : Évolution de la production minière de cuivre, des réserves et de leur nombre d'années théoriques avant épuisement. 47
Figure 29 : Quantité de cuivre découverte dans les nouveaux gisements. 47
Figure 30 : Mise en exploitation de la mine de Kamoa-kakula (© Ivanhoe Mines). 49

Figure 31 : La mine de Los Bronces au Chili (© ANGLO AMERICAN). 50
Figure 32 : Projet Pebble en Alaska (© Northern Dynasty Minerals). 51
Figure 33 : Projet Resolution en Arizona (© Rio Tinto). 51
Figure 34 : Usine de concentration du projet Udokan en Russie (© Baikal Mining). 52
Figure 35 : Évolution du cours du cuivre entre 1997 et 2019. 56
Figure 36 : Exemples d'évènements affectants le prix du cuivre, depuis 2014. 57
Figure 37 : Évolution des cours et stocks de cuivre entre 1990 et 2019. 58
Figure 38 : Part de l’Amérique du Sud dans la production mondiale de concentrés de cuivre et de cuivre raffiné en 2018. 59
Figure 39 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019. 60
Figure 40 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone nord (Colombie et Panama). 61
Figure 41 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone nord-ouest (Pérou et voisinage). 62
Figure 42 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone sud-ouest (Chili et voisinage). 63
Figure 43 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone est (Brésil). 64
Figure 44 : Répartition des budgets d'exploration par régions en 2018, tous métaux à gauche, cuivre à droite. 65
Figure 45 : Courbe des coûts de production des pays producteurs de cuivre en 2018. 65
Figure 46 : La mine de Cobre Panama et son usine de traitement (© First Quantum). 66
Figure 47 : Évolution de la teneur moyenne des gisements exploités entre 1980 et 2017 (source : Freepoint, 2018). 69
Figure 48 : La mine de Collahuasi au Chili (© ANGLO AMERICAN). 70
Figure 49 : Facteurs ayant impacté à la baisse la production minière mondiale de cuivre depuis 2007. 70
Figure 50 : Estimation de la consommation d'eau par l'industrie minière cuprifère chilienne entre 2018 et 2029. 71
Figure 51 : Estimation des parts de consommation d'eau douce et salée par l'industrie minière cuprifère chilienne entre 2018 et 2029. 72
Figure 52 : Estimation de la consommation d'eau continentale et d'eau de mer par l'industrie minière cuprifère chilienne selon les régions entre 2018 et 2029. 73
Figure 53 : Consommation de cuivre recyclé de 2010 à 2017. 75
Figure 54 : Origine des déchets de cuivre en Chine en 2017. 76
Figure 55 : Évolution de la production et du taux de récupération des déchets de cuivre en Chine de 1971 à 2013 (source : Wang et al., 2017). 76
Figure 56 : Exemples de déchets de catégorie 6. a) Cuivre Millberry ; b) Cuivre mêlé (source : http ://www.ribafarre.com/). 77

Figure 57 : Exemples de déchets de catégorie 7. a) Câbles électriques gainés ; b). Réservoirs ; c) Stators de moteur électrique; d) Déchets de plomberie (source : http ://www.asm-recycling.co.uk/scrap-metal/copper.html ; http ://ecometal.mc/en/rottami.php ; https ://www.scrapmonster.com/scrap/no-2-insulated-copper-wire-scrap/13).....78

Figure 58 : Évolution des importations chinoises de déchets de cuivre de 1992 à 2018. 79

Figure 59 : Évolution des teneurs en cuivre des déchets importés de 2008 à 2019. 80

Figure 60 : Les exportations américaines de déchets de cuivre et d'alliages de cuivre de 2007 à 2017 (source : ISRI, 2019). 81

Figure 61 : Provenance des importations chinoises de déchets de cuivre de janvier 2016 à janvier 2019 (source : ISRI, 2019). 81

Figure 62 : Les importations chinoises de concentrés de cuivre de mars 2017 à septembre 2019 (source : SMM, 2019).....82

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux minéraux du cuivre et leur composition. 25

Tableau 2 : Récapitulatif des principaux gisements de cuivre (S. Northay et al., 2017). 26

Tableau 3 : Les 10 fonderies les plus importantes en 2018. 41

Tableau 4 : Les 10 raffineries les plus importantes en 2018. 43

Tableau 5 : Les dix plus gros projets miniers de cuivre en phase avancée dans le monde. 48

Tableau 6 : Les dix plus gros projets miniers de cuivre dans le monde. 48

Tableau 7 : Capacités des fonderies chilienne en 2019. 67

Tableau 8 : Nouvelles normes sur la capture du SO_2 au Chili. 68

Tableau 9 : Teneur moyenne en cuivre des gisements exploités ou seulement étudiés par zone géographique. 69

Tableau 10 : Quotas d'importations de déchets cuivreux de catégorie 6 en 2019 (au 05/11/2019).....80

1. Contexte de l'étude

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2019 n° 2102743970 relative aux ressources minérales, au littoral et aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique, signée le 4 septembre 2019 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MTES) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

L'étude envisagée vise à développer la compréhension du marché du cuivre, de manière à mieux appréhender la chaîne d'approvisionnement en cuivre, en particulier de l'exploration minière à la fabrication de cathodes de cuivre, elles-mêmes utilisées pour la fabrication des produits semi-finis puis des produits manufacturés. Le présent rapport se concentre donc sur la partie offre, primaire (mine) et secondaire (recyclage) en cuivre.

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. :

- **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 factuelle, ainsi que le temps 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 cuivre est relativement complexe et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

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 différents organismes et pays l'United States Geological Survey (USGS, BMNT etc.) ;
- la base de données sur les mines et les gisements de S&P Global ;
- les études spécialisée sur le cuivre produites par différents cabinets d'analyses (Roskill, CRU, Wood Mackenzie etc.) ;
- divers sites internet ou blogs fournissant des informations et des analyses relatives aux acteurs, aux marchés et aux technologies liés aux cuivre ;
- ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude, et en particulier les sites Internet et les rapports annuels des sociétés productrices ou consommatrices, ou celles détenant des permis d'exploration ou d'exploitation sur des projets d'exploitation de cuivre.

La présentation générale du marché du cuivre et les problématiques sur la demande sont présentées au chapitre 2. Les aspects concernant l'offre (minéralogie, production minière et métallurgique, exploration, prix) sont abordés au chapitre 3, et ceux concernant les problématiques liés au cuivre en Amérique du Sud au chapitre 4 (production, mise aux normes des fonderies chiliennes, baisse des teneurs, accès à l'eau). Enfin, le chapitre 5 traite des évolutions récentes de la politique chinoise liée aux déchets de cuivre.

2. Introduction

Mathieu Leguérinel

Avec l'argent et l'or, le cuivre a été l'un des premiers métaux utilisés par les humains, sous la forme de cuivre natif. Le mot cuivre provient du latin Cupreum et du grec Kupros, dérivant eux-mêmes de Chypre, île où ont été trouvées les premières traces du minerai de cuivre il y a 6 000 ans. Il est vraisemblable que le cuivre a attiré l'attention de par sa couleur rouge-orange brillante à l'état natif et de par la couleur verte ou bleue de ses gisements oxydés. Le travail du cuivre a également donné son nom à deux grandes périodes historiques : le chalcolithique ou âge du cuivre d'abord (VI^{e} au III^{e} millénaire avant J-C suivant les régions) puis l'âge du bronze ensuite (IV^{e} au II^{e} millénaire avant J-C). Localisées surtout dans l'actuelle Turquie, les premières mines de cuivre dateraient du VII^{e} millénaire avant J-C et consistaient en de simples trous de faible profondeur. Cette activité minière s'est repandue assez vite et a gagné le pourtour méditerranéen à partir du IV^{e} millénaire avant J-C (Chypre, Grèce, Espagne). Les exploitations ont progressé vers le nord à l'âge du Bronze (Grande-Bretagne, Irlande), puis dans des contrées bien plus lointaines comme en Amérique du Nord. D'abord martelé à froid pour former des lames et objets divers, le cuivre a ensuite été fondu puis allié avec d'autres métaux pour former des composés plus solides, comme le bronze (alliage de cuivre et d'étain). Après la chute de l'empire romain et jusqu'au XIX^{e} et XX^{e} siècle, le cuivre a continué à être utilisé, en étant extrait de petites mines comme à Chessy (Rhône) et plus largement dans toute l'Europe. Jusqu'au début du XX^{e} siècle, l'Europe a été le principal producteur de cuivre mondial. Elle est ensuite rapidement dépassée par l'Amérique du Sud, en particulier le Chili. À l'heure actuelle, le marché du cuivre figure parmi les plus gros marchés des métaux, évalué à environ 137 milliards de dollars, à peu près équivalent à celui de l'or (133 G$[2]), mais inférieur à celui du fer (174 G$) (Figure 1).

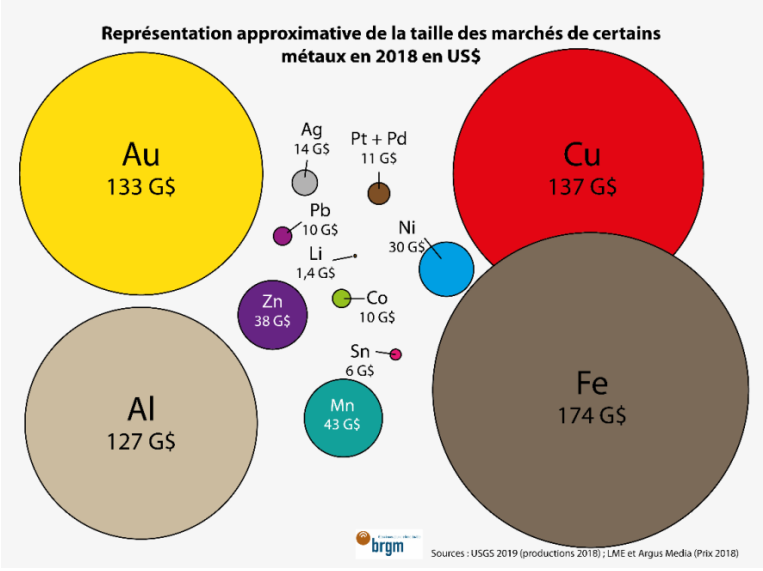


Figure 1 : Taille des marchés de certains métaux en 2018.

[2] Le terme G$ (Giga dollar) utilisé dans le rapport signifie milliard de dollars des États-Unis

Depuis plus d'un siècle, le cuivre est au cœur de nos sociétés puisqu'il intervient dans la plupart des secteurs de l'économie mondiale tels que la construction (bâtiments, infrastructure), le transport ou l'électronique, sous la forme de câblage électrique (Figure 2).

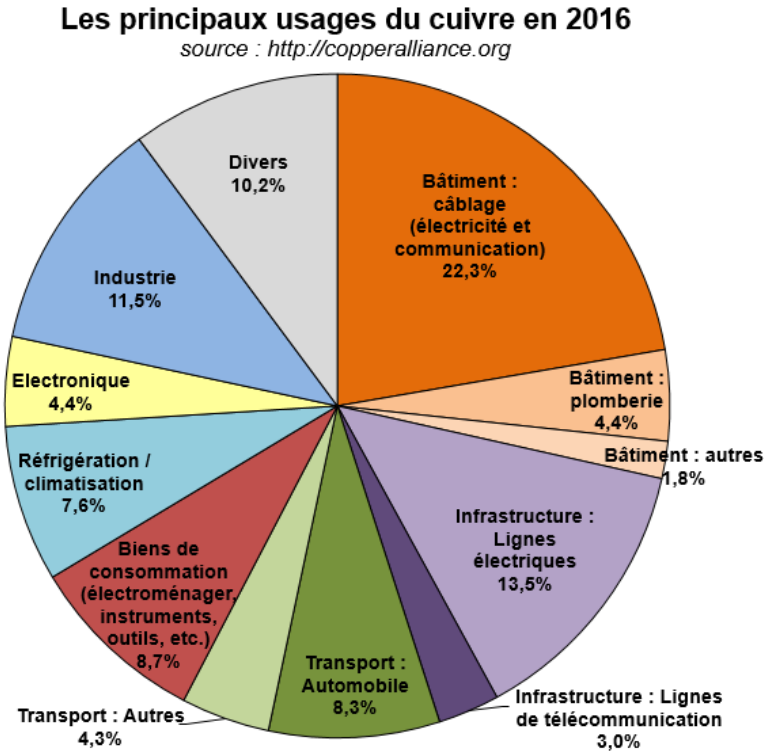


Figure 2 : Les principaux usages du cuivre en 2016.

La plupart des analystes prévoient que la demande en cuivre va continuer à croître (Figure 3) pour tenter de satisfaire trois grandes problématiques sociétales :

- l'évolution démographique : hausse de la population mondiale couplée à une hausse des niveaux de vie, en particulier dans les pays émergents ;
- un développement toujours plus soutenu des technologies : internet mobile, objets connectés, automatisation, robotique etc. ;
- une transition énergétique et écologique bas carbone : développement des énergies renouvelables, véhicules électriques, stockage de l'énergie etc.

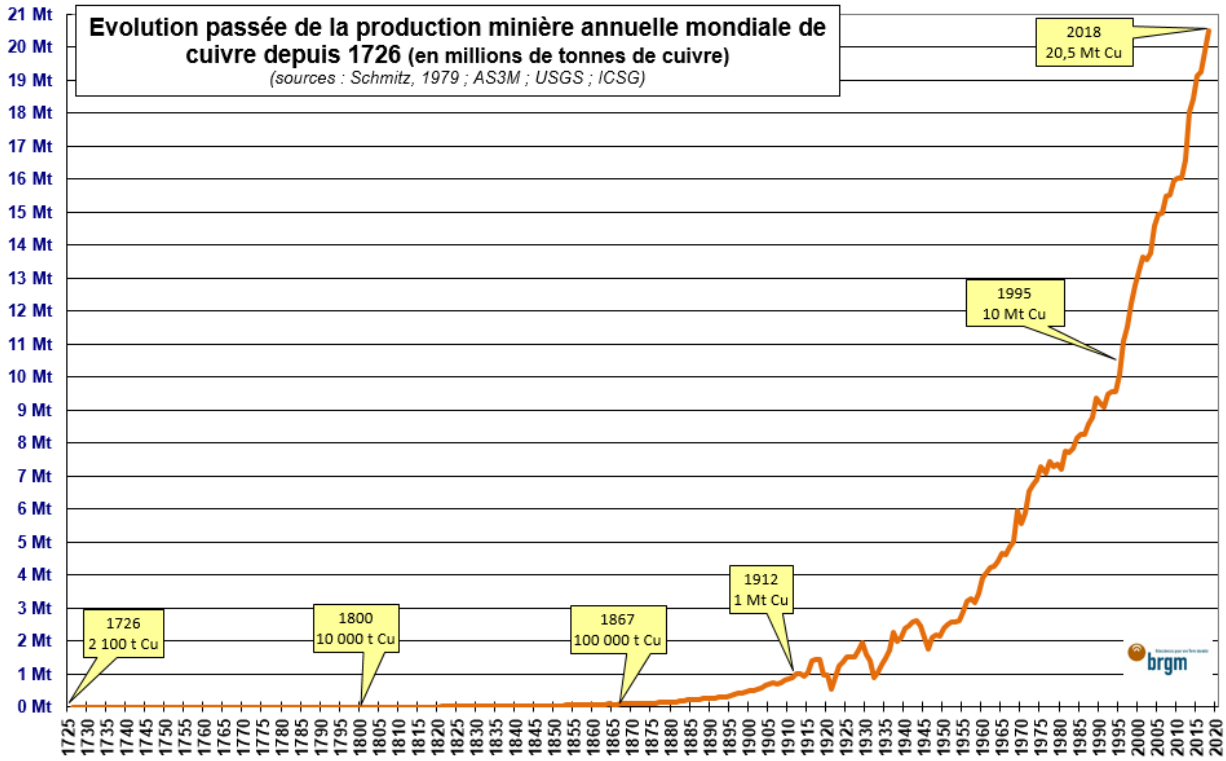


Figure 3 : Évolution de la production minière mondiale de cuivre depuis 1726.

Nombre d'auteurs et d'industriels s'accordent sur le fait que le développement des véhicules électrifiés (hybrides, hybrides rechargeables ou électriques) va s'accélérer mais les chiffres divergent quelque peu. Dans tous les cas, les besoins en métaux (lithium, cobalt, graphite ou encore nickel) et notamment en cuivre vont dépendre de la dynamique des ventes de ces véhicules au niveau mondial et de la quantité intrinsèque de métaux immobilisés dans chaque véhicule, durant sa durée de vie. En se basant sur le scénario « New Policies » de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), le nombre de véhicules légers électrifiés pourrait atteindre 130 millions en 2030 (6,5 % du parc automobile mondial), date à laquelle les ventes de véhicules électrifiés représenteraient 13 % des ventes totales. Le scénario EV30@30, cette fois-ci adopté par l'Electric Vehicle Initiative (EVI) est plus ambitieux et indique que le nombre de véhicules légers atteindrait 228 millions d'unités, soit 12 à 15 % du parc mondial.

Quoi qu'il en soit, ce fort développement va inévitablement tirer la demande en cuivre vers le haut (Figure 4). La société minière Teck Resources et Wood Mackenzie prévoit que la demande en cuivre pour le secteur des véhicules électrifiés augmente de 7,5 Mt d'ici 2040, en particulier avec la forte pénétration des véhicules électriques et hybrides rechargeables, qui requièrent l'équivalent de 60 kg de cuivre par véhicule (80 kg pour le fabricant Seat), soit le triple d'un véhicule à combustion interne classique (essence ou diesel).

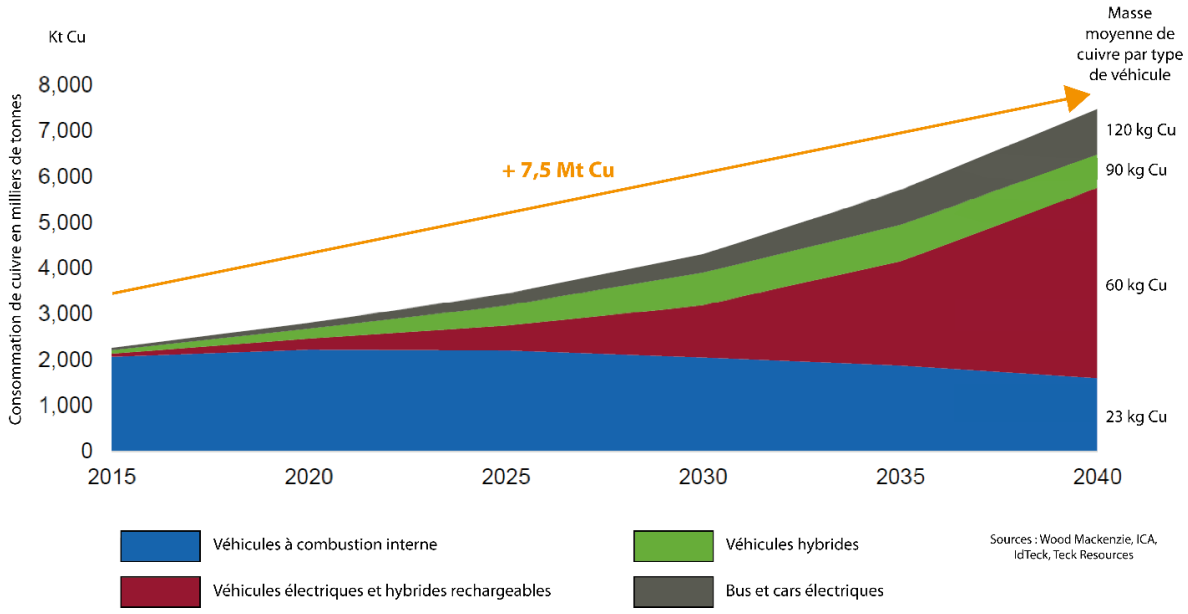


Figure 4 : Projection de la demande en cuivre par différents types de véhicules jusqu'en 2040.

Seat rapporte que la fabrication d'un véhicule électrique demande en moyenne 40 kg de cuivre pour la batterie, 10 kg pour le moteur, 20 kg pour le câblage basse tension, 5 kg pour le câblage haute tension et plus de 5 kg pour le reste des pièces.

Ces développements devraient donc consommer toujours plus de métaux et en particulier de cuivre. Les questionnements sur l'approvisionnement primaire et secondaire en cuivre commencent à émerger et font l'objet d'études toujours plus nombreuses.

3. Quelques fondamentaux sur la production de cuivre

Mathieu Leguérinel

3.1. LE CUIVRE PROVIENT DE GISEMENTS ET MINERAIS VARIÉS

Le cuivre est un métal relativement présent dans l'écorce terrestre puisque son abondance naturelle dans la croûte terrestre (Clarke) est de 60 ppm (parties par millions, soit 60 grammes par tonne). Il entre dans la composition de près de 600 espèces minérales dont les plus fréquentes sont les sulfures, les sulfosels, les sulfates et les oxydes (Tableau 1).

Familles	Minéraux	Formules chimiques	Teneur théorique en Cu (%)
Cuivre natif	Cuivre natif	Cu	~100
Sulfures	Chalcopyrite	$CuFeS_2$	34,63
	Chalcocite	Cu_2S	79,86
	Digénite	Cu_9S_5	78,11
	Covellite	CuS	66,47
	Bornite	Cu_5FeS_4	63,32
Sulfosels	Enargite	Cu_3AsS_4	48,41
	Série tennantite-tétraédrite	$Cu_{10}(Fe,Zn)_2(As,Sb)_4S_{13}$	40,82
Oxydes	Atacamite	$Cu_2Cl(OH)_3$	59,51
	Cuprite	Cu_2O	90,08
	Ténorite	CuO	79,89
	Chalcanthite	$CuSO_4.5H_2O$	25,45
	Antlérite	$Cu_3(SO_4)(OH)_4$	53,74
	Linarite	$PbCu(SO_4)(OH)_2$	15,85
	Malachite	$Cu_2(CO_3)(OH)_2$	45,21
	Azurite	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	55,31
	Libethenite	$Cu_2(PO_4)(OH)$	33,01
	Pseudomalachite	$Cu_5(PO_4)_2(OH)_4$	55,19
	Olivénite	$Cu_2(AsO_4)(OH)$	44,91

Tableau 1 : Les principaux minéraux du cuivre et leur composition.

Les gisements de cuivre sont très largement distribués autour du globe et sont de natures variées. Actuellement, ce sont les gisements de type porphyres qui assurent plus de 70 % de la production mondiale (Amérique du Sud, Indonésie). Cependant, d'autres catégories de gisements fournissent une part importante du cuivre mondial, dont les gisements sédimentaires (Pologne, Zambie, RDC) ou encore les gisements à fer-oxydes à cuivre et or (Australie) (Tableau 2).

Types de gisement	Part des ressources mondiales en cuivre estimées en 2017 (%)	Teneur moyenne en cuivre (%)	Exemples
Porphyres cuprifères	73,5	0,45	Chuquicamata (Chili), Bingham Canyon (USA), Grasberg (Indonésie)
Sédimentaires	9,2	1,52	Copperbelt (RDC-Zambie), lubin (Pologne)
IOCG (fer-oxydes à cuivre et or)	7,5	0,71	Olympic Dam et Prominant Hill (Australie), Candelaria (Chili)
Complexes ignés lités	4,2	0,29	Sudbury (Canada), Norilsk (Russie)
Skarns cuprifères	1,9	0,70	Copper Canyon (USA)
Volcano-sédimentaires (VMS)	1,6	0,78	District du Rio Tinto (Espagne)
SEDEX (sédimentaire-exhalatifs)	0,6	0,39	Broken Hill et Mount Isa (Australie), Red Dog (USA)
Epithermaux	0,3	0,18	Lepanto (Philippines), El Indio (Chili)
Autres	0,9	0,59	

Sources des données : S. Northay et al., 2017

Tableau 2 : Récapitulatif des principaux gisements de cuivre (S. Northay et al.*, 2017).*

Les descriptions des principaux types de gisements de cuivre sont largement dérivées du livre « Géologie des ressources minérales » de Jébrak et Marcoux publié en 2008.

3.1.1. Les porphyres cuprifères

Ce sont généralement des gisements à basse teneur et gros volume, associés à un système plutonique (intrusion magmatique) de faible profondeur (entre 1 et 5 km sous la surface) et situés initialement sous un volcan (aujourd'hui érodé ou non). La plupart de ces gisements sont localisés non loin des zones de subduction (Figure 5), que ce soient en contexte d'arcs insulaires (Indonésie, Philippines, Papouasie Nouvelle-Guinée) ou en contexte de cordillères continentales (Chili, Pérou, États-Unis).

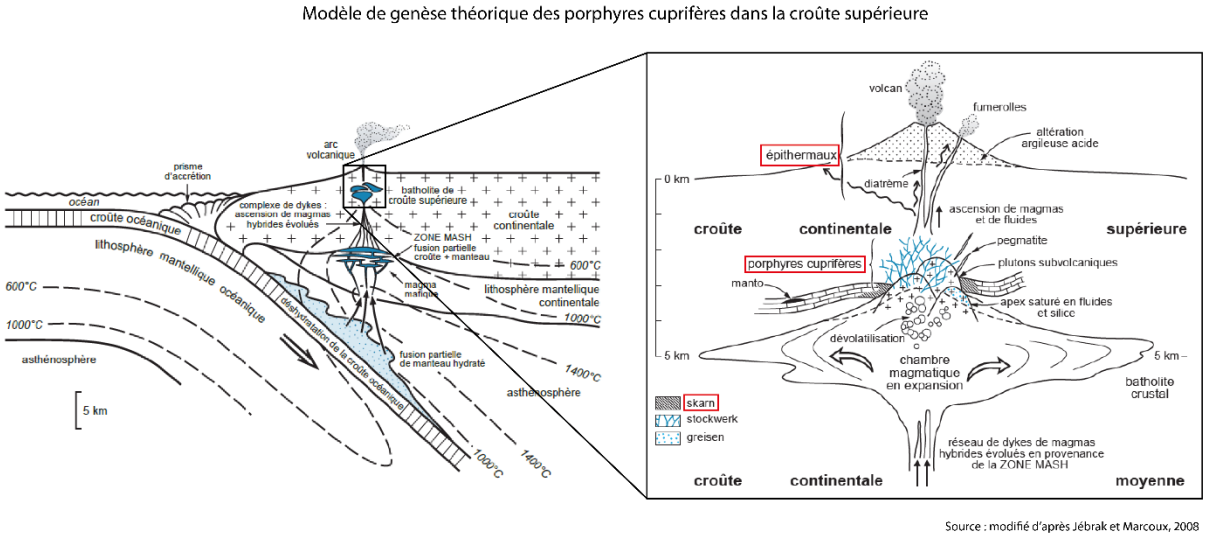


Figure 5 : Modèle de genèse des porphyres cuprifères (modifié d'après Jébrak et Marcoux, 2008).

Les teneurs d'exploitation sont relativement faibles et sont généralement comprises entre 0,2 et 1,5 % Cu, de 50 ppm à 5 000 ppm Mo et entre 0,07 et 1,3 ppm Au. L'exploitation, dans un premier temps à ciel ouvert ou « open pit » (Figure 6), y est toutefois possible du fait des énormes tonnages avec plusieurs millions de tonnes de cuivre (par exemple, le gisement de Chuquicamata au Chili représente plus de 10 milliards de tonnes de minerai, soit environ 60 Mt de cuivre contenu).

Figure 6 : La mine à ciel ouvert d'Escondida au Chili (© BHP).

La minéralisation y est de nature variée avec des stockwerks, filons, pipes bréchiques, disséminations etc. Elle se présente sous la forme de chalcopyrite, de bornite, de magnétite, de pyrite et parfois de molybdénite dans des fissures ou veinules de quartz. Dans la plupart des gisements, d'autres minéraux accessoires existent comme l'énargite, la digénite ou encore la tétraédrite. Ces minéralisations forment une zonation plutôt marquée avec du centre à la périphérie du pluton :

- zone interne avec pyrite disséminée et molybdénite. Cette zone possède une « coquille » appelée « ore shell », qui constitue la minéralisation, à pyrite-chalcopyrite-bornite-(magnétite) ;
- zone intermédiaire très riche en pyrite (« pyrite shell »), jusqu'à 10 % mais pauvre en cuivre ;
- zone externe généralement pauvre en minéralisation, à pyrite.

Dans certains cas, des filons à plomb, zinc et argent ou à des zones de remplacements et disséminations à or et cuivre sont associés à ces porphyres (Figure 7).

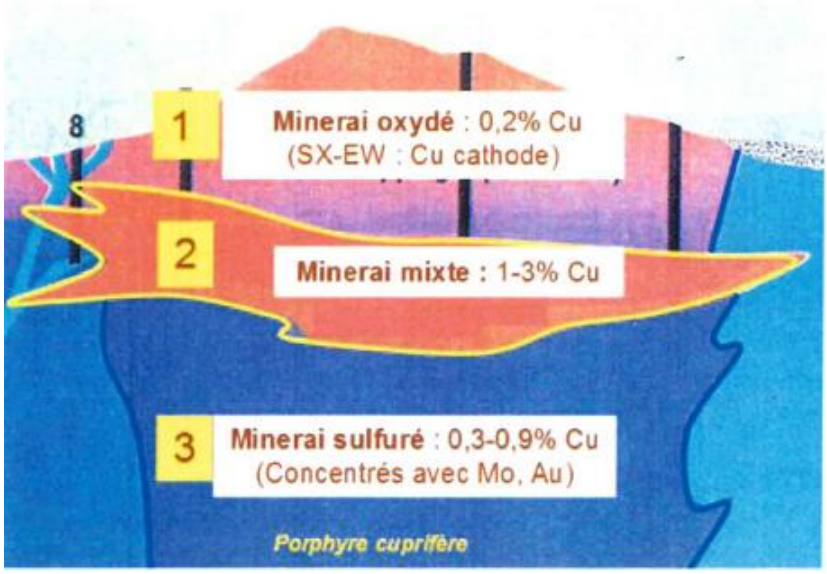


Figure 7 : Schéma simplifié d'un porphyre cuprifère.

Enfin, il existe plusieurs catégories de porphyres : les porphyres à cuivre-molybdène-or, les porphyres à or, les porphyres à molybdène et enfin les porphyres (et coupoles) à étain-tungstène.

3.1.2. Les gisements de cuivre sédimentaires

Ces gisements, sédimentaires syngénétiques et stratiformes, représentent entre 9 et 20 % des ressources mondiales de cuivre et sont bien répartis à l'échelle du globe. Ils ont été formés dans un milieu réducteur en bordure marine ou lagunaire, sous une couche d'eau plutôt faible et prennent place au sein de pélites et grès. Le cuivre se trouve principalement sous la forme de chalcocite, de covellite, de bornite, de chalcopyrite et de cuivre natif. Il existe deux grands groupes de gisements parmi cette catégorie : les shales cuprifères et les conglomérats et grès cuprifères ou « red bed » (non décrits dans le présent rapport).

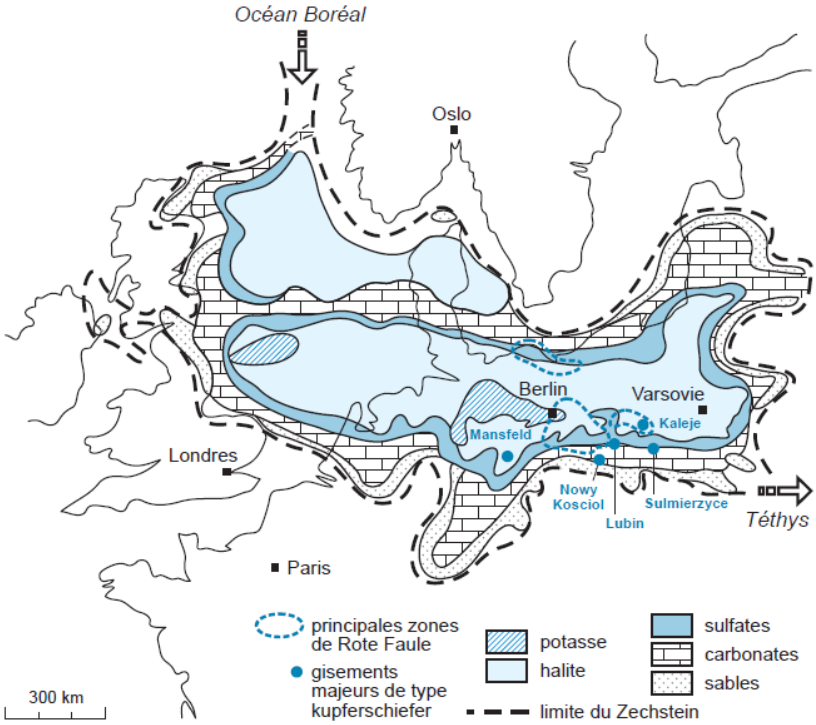


Figure 8 : Schéma figurant la limite du Zechstein et des gisements du Kupferschierfer associés (source : Jébrak et Marcoux, 2008).

Les shales cuprifères (Kupferschiefer en allemand) sont des niveaux concordants, formés non loin du littoral dans des bassins de sédimentation. Ce gisement se rencontre dans deux grandes provinces mondialement connues :

- le Kupferschiefer : mesurant environ 60 cm de puissance et constitué de shales bitumineux, calcareux ou dolomitique, cette province s'étale de l'Angleterre à la Pologne où il marque la transgression permienne du Zechstein (Figure 8). Ce niveau n'est exploitable que sur 0,2 % de sa surface, principalement sur sa bordure méridionale, en Allemagne (Mansfield) et en Pologne (Lubin) (Figure 9). En plus du cuivre, cette province fournit de nombreux autres métaux dont le plomb, le zinc, l'argent, l'or, le nickel, les platinoïdes, le rhénium, le cérium ou encore le vanadium ;

Figure 9 : La mine souterraine de Lubin en Pologne (© KGHM).

- la Copperbelt (ceinture cuprifère) : cette province s'étend sur plus de 700 km, du Katanga (en République Démocratique du Congo - RDC) au nord de la Zambie. Ce sont plus de 40 mines qui y exploitent, non seulement le cuivre, mais également le cobalt (2/3 du cobalt mondial), le nickel et l'uranium (Figure 10). Les niveaux minéralisés peuvent atteindre 10 m de puissance et contiennent le plus souvent les minéraux suivants : carrollite, pyrite, chalcopyrite, bornite et chalcocite. Étant donné la taille de la province, les minéralisations diffèrent selon les secteurs. Du côté de la RDC, les gîtes à cuivre-cobalt-uranium-nickel sont encaissés dans des séries dolomitiques, pélitiques et peu métamorphisées, tandis qu'en Zambie, plus du tiers des minéralisations se situent dans les grès et le reste dans des shales. La plupart du temps, le cuivre y est remobilisé en surface sous la forme d'oxydes de cuivre tels que la malachite, azurite, chrysocolle ou dioptase, avec un enrichissement marqué en cobalt (sous forme de carrollite).

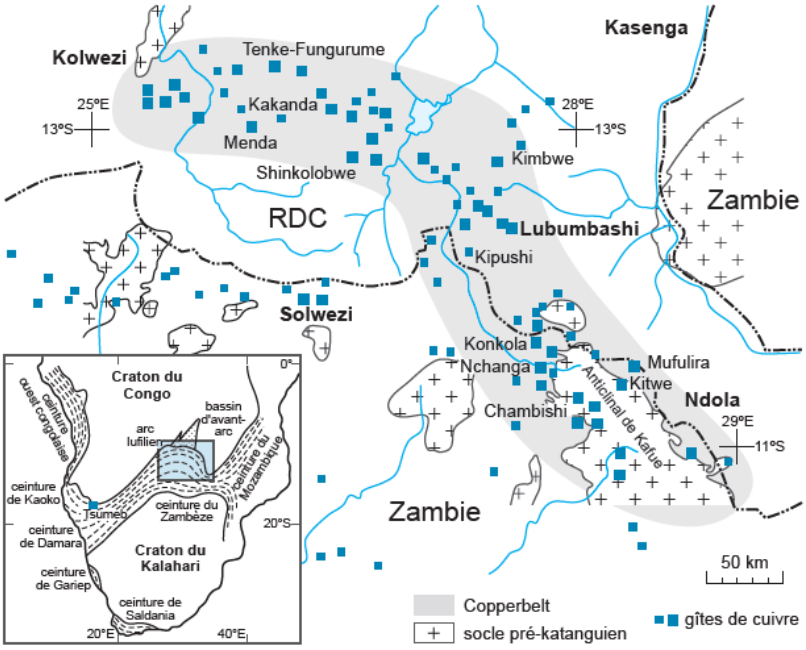


Figure 10 : Schéma simplifié de la Copperbelt et des gisements de cuivre associés (source : Jébrak et Marcoux, 2008).

3.1.3. Gisements d'oxyde de fer, cuivre et or (IOCG)

Ce type de gisement a été décrit il y a une trentaine d'années mais leur genèse reste encore mal connue. Comme leur nom l'indique, les IOCG (Iron-Oxide-Copper-Gold) renferment des minéralisations de fer, cuivre, or et parfois uranium. Il existe deux catégories d'IOCG : les gisements magmatiques de fer à magnétite (non décrits ici) et les gisements hydrothermaux de cuivre, or et parfois uranium, avec de nombreux oxydes de fer. Ces gisements peuvent être de classe mondiale (comme Olympic Dam en Australie) et représentent environ 7 % des ressources identifiées en cuivre dans le monde. Les gisements hydrothermaux sont associés à divers encaissants, volcaniques ou sédimentaires et la minéralisation est de nature bréchique (résultants de processus volcaniques, tectoniques ou de dissolutions hydrothermales). Le cuivre est présent sous la forme de chalcopyrite, pyrite, bornite et chalcocite, associé à d'autres minéraux dont des oxydes de fer (hématite ou magnétite) et pyrite.

3.1.4. Complexes ignés lités

Ces complexes sont de vastes intrusions magmatiques correspondant à des pulsions magmatiques différenciées, au sein de la lithosphère continentale. Ils sont représentés par quelques gisements célèbres comme le Bushveld (Afrique du Sud), le grand dyke du Zimbabwe (Zimbabwe), Sudbury (Canada) ou Norilsk-Talnakh (Russie) (Figure 11). À l'échelle mondiale, ils fournissent une part importante en chrome, en nickel, en cuivre, en platinoïdes, en vanadium et en or.

Ces gisements se mettent en place en contexte d'extension tout en profitant des zones de faiblesses de l'encaissant, ce qui leur donne une forme d'entonnoir ou allongée. Bien que chaque gisement possède ses particularités, ils sont généralement composés de plusieurs couches ou ensembles dont certaines contiennent des sulfures disséminés ou massifs et qui définissent les minéralisations à cuivre, nickel et platinoïdes (parfois également de la chromite).

Figure 11 : La mine souterraine de Norislk (Polar Division) appartenant à Nornickel (© Nornickel).

3.1.5. Skarns cuprifères

Les skarns sont des gisements très répandus dans le monde et ils fournissent une partie importante du tungstène, du cuivre, de l'or, du plomb, du zinc, ou encore d'étain mondial. Comme pour de nombreux gisements, il existe plusieurs catégories de skarns : skarns cuprifères, ferrifères, aurifères, tungstifères ou encore stannifères. Les skarns cuprifères, associés aux porphyres cuprifères (Figure 5), ont un tonnage bien supérieur aux autres skarns cuprifères (environ 100 Mt contre 2-30 Mt) mais des teneurs légèrement plus faibles (1 % Cu contre 1,5-2 % Cu). Ils sont souvent exploités en même temps que le porphyre, comme à Bingham Canyon (USA). La plupart des skarns se développent à proximité d'un pluton intrusif au sein de niveaux carbonatés. Le type de skarn va donc dépendre de la nature chimique du pluton et de celle de l'encaissant

3.1.6. Les amas sulfurés volcano-sédimentaires (VMS)

Les VMS pour « volcanogenic massive sulphide », ou amas sulfurés volcanogéniques, se forment avec le volcanisme sous-marin, le long d'une ride océanique (dorsale) ou sur les flancs de celle-ci (de quelques km à 1 000 km). Ils sont la résultante de la convection hydrothermale induite par le magmatisme (Figure 12). De manière générale, ces gisements sont composés d'un corps stratiforme sulfuré et d'un réseau de veines sulfurées qui représentent le chemin d'accès par lequel le fluide hydrothermal circule. En plus du cuivre, les VMS fournissent du zinc, du plomb et des métaux précieux comme l'or ou l'argent et parfois de l'étain ou du tungstène. En outre, ils ont été pendant longtemps une source de production de soufre.

Comme souvent, il existe plusieurs catégories de VMS, définies selon le contexte géodynamique :

- volcanisme mafique : zone d'accrétion de rift ou arrière-arcs intra-océanique, comme à Chypre, mis en place sous une épaisse tranche d'eau et riches en cuivre ;
- volcanisme bimodal : zone d'arc insulaire ou arrière-arc océan-continent, riches en cuivre et zinc, comme à Noranda (Canada) ou au Japon (Kuroko) ;
- volcanisme felsique : zone d'arrière-arc océan-continent, riches en or et cuivre, comme dans la province sud-ibérique (Espagne).

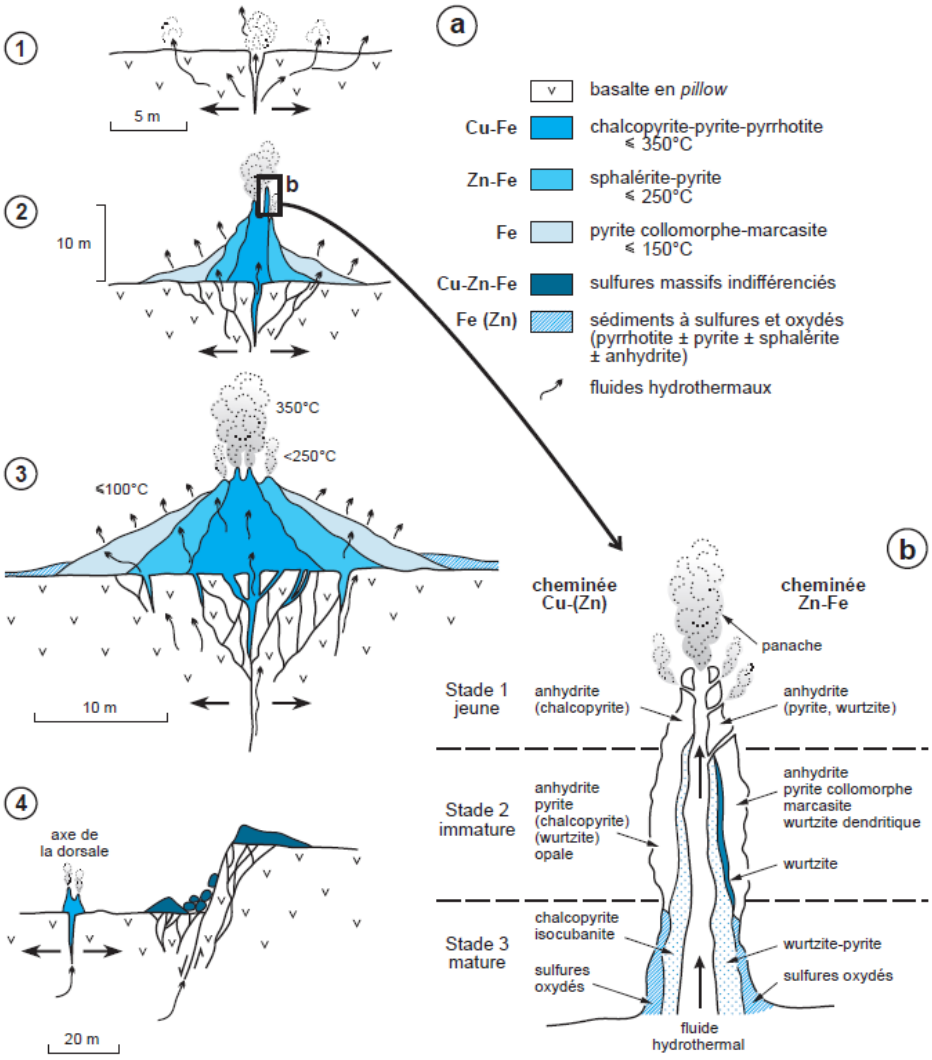


Figure 12 : Schéma de mise en place d'un gisement de type VMS (source : Jébrak et Marcoux, 2008).

La minéralogie, la teneur, le tonnage et la morphologie dépendent de nombreux facteurs dont la perméabilité, le type de volcanisme, la température, la profondeur ou encore la chimie de l'eau qui circule.

3.1.7. Les gisements exhalatifs sédimentaires (SEDEX)

Comme les VMS, les SEDEX (« SEDimentary EXhalative ») se forment aussi à proximité de centres volcaniques sous-marins. Toutefois, cette formation se fait après précipitation, dans l'eau de l'océan, des minéralisations contenues dans les fluides hydrothermaux, puis sédimentation sur le plancher océanique des environs avec les sédiments clastiques ou carbonatés qui vont former leur encaissant (avec parfois aussi des volcanites mafiques). Ces gisements produisent une part importante du plomb, du zinc ou de la barytine dans le monde. Ils sont également exploités pour le cuivre et l'argent (ainsi qu'or, cadmium, cobalt, et antimoine éventuels en sous-produits). Ils sont généralement situés à l'intérieur des bassins sédimentaires, dans des contextes de rifts continentaux (roches clastiques) ou de drift (roches carbonatées). Ils sont le plus souvent associés à des systèmes de failles normales syngénétiques et sont composés de plusieurs petits amas sulfurés stratiformes, contenant des sulfures, des sulfates, des oxydes et des carbonates. Les minéraux constituant la minéralisation sont la pyrite, la sphalérite (ZnS), la galène (PbS), la pyrrhotite (FeS), la tétraédrite, la chalcopyrite et l'arsénopyrite (FeAsS).

3.1.8. Épithermaux

Les épithermaux sont des gisements liés au volcanisme aérien, c'est-à-dire qu'ils se forment à une profondeur relativement faible (0-2 km) et sont encaissés dans des roches volcaniques et des roches volcano-sédimentaires. Ce type de gisement se rencontre surtout dans les arcs volcano-plutoniques, arcs insulaires et arcs de cordillère, généralement en aplomb des porphyres (Figure 5). Il existe classiquement deux catégories d'épithermaux : les épithermaux acides à or et cuivre, et les épithermaux neutres à or, argent et plomb-zinc (non décrits ici).

Les épithermaux acides sont formés dans des conditions de pH très faible par des circulations hydrothermales et sont situés à proximité des appareils volcaniques (les fumerolles acides de certains volcans felsiques en sont des exemples actuels). Bien qu'ils soient surtout exploités pour l'or, ces gisements contiennent de nombreux sulfures de cuivre dont l'énargite, la luzonite, la tennantite ainsi que la covellite, la bornite, la chalcopyrite et la digénite.

3.1.9. Autres

Il existe de nombreuses autres familles de gisements. Cependant, dont leur production ou leurs ressources estimées en cuivre sont anecdotiques ou non calculées, et qui ne seront donc pas décrites dans le présent rapport. Il s'agit entre autres des mantos, red-bed (déjà évoqué pour les gisements sédimentaires), les veines polymétalliques, les nodules polymétalliques, les carbonatites ou encore les gisements supergènes (cuivre natif, latérites).

3.2. LA PRODUCTION MINIÈRE MONDIALE EN HAUSSE CONTINUE DEPUIS 1900

3.2.1. Autant de cuivre produit en 23 ans que sur les 96 années précédentes

La croissance de la production minière mondiale est relativement constante depuis 1900, avec un Taux de Croissance Annuel Moyen (TCAM) de 3,2 % (Figure 13). Si au premier abord cela peut sembler peu, c'est en réalité bien plus inquiétant. L'humanité a extrait autant de cuivre sur les 21 dernières années (1998 à 2018) que sur les 98 années précédentes (1900 à 1997), soit environ 320 Mt de cuivre. Ce TCAM veut également dire que si cette croissance se poursuit, il faudra produire autant de cuivre sur les 22 prochaines années (entre 2019 et 2040) que ce qui a été produit entre 1900 et 2018, soit environ 640 Mt ! Si ce taux de croissance reste stable (ce qui est le cas depuis 1900), les enjeux futurs seront donc de taille pour le marché du cuivre.

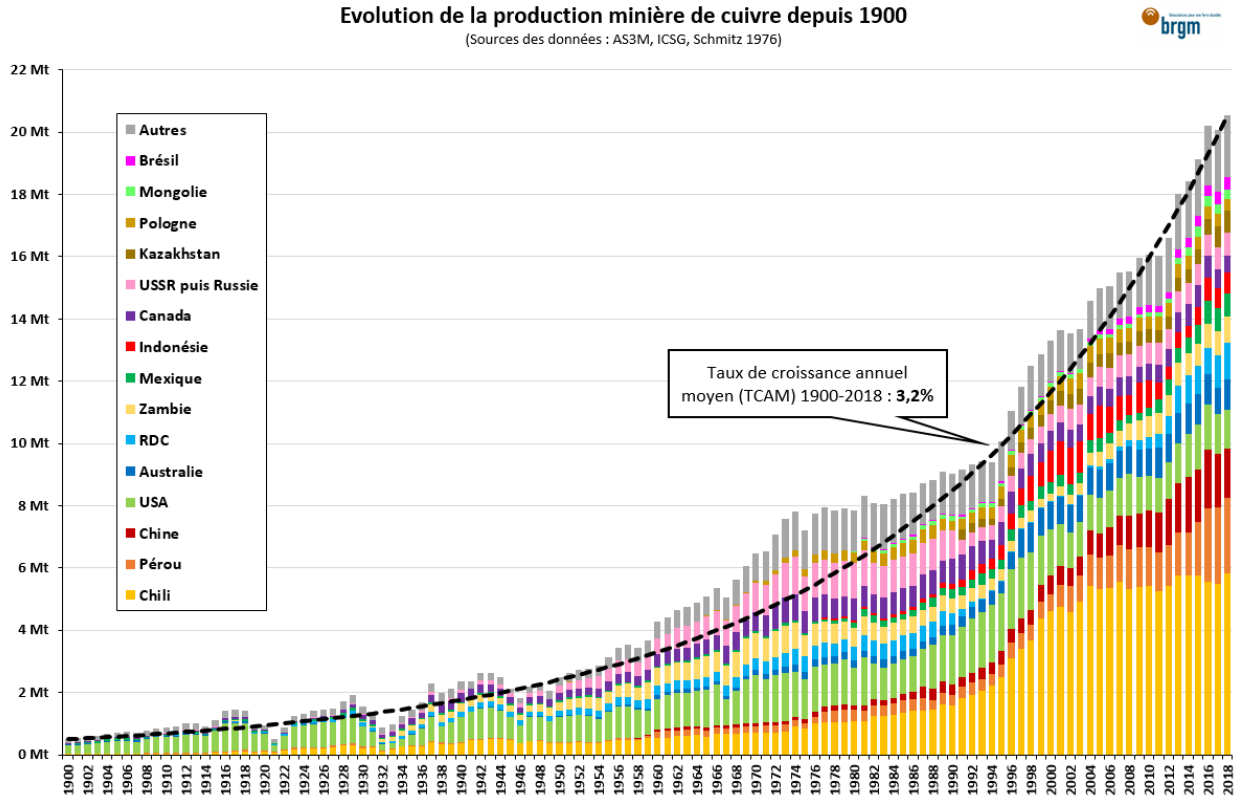


Figure 13 : Évolution de la production minière de cuivre depuis 1900.

En 20 ans, l'industrie du cuivre a bien évoluée. La production minière est passée de 14,7 à 20,5 Mt de cuivre, entrainant avec elle certains changements d'acteurs (Figure 14). Si elle reste dominée par le Chili, plusieurs États sont apparus sur le devant de la scène comme le Pérou, la RDC, la Chine ou le Mexique et ce, au détriment d'autres pays comme l'Indonésie, la Pologne ou, dans une moindre mesure, les États-Unis.

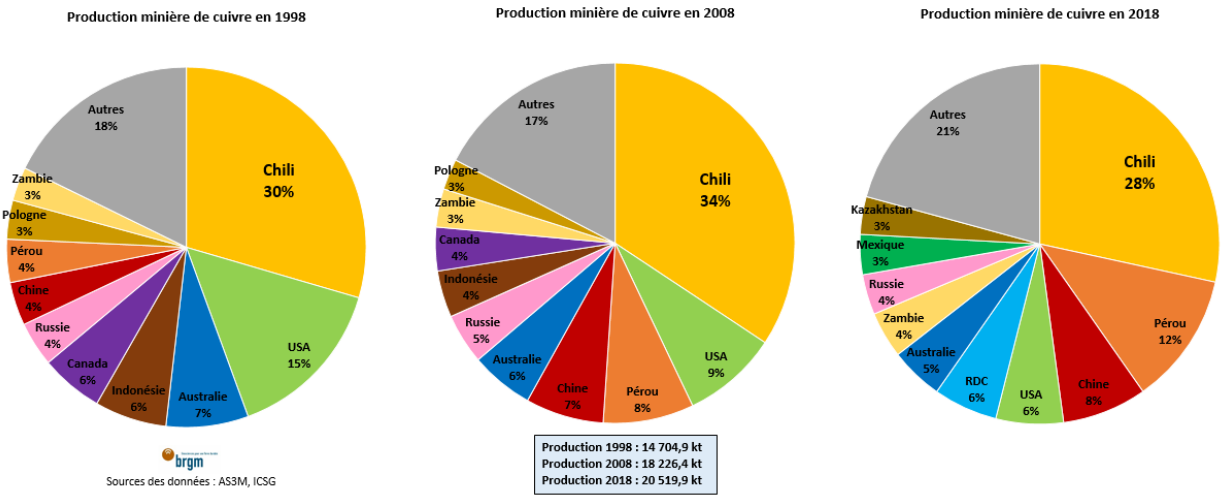


Figure 14 : Évolution des pays producteurs de cuivre, entre 1998 et 2018.

Néanmoins, l'industrie minière se retrouve face à de nombreuses contraintes qui contribuent aux tensions régulières sur ce marché. Cela concerne par exemple les difficultés de financement des nouveaux projets, la baisse des teneurs, les impuretés dans les minerais, les tensions géopolitiques, les contraintes environnementales et les éventuelles oppositions sociétales etc., dont certaines problématiques essentielles sont traitées dans le présent rapport.

3.2.2. Les 20 plus grosses mines produisent 40 % du cuivre mondial

La production minière est historiquement dominée par quelques grandes mines de cuivre. Les 20 mines les plus importantes représentent plus de 40 % de la production minière mondiale (Figure 15), et en particulier la mine d'Escondida au Chili exploitée par BHP et Rio Tinto qui produit à elle seule plus de 1,2 Mt Cu annuellement. À noter que sur ces 20 mines, 14 ont débuté leur production au XX^{e} siècle dont 6 avant 1975.

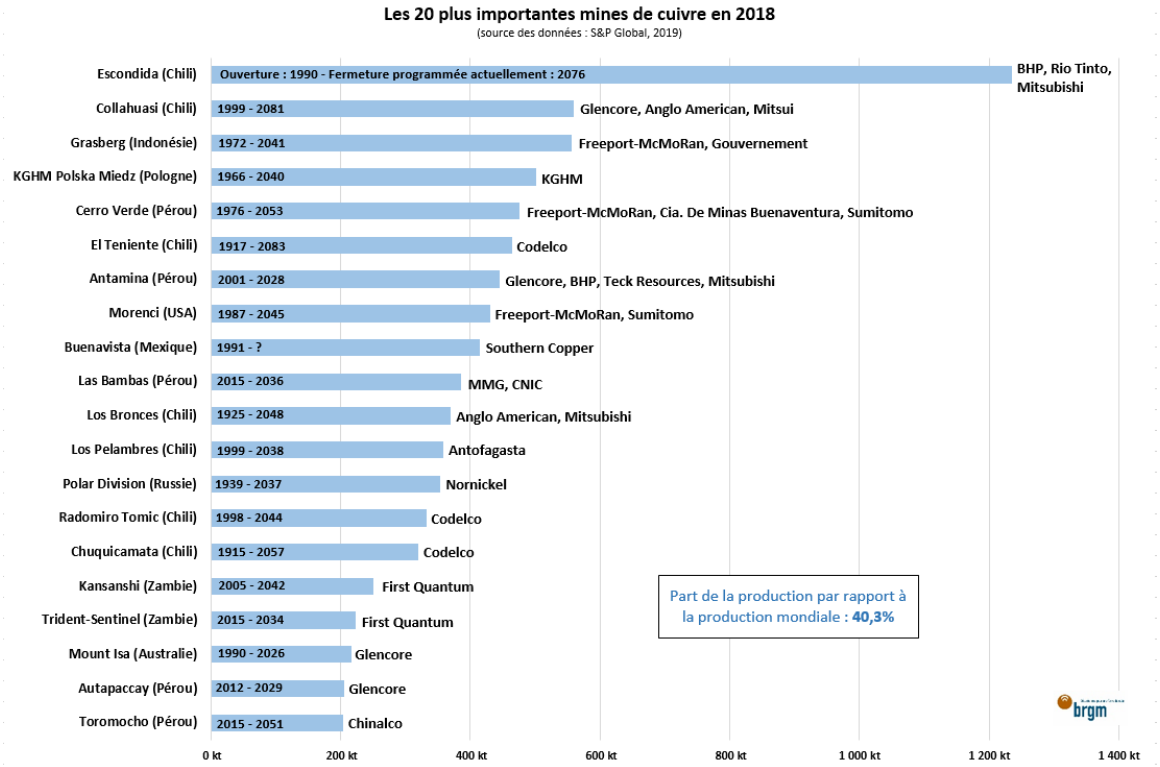


Figure 15 : Les 20 plus importantes mines de cuivre en 2018.

3.2.3. Les 10 plus grandes sociétés produisent un peu moins de la moitié du cuivre mondial

En 2018, les dix plus grosses sociétés contrôlaient 46 % de la production minière mondiale de cuivre, soit environ 9,5 Mt (Figure 16). Bien que l'entreprise étatique chilienne Codelco (Corporacíon Nacional del Cobre) produise à elle seule environ 9 % de la production mondiale, il n'existe pas de concentration excessive des acteurs dans ce secteur, comme il en existe sur le marché du fer ou des Terres Rares. Cependant, la plupart des sociétés sont des majors et leur capitalisation boursière s'élèvent à plusieurs milliards de dollars (au 02/08/19, les capitalisations boursières de BHP, Glencore et First Quantum atteignaient respectivement 102, 33 et 7,4 G$). La présence importante des majors peut en partie s'expliquer par le fait que seules ces sociétés soient capables de développer un gisement de type porphyre cuprifère, dont les coûts de développement (> 500 millions de dollars), de même que les coûts de gestion, sont gigantesques. De la même manière, les sociétés qui possèdent une forte intégration verticale (de la mine aux cathodes), comme la société Freeport-McMoRan, possèdent bien évidement certains avantages comme un coût opérationnel réduit.

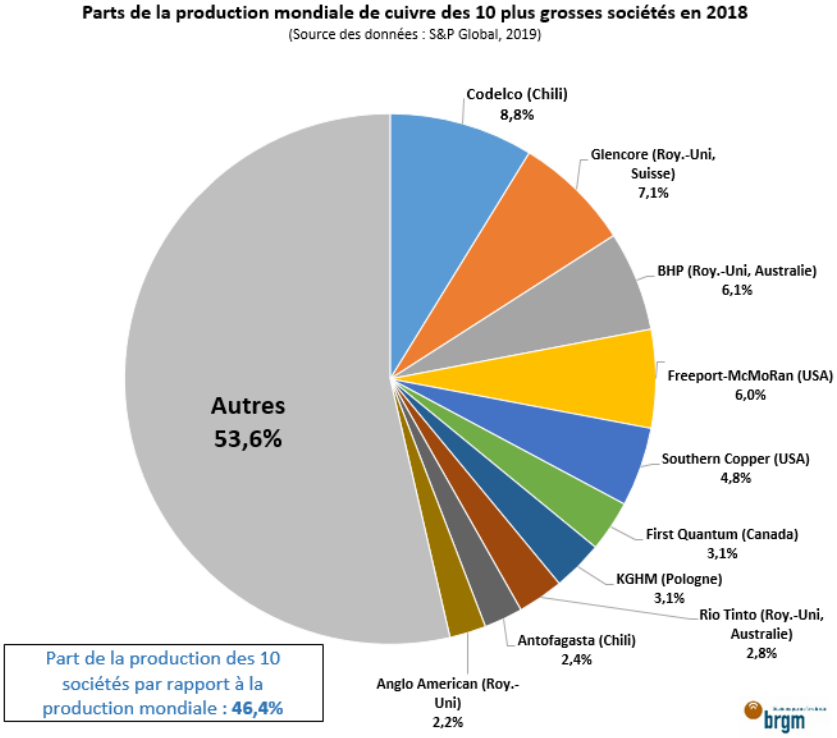


Figure 16 : Répartition des principales sociétés productrices de concentrés cuivre en 2018.

3.3. UNE PRODUCTION MÉTALLURGIQUE MONDIALE EN MUTATION

Le terme anglo-saxon « smelter » est quelque peu ambivalent. Certains auteurs l'assimilent uniquement à la partie fonderie tandis que d'autres évoquent en plus la partie raffinerie. Pour éviter les ambiguïtés, voici pour rappel quelques définitions et équivalents anglais, qui seront utilisées pour la suite du rapport.

Dans le présent rapport, il a été convenu de définir le terme raffinage comme le fait de purifier un élément métallique de manière générale, du concentré à la cathode. Le procédé du raffinage peut être séparé en deux étapes, la fusion et l'affinage. L'étape de fusion débute avec les grillages des concentrés jusqu'à l'obtention des blisters, avec modification de la chimie de la matière utilisée suivant les opérations. L'étape d'affinage consiste simplement à purifier le métal, des blisters jusqu'aux cathodes, sans que la chimie des composés ne change.

3.3.1. Les procédés utilisés dépendent du type de minerai

Il existe deux types de minerais : les minerais sulfurés et les minerais oxydés (Figure 17).

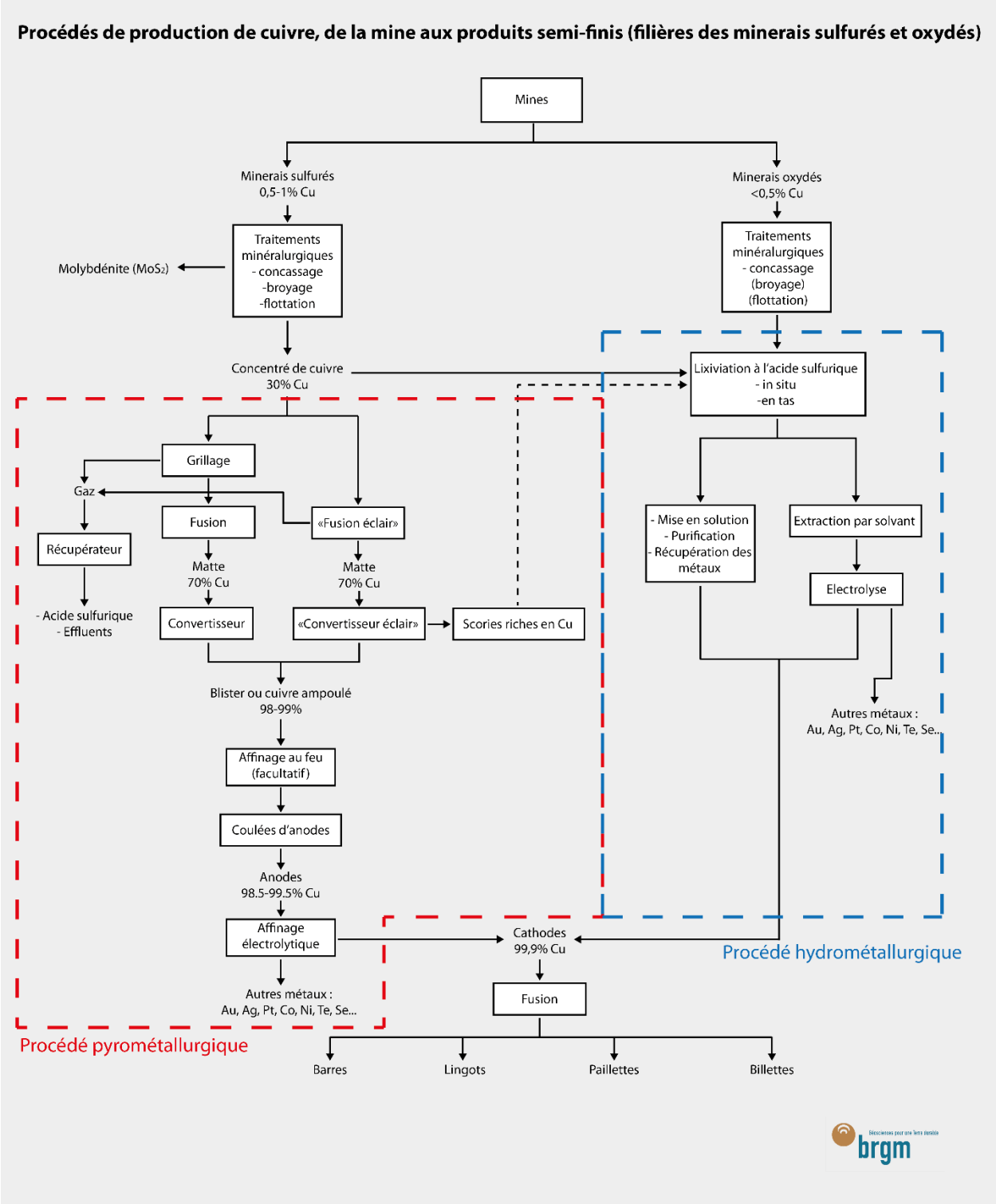


Figure 17 : Schéma simplifié des procédés de production de cuivre : filières des minerais sulfurés et oxydés.

Les minerais sulfurés proviennent essentiellement de gros gisements à faible teneur : les porphyres cuprifères. Ils sont majoritairement exploités à ciel ouvert (« open-pit »), principalement sur la bordure ouest du continent américain et en Asie du Sud-Est. Ces minerais, titrant généralement entre 0,5 et 1 % Cu, subissent des traitements minéralurgiques (concassage, broyage et flottation) sur le même site de production pour obtenir un concentré de cuivre à environ 30 % Cu. La majorité de ce concentré va ensuite être traité par des procédés pyrométallurgiques (fonderie et affinage) pour donner tout d'abord un « blister » ou cuivre ampoulé (98-99 % Cu) puis des anodes après coulage dans un moule d'environ 300 kg et enfin des cathodes de 8 kg (99,9 % Cu) (Figure 18).

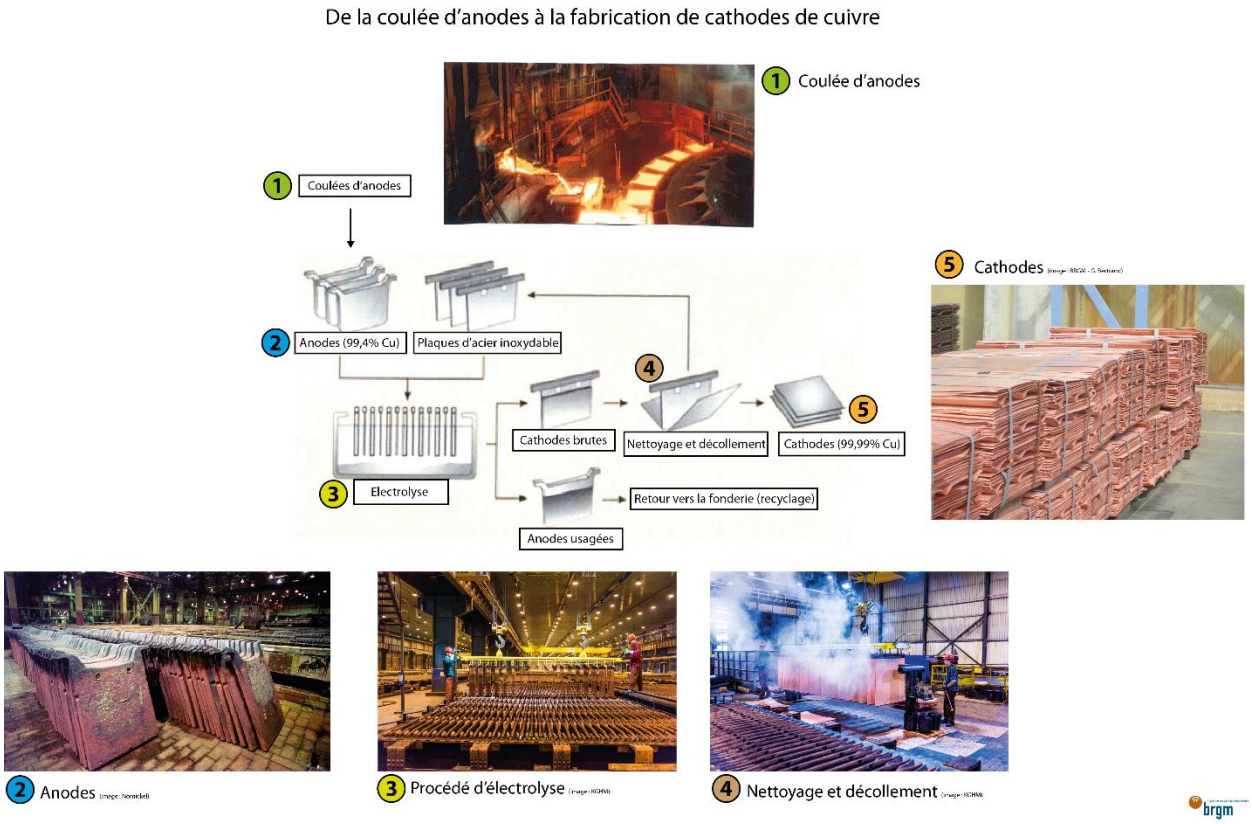


Figure 18 : Schéma du passage des anodes aux cathodes de cuivre.

Les minerais oxydés correspondent le plus souvent à la partie superficielle (supergène) des gisements sulfurés (porphyres, skarn etc.). Ces minerais sont la plupart du temps issus d'une altération en surface des gisements primaires sulfurés, créant du même coup des conditions acides favorisant le transport puis le dépôt du cuivre. En plus des oxydes de cuivre, ces minerais sont également constitués de carbonates, de phosphates, de sulfates, d'arséniates, de silicates ou encore de cuivre natif. Il s'agit généralement de minerais à faible teneur (voire très faible) mais ils restent économiques du fait de leur accessibilité en surface et de leur faible coût de traitement. En effet, ce type de minerai ne nécessite pas toujours de broyage ou de flottation et le coût du traitement hydrométallurgique par lixiviation à l'acide sulfurique (in situ ou en tas) est relativement peu élevé. Le cuivre est ensuite extrait par la méthode solvant-électrolyse (ou SX-EW pour « Solvent Extraction – ElectroWinning ») pour obtenir des cathodes titrant 99,9 % Cu. Le coût de l'acide sulfurique est déterminant dans la rentabilité de ces projets, qui couvrent environ 20 % du cuivre produit mondialement chaque année.

Les cathodes obtenues par les deux procédés, d'une teneur minimum de 99,9 % Cu, servent de produit de référence pour la cotation sur les marchés boursiers tels que le LME (London Metal Exchange) ou le SHFE (Shanghai Futures Exchange). Ces cathodes subissent ensuite une fusion pour former des produits semi-finis comme des barres, des lingots, des paillettes ou des billettes.

Malgré la hausse de la production minière chaque année, la répartition des filières de traitement reste relativement stable (Figure 19). La production de concentrés de cuivre (filière pyrométallurgique) reste aux alentours des 80 % tandis que la production de cuivre produit par solvant-électrolyse (filière hydrométallurgique) stagne à 20 % de la production totale de cuivre, selon les chiffres de l'ICSG.

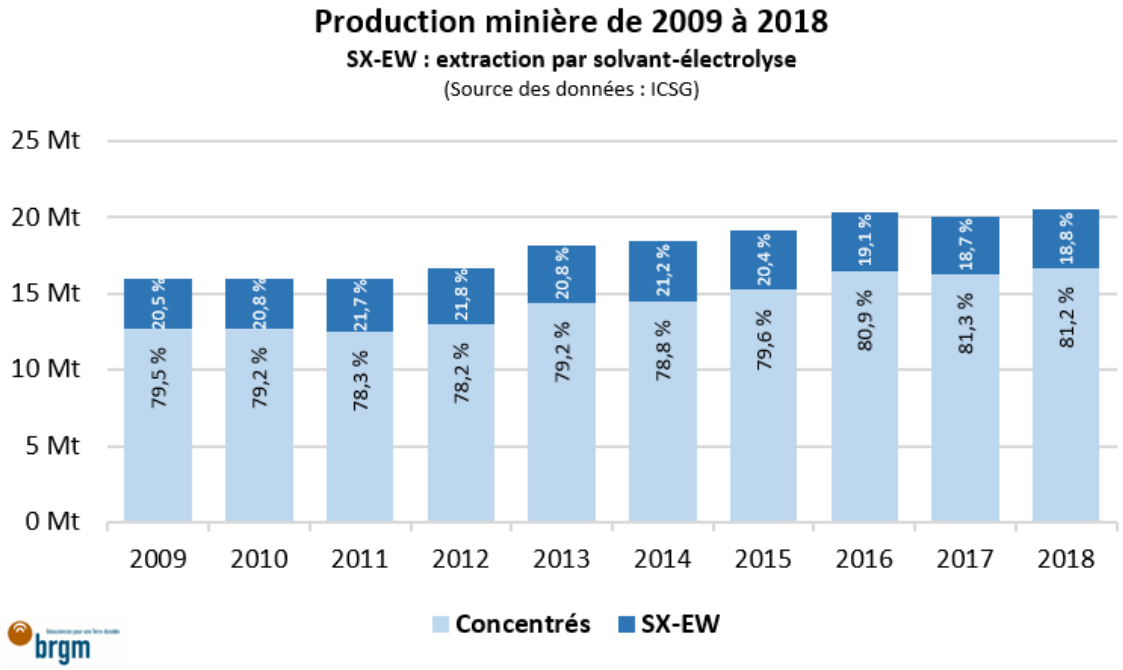


Figure 19 : Production minière de cuivre en fonction du procédé choisi : concentrés-pyrométallurgie ou hydrométallurgie-SX-EW.

3.3.2. Les smelters dans le monde

Sur les 57 fonderies renseignées dans les bases de données de l'ICSG en 2016 (représentant environ 88 % des capacités mondiales de production de blisters de cuivre), 16 se trouvent en Chine, 7 au Chili et 5 au Japon. Les autres fonderies se situent en Europe (9), en Amérique du Sud hormis en Chili (8), en Asie hormis en Chine et au Japon (5). Le reste du monde en possède 7.

Alors que le Chili détenait encore 13 % des capacités de fusion-affinage en 1990, ce chiffre est descendu à 8 % en 2016 et devrait encore continuer à décroître pour atteindre 5 % en 2030 et ce, au profit des capacités chinoises qui ne cessent de croître (31 % des capacités en 2016, 43 % en 2030) (Figure 20).

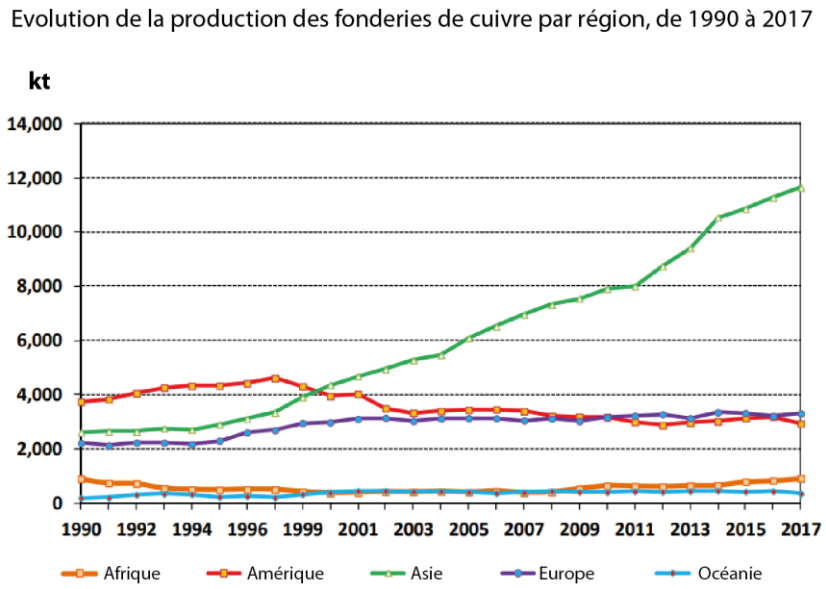


Figure 20 : Évolution de la production des fonderies de cuivre par région, de1990 à 2017 (source : ICSG, 2018).

La Chine domine largement la production de blisters de cuivre et a produit 8 Mt en 2018, sur un total mondial annuel de 19,5 Mt (Figure 21). La Chine possède 6 des 20 fonderies les plus importantes (en capacité) dans le monde, dont celle de Guixi, appartenant à la société Jiangxi Copper Corp., qui affiche une capacité de 900 kt par an (Tableau 3).

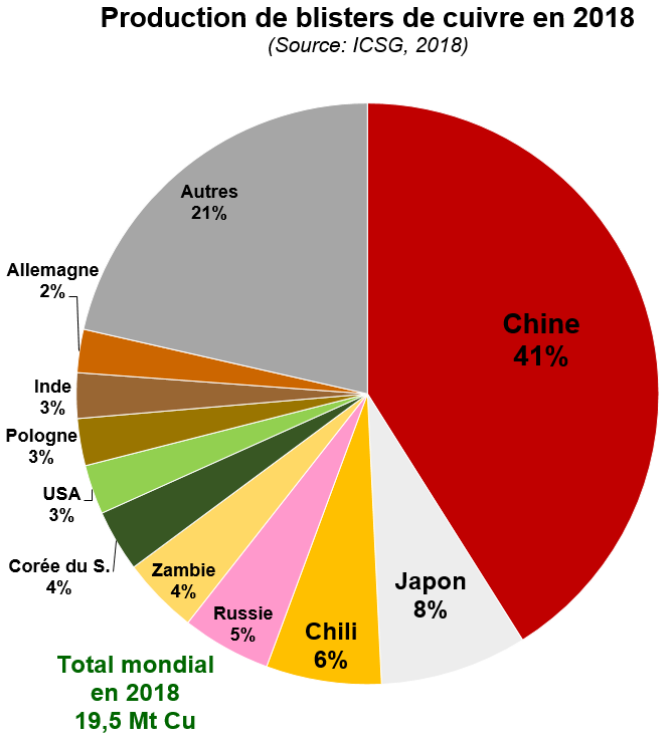


Figure 21 : Production mondiale de blisters de cuivre en 2018.

Nom	Pays	Compagnie	Capacité (kt)
Guixi	Chine	Jiangxi Copper	900
Birla Copper	Inde	Birla Group (Hidalco)	500
Chuquicamata	Chili	Codelco	450
Hamburg	Allemagne	Aurubis	450
Besshi/Ehime	Japon	Sumitomo	450
Saganoseki/Ooita	Japon	Pan Pacific Copper	450
Caletones	Chili	Codelco	400
Jinchuan 1	Chine	Jinchuan Non-Ferrous	400
Jinchuan 2	Chine	Jinchuan Non-Ferrous	400
Jinguan	Chine	Tongling Non-Ferrous	400

Sources des données : ICSG, 2018

Tableau 3 : Les 10 fonderies les plus importantes en 2018.

Le tiers des dépenses des fonderies concerne l'énergie (électricité et carburant) tandis que le reste des coûts est réparti entre la main d'œuvre, les frais divers, les réparations et les consommables. À l'inverse, les recettes se réalisent sur quatre composantes : le TC/RC[3], le métal libre ou « free metals », les premiums et les éventuels sous-produits (Figure 22).

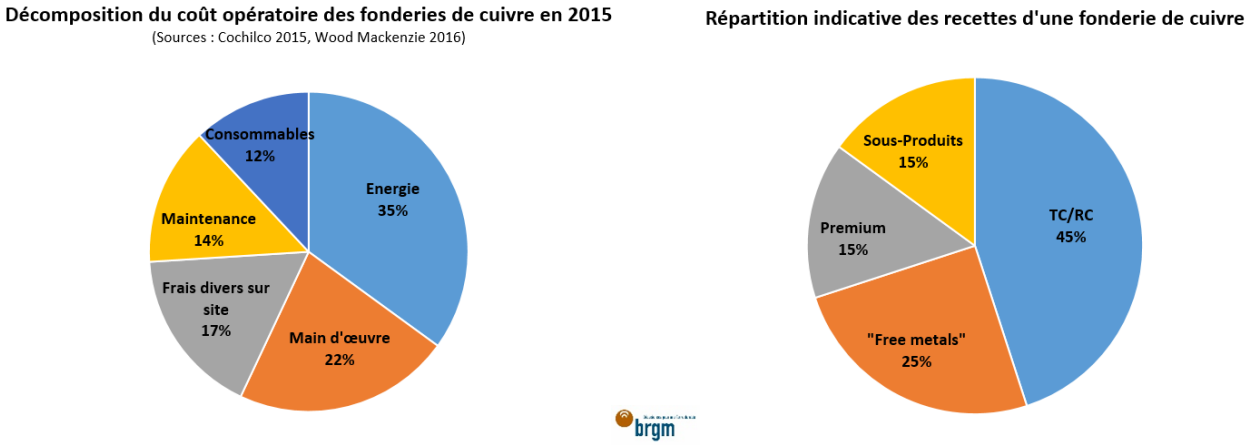


Figure 22 : Répartitions du coût opératoire et des recettes des fonderies de cuivre en 2015.

a) Note sur les relations entre mines, fonderies et raffineries

Pour la plupart des métaux de base, les seuls prix référencés sont ceux du métal raffiné (99,99 %), et non des produits intermédiaires (concentrés, blisters, anodes). Il existe donc des mécanismes pour coter les prix, pour en comprendre les fluctuations et pour permettre aux opérateurs de commercer entre eux plus facilement. Les quelques notions ci-dessous permettent simplement de dégrossir la compréhension et ne sauraient être exhaustives pour décrire les mécanismes entre les mines, les fonderies et les raffineries.

[3] Treatment Charge / Refining Charge ou charges de fusion – affinage, voir page suivante pour plus de détails

- *Fixation des prix entre mineurs et fondeurs*

Les fonderies paient en général pour environ 96 % du cuivre contenu dans les concentrés de cuivre (30 % Cu dans la plupart des concentrés), avec un prix basé sur celui du LME.

Par exemple, la valeur d'un concentré de cuivre à 30 % serait actuellement de : 30 % x 96 % x 5 700 $/t = 1 642 $/t.

À ce prix de base peut être ajouté un supplément pour des éléments valorisants contenus dans le concentré (Au, Ag etc.), au-delà d'un certain seuil. Le fondeur peut payer pour 97,5 % de l'or contenu et 90 % de l'argent contenu.

Il existe également des déductions sur les prix d'achats comme le **TC/RC** (« Treatment Charge/Refining Charge » ou charges de fusion-affinage) ou encore le **coût de participation** (« PP pour Price Participation ») et les **pénalités**. Ces facteurs sont négociés annuellement entre les miniers et les fondeurs-affineurs. Les négociations débutent régulièrement en octobre et se terminent en fin d'année. La publication des résultats se fait dans certaines revues ou sites spécialisés comme Metal Bulletin (Fastmarkets). Le TC s'exprime en US$/t de concentré de cuivre tandis que le RC s'exprime en livre de cuivre payable. Il existe également des RC pour les élements valorisants comme l'or ou l'argent. En cas de pénurie de concentrés de cuivre sur le marché, les TC/RC baissent du fait de la compétition entre les fondeurs/affineurs pour acquérir du concentré afin de faire tourner les usines. À l'inverse, si la production minière a été importante, cela bénéficie aux fondeurs et aux affineurs qui peuvent augmenter leur TC/RC. Quant au mineur, n'étant plus en position de force, il doit écouler ses concentrés.

Parmi les déductions prises en compte entre les mineurs et les fondeurs, les déductions portant sur les élements pénalisants jouent un rôle important. Dans le cas du cuivre, des pénalités peuvent être appliquées si les concentrés contiennent plus de 0,2 % As, plus de 5 ppm d'Hg ou encore plus de 0,1 % Bi.

- *Revenus des fonderies*

Les revenus d'une fonderie se répartissent généralement en quatre catégories (Figure 22) : le TC/RC déjà évoqué plus haut, le métal libre ou « free metals », les premiums et les éventuels sous-produits :

- **free metals** : la quantité de métal livré va dépendre de la teneur en cuivre du concentré, du montant payé pour l'achat du concentré et la quantité de cuivre récupérable.

  Par exemple, sur 1000 t de concentré de cuivre à 30 % acheté par le fondeur au mineur, la quantité de cuivre est donc de 300 t (1000 t x 30 %). Comme vu plus haut, le fondeur paie pour 96 % du cuivre contenu soit 288 t (300 t x 96 %). Or, le fondeur a un rendement de 98 % soit 294 t (300 t x 98 %). La quantité de métal libre est donc de 6 t (294 t – 288 t) pour 1000 t de concentré acheté initialement ;

- **premiums** : ils correspondent à un supplément facturé aux clients qui va dépendre de la situation offre-demande, de la qualité du produit demandé ou de la valeur ajoutée qu'en tirera le client. Les premiums sont finalement comme une commande spéciale négociée annuellement mais basée sur les prix du LME ;

- **sous-produits** : le principal sous-produit d'une fonderie de cuivre est l'acide sulfurique produit lors des étapes de grillages et fusion. En moyenne, il est produit 2,7 t d'acide par tonne de cuivre traitée. Cet acide pourra être vendu pour les industries de la chimie, de la mine ou des fertilisants. Pour les raffineries, les sous-produits vont être les métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd), le cobalt, l'antimoine, le nickel, le tellure, le sélénium etc..

3.3.3. Les raffineries dans le monde

Tout comme la fabrication de blisters, la production de cuivre raffiné sous forme de cathodes est largement dominée par la Chine (9,2 Mt), qui produit en 2018 quasiment 40 % du total mondial évalué à 24,1 Mt (Figure 23).

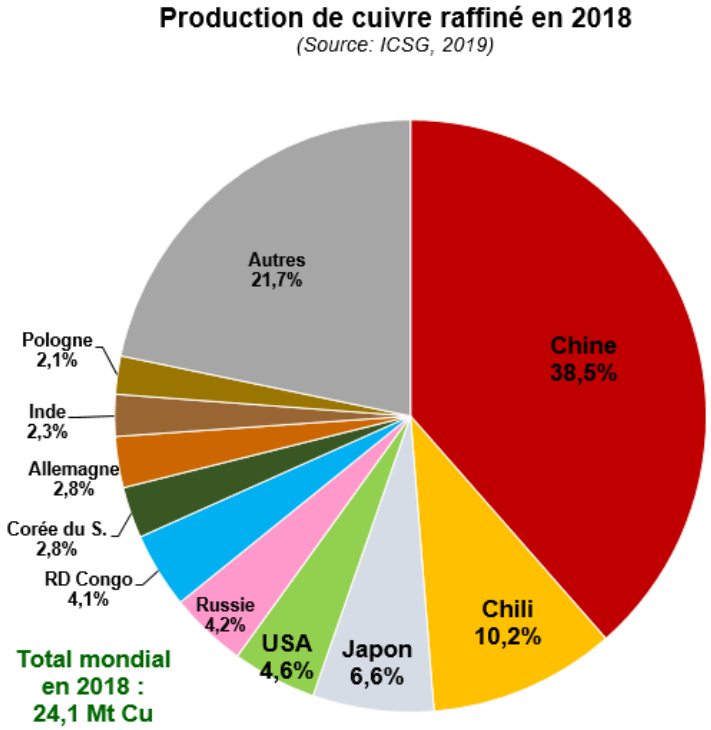


Figure 23 : Répartition de la production de cuivre raffiné en 2018.

Comme pour les fonderies, la Chine possède 9 des 20 plus grandes raffineries (en capacité) dont la raffinerie de Guixi (Jiangxi Copper Corp.) avec une capacité évaluée à 1 Mt Cu (Tableau 4).

Nom	Pays	Compagnie	Capacité (kt)
Guixi	Chine	Jiangxi Copper	1000
Jinchuan	Chine	Jinchuan Non-Ferrous	650
Daye/Hubei	Chine	Daye Non-Ferrous	600
Yunan Copper	Chine	Yunnan Copper Industry	500
Birla	Inde	Birla Group (Hidalco)	500
Pyshma Refinery	Russie	UMMC	460
Besshi/Ehime	Japon	Sumitomo	450
Amarillo	USA	Grupo Mexico	450
Chuquicamata	Chili	Codelco	450
Onsan Refinery 1	Corée du S.	LS-Nikko Co	415

Sources des données : ICSG, 2018

Tableau 4 : Les 10 raffineries les plus importantes en 2018.

Les cathodes de cuivre peuvent être produites à partir de cuivre primaire (filière mine pyrométallurgique ou filière mine hydrométallurgique) et de cuivre secondaire (filière recyclage) (Figure 24). Selon les pays, il existe donc des différences importantes dans les

sources de production du cuivre raffiné. Par exemple, la RDC ne produit quasiment pas de blisters de cuivre mais a produit 897 kt de cuivre raffiné, dont 862 kt par la méthode SX-EW (hydrométallurgie) et 35 kt issues du recyclage. À l'inverse, le Chili a produit en 2018 1,5 Mt de cuivre raffiné via la méthode SX-EW et 0,9 Mt par la filière pyrométallurgie, mais n'a pas utilisé de cuivre recyclé.

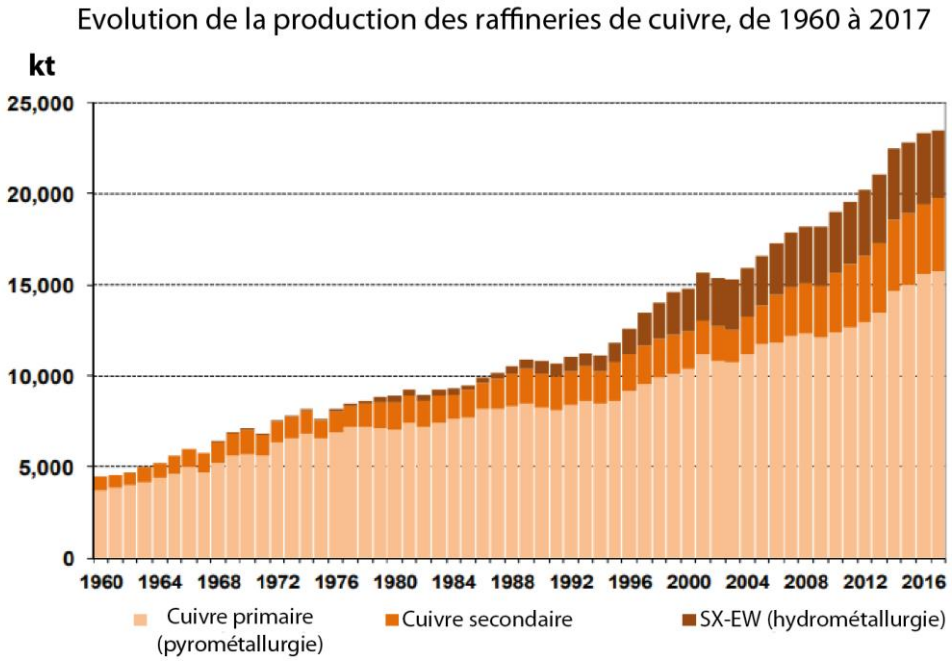


Figure 24 : Évolution de la production des raffineries de cuivre de 1960 à 2017 (source : ICSG, 2018).

3.4. ÉTAT DES RESERVES ET RESSOURCES

3.4.1. Définitions

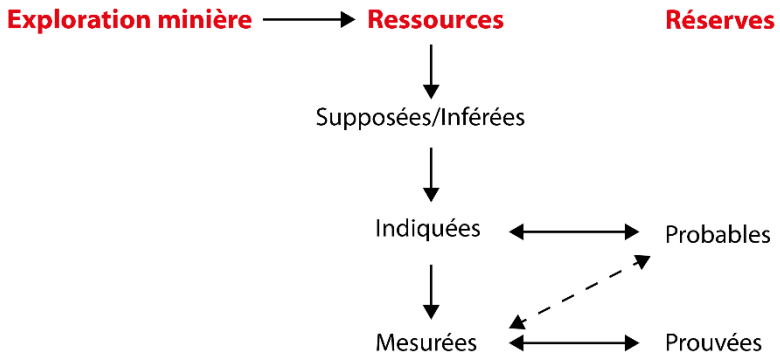
La notion de ressource renvoie à une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de prospections en surface, de sondages ou encore de petits travaux miniers. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction des travaux réalisés (la notion géologique prime).

Les réserves renvoient à la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité (la notion économique prime). (Figure 25).

L'évolution des ressources en réserves, et vice versa, dépend de plusieurs facteurs dont certains sont listés ci-dessous de manière très simplifiée :

- le type de gisement ;
- les progrès techniques : de nouveaux équipements ou procédés peuvent permettre d'exploiter à un coût raisonnable des minerais ou zones initialement non rentables ;
- les paramètres techniques d'exploitation : un même corps minéralisé pourrait être économiquement rentable en surface (« open-pit ») mais non rentable en profondeur car les coûts d'exploitations sont plus élevés en souterrain ;

- la variation des cours des métaux : une hausse des prix permet en général d'exploiter un gisement à des teneurs plus faibles, ce qui engendre logiquement une augmentation des réserves.



		Ce qui est connu	
Ressources : quantité absolue de matière dans le gisement, qu'elle soit accessible ou non. C'est une notion géologique avec une faible connotation économique	**Supposées/inférées**	Tonnage, teneur et minéraux	Confiance
	Indiquées	Métal, teneur, tonnage, forme densité, propriété physique	
	Mesurées	Idem précédent mais par une personne compétente	
Réserves : minerai réellement accessible avec les technologies disponibles et pouvant être exploité avec profit ; c'est une notion économique qui tient compte de la géologie, économie, exploitation et traitement.	**Probables**	Ressources indiquées (parfois mesurées) qui peuvent être extraites de manière rentable.	Confiance
	Prouvées	Idem précédent mais ressources seulement mesurées.	

Figure 25 : Définitions des notions de ressources et réserves selon l'approche CRIRSCO.

La classification la plus utilisée est celle du CRIRSCO. Elle regroupe les codes australien (JORC), canadien (CIM, Ni 43-101), sud-africain (SAMREC), européen (PERC), américain (SME – SEC IG7), chilien et chinois. D'autres systèmes de classification existent aussi comme celui des Nations Unies ou de la Russie (GKZ).

3.4.2. Les ressources mondiales

Les ressources mondiales en cuivre contenu sont évaluées par l'USGS à environ 2 000 Mt pour les continents et environ 700 Mt pour les ressources maritimes (nodules, encroutements, fumeurs etc.). À ces ressources identifiées s'ajoutent les ressources potentielles, c'est-à-dire celles qu'il reste à découvrir après exploration minière. Ces ressources sont estimées à environ 3 500 Mt Cu (Figure 26). L'USGS définit ce type de ressources de la manière suivante : « ressources minérales potentiellement existantes, mais pour lesquelles le lieu, la teneur, la qualité et la quantité ne sont pas définis par des preuves géologiques ». La majorité de ces ressources hypothétiques proviennent des porphyres cuprifères (3 100 Mt) puis des gisements sédimentaires (420 Mt). L'USGS a donc choisi de ne pas vraiment prendre en compte les autres types de gisements (certes de moindre importance d'un point de vue quantitatif).

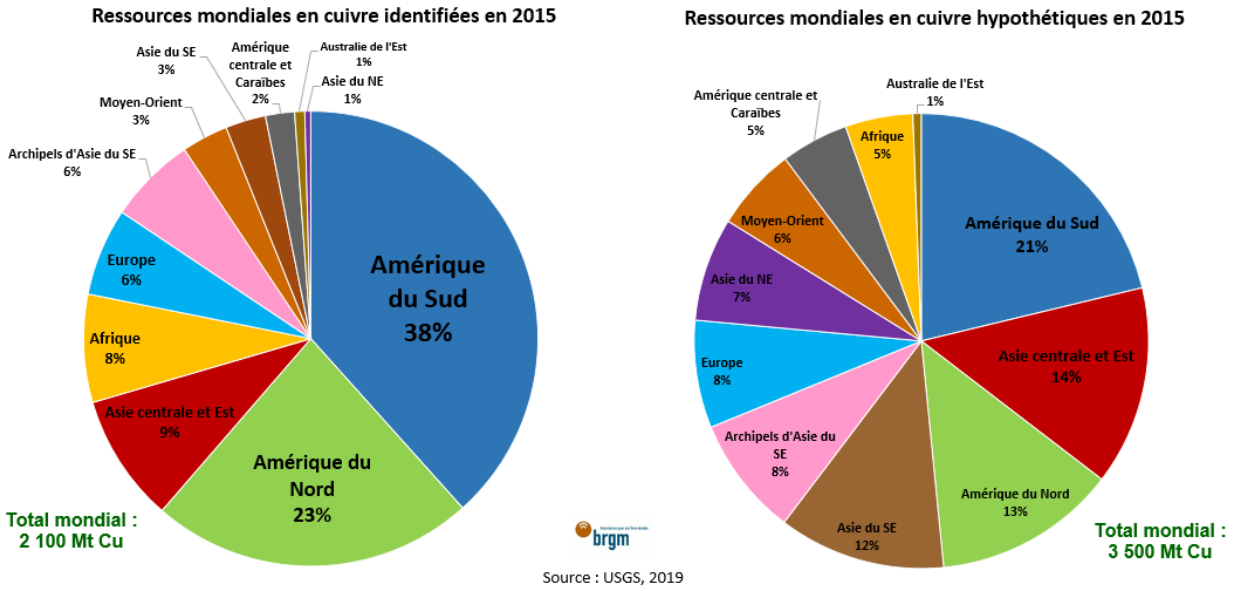


Figure 26 : Répartition des ressources mondiales en cuivre, identifiées (gauche) et hypothétiques (droite) en 2015.

3.4.3. Les réserves mondiales

En 2018, les réserves mondiales de cuivre ont été évaluées par l'USGS à 830 Mt dont 21 % rien qu'au Chili. D'autres pays possèdent dans leur sol de grandes quantités de cuivre dont l'Australie, le Pérou, la Russie, l'Indonésie, le Mexique ou encore les États-Unis (Figure 27). À noter que la Chine, qui est le 3e producteur minier mondial de cuivre, ne possède que 3 % des réserves mondiales.

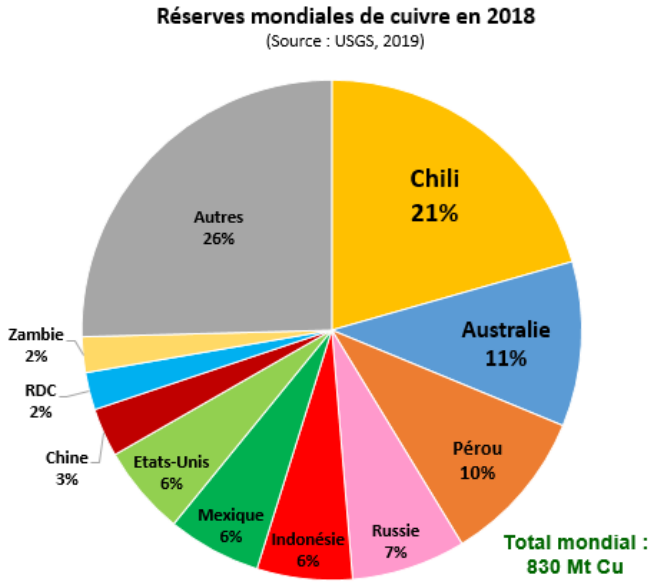


Figure 27 : Répartition par pays des réserves mondiale de cuivre en 2018.

Les réserves rapportées par l'USGS sont en légère hausses depuis 20 ans, passant de 28 ans en 1998 à 40 ans en 2018 de production courante (réserves rapportées annuellement et divisées par la production annuelle). Cependant, le nombre d'années de réserves reste aux alentours des 30-40 ans car c'est l'horizon d'évaluation des études de faisabilité menées par les compagnies minières (Figure 28).

Compte tenu du coût de ces études, les entreprises n'ont aucune justification économique à vouloir certifier leurs réserves au-delà de ce nombre d'années. Certaines années, l'USGS effectue une mise à jour plus conséquente des réserves et cela peut engendrer une évolution soudaine et brusque des réserves et des années d'épuisement, comme entre 2001 et 2002.

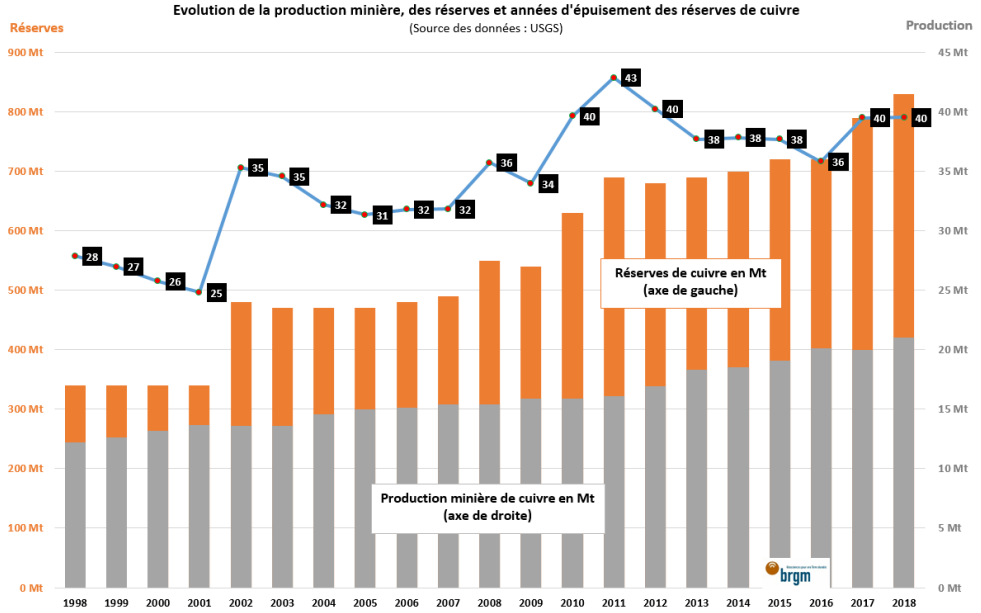


Figure 28 : Évolution de la production minière de cuivre, des réserves et de leur nombre d'années théoriques avant épuisement.

Bien que les budgets d'exploration sur les dernières années soient en hausse, le rythme de découverte de nouveaux gisements s'étiole, en particulier depuis 2014 (Figure 29). Le manque de découverte de nouveaux gisements, qui pourraient potentiellement prendre le relais des grands gisements en fin de vie, pourra poser de sérieux problèmes d'approvisionnement dans les années futures.

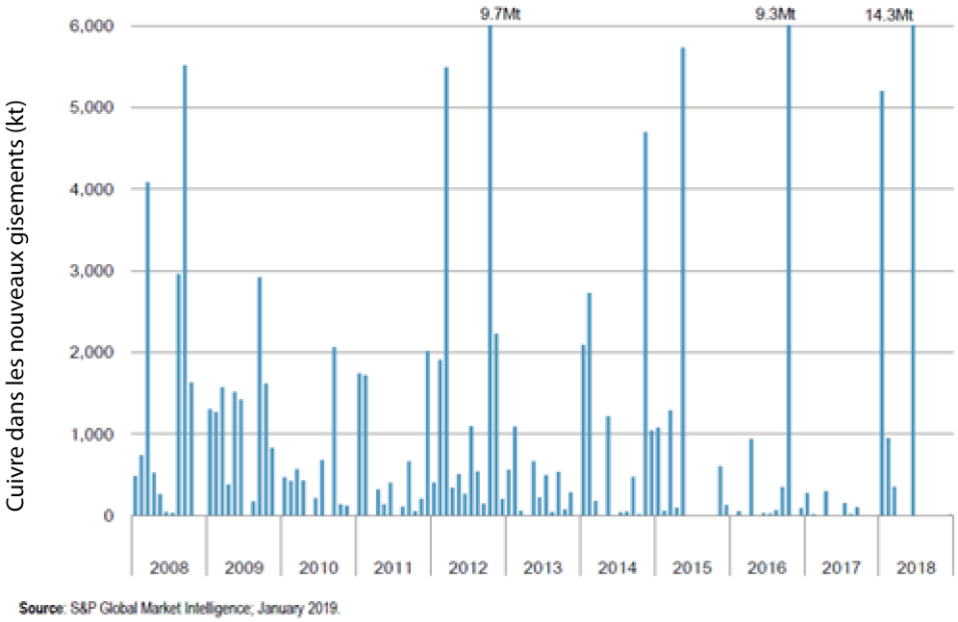


Figure 29 : Quantité de cuivre découverte dans les nouveaux gisements.

3.4.4. Les principaux projets en cours de développement

La partie ci-dessous récapitule les principaux projets miniers en termes de cuivre contenu. Comme pour d'autres métaux, le développement d'une mine de cuivre peut prendre entre 10 et 20 ans, et plusieurs de ces gisements pourraient ne pas être mis en production du tout ou très tardivement. Les raisons sont nombreuses : la nécessité de détenir des capitaux très élevés, les contraintes sociales et environnementales fortes, ou les problèmes géopolitiques, etc.

Les 10 plus gros projets cuprifères mondiaux en phase de construction ou préproduction

Projet	Compagnie	Pays	Statut	Tonnage (Mt)	Teneur (%)	Cu contenu (Mt)	Date de démarrage	Sous-produits associés
Kamoa-Kakula	Ivanhoe	RDC	Construction débutée	1 703	2,48	42,2	2021	
Resolution	Rio Tinto	USA	Préproduction	1 787	1,53	27,3	2021	Au, Mo
Udokan	Baikal Mining Company	Russie	Construction débutée	2 754	0,97	26,7	2022	Ag
Quellaveco	Anglo American	Pérou	Construction débutée	2 960	0,46	13,6	2022	Mo, Ag
Aynak	Metallurgical Corp. Of CN.	Afghanistan	Préproduction	705	1,56	11	2022 ?	
Lookout Hill	Turquoise Hill	Mongolie	Préproduction	1 996	0,52	10,4	2021	Au, Ag, Mo
Qulong	Compagnie privée	Chine	Construction débutée	1 000	1,00	10,4	2019	Mo, Ag, Au
Khoemacau	Cupric Canyon Capital	Botswana	Préproduction	357	1,40	4,8	2021	Ag
Carrapateena	OZ Minerals	Australie	Construction débutée	691	0,70	4,7	2019	Au, Ag, U
Casino	Western Copper & Gold	Canada	Préproduction	2 854	0,16	4,6	2024	Au, Mo, Ag

Sources : S&P Global, Compagnies, Mining.com

Tableau 5 : Les dix plus gros projets miniers de cuivre en phase avancée dans le monde.

Parmi ces projets miniers (Tableau 5), certains sont en phase très avancée (construction, pré-production, etc.) et d'autres sont encore en développement (préfaisabilité) (Tableau 6).

Les 10 plus gros projets cuprifères mondiaux

Projet	Compagnie	Pays	Statut	Tonnage (Mt)	Teneur (%)	Cu contenu (Mt)	Date de démarrage	Sous-produits associés
Kamoa-Kakula	Ivanhoe	RDC	Construction	1 703	2,48	42,2	2021	
Los Bronces (souterrain)	Anglo American	Chili	Prefaisabilité	3 280	1,18	38,8	>2021	Mo, Ag
Peeble	Northern Dynasty Minerlas	USA	Prefaisabilité	10 910	0,34	36,9	2024	Au, Mo, Ag
Resolution	Rio Tinto	USA	Préproduction	1 787	1,53	27,3	2021	Au, Mo
Udokan	Baikal Mining Company	Russie	Construction	2 754	0,97	26,7	2022	Ag
Reko Diq	Barrick Gold & Antofagasta	Pakistan	En litige	5 868	0,42	24,3	>2022	Au, Pb, Zn
La Granja	Rio Tinto	Pérou	Préfaisabilité	4 320	0,51	20,9	>2024	Au, Zn
KSM	Seabridge Gold	Canada	Préfaisabilité	7 539	0,28	20,8	2022	Au, Ag, Mo
Tampakan	Indophil Resources	Philippines	Faisabilité	2 940	0,52	15,3	Inconnu	Au, Mo, As
El Pachon	Glencore	Argentine	Faisabilité	3 112	0,48	15,1	>2023	Mo, Ag, Au

Sources : S&P Global, Compagnies, Mining.com

Tableau 6 : Les dix plus gros projets miniers de cuivre dans le monde.

Enfin, certains projets, parmi les plus importants, consistent à passer d'une exploitation à ciel ouvert à une exploitation souterraine. C'est le cas des mines de Los Bronces et Chuquicamata au Chili.

a) Kamoa-Kakula, RDC

Le projet Kamoa-Kakula (Figure 30) est détenu par une joint-venture entre IVANHOE MINES (39,6 %), ZIJIN MINING Group (39,6 %), Crystal River Global Limited (0,8 %) et le gouvernement de la RDC (20 %). Il est régulièrement classé comme le plus gros projet cuivre en cours, à fort tonnage et forte teneur. Il est situé dans la province métallogénique de la Copperbelt, en RDC et consiste en un vaste gisement sédimentaire stratiforme.

Figure 30 : Mise en exploitation de la mine de Kamoa-kakula (© Ivanhoe Mines).

L'exploitation de la mine devrait se faire en deux grandes phases. La première phase consistera à mettre en production le gisement de Kakula avec une capacité de traitement annuelle de minerai évaluée à 6 Mt. La production annuelle devrait être de 291 kt Cu sur les premières années, puis 360 kt / an à partir de la 4^{e} année. L'investissement est d'environ 1,1 G US$ pour une durée de vie de 25 ans (au minimum puisque des extensions sont régulièrement découvertes). Grâce au minerai provenant de la mine de Kansoko, la seconde phase devrait permettre de monter les capacités de traitement de 6 Mt à 12 Mt puis à 18 Mt avec le développement de la mine de Kakula Ouest. Cette phase devrait permettre de produire 382 kt de cuivre par an sur les 10 premières années et de grimper à 740 kt par an à partir de la douzième année. La durée de vie a été évaluée à 37 ans et les capitaux nécessaires pourraient venir des revenus de l'exploitation du gisement de Kakula. Durant cette seconde phase, il a été prévu de construire une fonderie de cuivre, qui pourrait traiter environ 1 Mt de concentré de cuivre chaque année, ce qui permettrait d'économiser des coûts de traitement et de transport.

b) Los Bronces souterrain, Chili

Même si la mine de Los Bronces (Figure 31) est déjà la 11^{e} plus grosse productrice de cuivre au monde, ANGLO AMERICAN souhaite maintenant passer à une exploitation souterraine, afin de répondre à la baisse des teneurs en surface et certaines pressions environnementales (présence de glaciers et d'une réserve naturelle à proximité). Cette mine, exploitée depuis 1925, se situe non loin de Santiago au Chili et est détenue par les sociétés ANGLO AMERICAN (50,06 %), MITSUBISHI CORP. (20,44 %), CODELCO (20 %) et MITSUI & CO. (9,5 %).

Figure 31 : La mine de Los Bronces au Chili (© ANGLO AMERICAN).

La teneur moyenne des minerais de cuivre souterrains est plus élevée (entre 1,2 et 1,7 % Cu selon les estimations) que celle des minerais actuellement exploités en surface (0,81 % Cu). Cela pourrait permettre d'éviter à la compagnie la construction d'une nouvelle usine avec une capacité de traitement accrue puisque pour une même production donnée, une augmentation des teneurs permet de réduire le volume de roches à traiter.

Néanmoins, le principal frein à ce projet concerne les aspects environnementaux. En effet, la compagnie a lancé une grande étude d'impact environnemental pour s'assurer que l'extension ne causerait aucun dommage grave ou irréversible, en particulier sur les glaciers et l'eau souterraine. ANGLO AMERICAN a annoncé que le projet d'extension serait abandonné si l'étude d'impact identifie de tels problèmes.

Le passage de ciel ouvert à souterrain nécessiterait un investissement de 3 milliards de dollars et ne débuterait pas avant 2021.

c) Pebble, États-Unis

Le projet de Pebble, situé en Alaska, est détenu à 100 % par la société junior NORTHERN DYNASTY MINERALS (Figure 32). Ce projet, situé non loin de la baie de Bristol, est confronté à de nombreux problèmes environnementaux, ce qui retarde, chaque année, l'exploitation de ce gros gisement de cuivre et or. En effet, le projet avait été bloqué par l'Agence de protection de l'environnement (EPA) sous la présidence Obama car jugé trop impactant sur la zone, qui abrite la plus grande réserve au monde de saumons rouges (46 % des saumons sauvages dans le monde proviendraient de cette baie). Pour l'EPA et les nombreux opposants au projet, l'exploitation de la mine contaminerait beaucoup de cours d'eau et de lacs, et pourrait faire perdre 6 000 emplois liés à la pêche. De plus, la baie de Bristol abrite une quinzaine de tribus amérindiennes, majoritairement opposées au projet.

Néanmoins, l'administration du président D. Trump, et donc l'Agence de protection environnementale, vient de lever en juillet 2019 les restrictions sur le projet. Si cela ne garantit pas l'obtention d'un permis d'exploitation, cela permet à la compagnie de continuer les études de faisabilité en vue d'une possible exploitation, probablement bien après 2024.

Figure 32 : Projet Pebble en Alaska (© Northern Dynasty Minerals).

d) Resolution, États-Unis

Le projet Resolution est détenu par la société RESOLUTION COPPER MINING, joint-venture entre deux géants du secteur : RIO TINTO (55 %) et BHP (45 %). Situé dans l'Arizona (Figure 33), cet énorme gisement, qui pourrait fournir un quart de la consommation de cuivre étatsunienne, se trouve à 1,6 km de profondeur et devrait être exploité avec la technique de « block caving ».

Figure 33 : Projet Resolution en Arizona (© Rio Tinto).

Tout comme le projet Pebble en Alaska, Resolution attend depuis plusieurs années un permis d'exploitation de la part des autorités, un permis retardé pour raisons environnementales. Néanmoins, le Service des forêts des États-Unis (« US Forest Service ») a lancé le 9 août 2019 une consultation publique de 90 jours afin de réaliser une étude d'impact environnemental. Cette étude comprend les problématiques et les solutions proposées par l'opérateur minier pour y remédier.

En cas de succès, le projet initialement prévu pour 2020, qui a déjà coûté à RIO TINTO et BHP plus de 2 milliards de dollars, ne débuterait qu'en 2021 au plus tôt. Sa durée d'exploitation est pour l'instant prévue sur 40 ans.

e) Udokan, Russie

Découvert en 1949 dans le district de Kalar, ce projet est développé par la compagnie russe BAIKAL MINING COMPANY, détenue par le milliardaire Alisher Usmanov. Udokan est actuellement le plus gros projet cuprifère en Russie, avec des ressources estimées à presque 27 Mt Cu. Le projet Udokan (Figure 34), dont la construction a débuté en 2019, aura coûté plus de 2 milliards de dollars, dont 500 millions rien que pour acquérir, en 2008, les droits qui appartenaient au gouvernement russe.

Figure 34 : Usine de concentration du projet Udokan en Russie (© Baikal Mining).

D'un point de vue géologique, Udokan est un gisement sédimentaire stratiforme, au sein d'un encaissant métamorphisé. La minéralisation est composée d'oxydes de cuivre en surface et de sulfures en profondeur, en lien avec des grès à quartz et des carbonates. En plus du cuivre, ce gisement affiche une forte teneur en argent, évaluée à 12 g/t, soit au total 1 056 Moz d'argent contenu (environ 33 kt, équivalent à la production mondiale annuelle d'argent).

Comme de nombreuses mines, Udokan est divisée en étapes. La première étape permettra d'atteindre une capacité de traitement annuel de 12 Mt de minerai par flottation/hydrométallurgie et une production maximale de 130 kt / an de cuivre, sous la forme de cathodes ou de concentrés. Lors de la seconde étape, les capacités de traitement de minerai pourraient aller jusqu'à 48 Mt par an.

f) Reko Diq, Pakistan

Le projet Reko Diq est développé par la société TETHYAN COPPER COMPANY qui est une joint-venture entre les majors BARRICK GOLD (37,5 %) et ANTOFAGASTA (37,5 %) ainsi que le gouvernement du Baloutchistan (25 %). Ce gisement a été découvert en 1997 dans la province du Baloutchistan, au nord-est du Pakistan.

En 2011, alors que la compagnie avait investi plus de 220 millions de dollars dans le projet, le gouvernement pakistanais a décidé, à la surprise générale, de retirer les permis d'exploration/exploitation à la compagnie, pour raisons sécuritaires. En effet, la province du Baloutchistan, très pauvre, se situe au carrefour du Pakistan, de l'Iran et de l'Afghanistan et est animée par de violents mouvements séparatistes. L'affaire a été menée devant la Banque Mondiale et cette dernière a reconnu en 2017 une faute du gouvernement et elle vient seulement d'estimer le montant du préjudice à 5,8 milliards de dollars ! Le gouvernement pakistanais s'est dit ouvert à toute discussion avec la compagnie afin, d'une part, de réduire le montant du préjudice et, d'autre part, de ne pas effrayer les potentiels investisseurs étrangers.

Bien que le gisement contienne d'énormes ressources de cuivre (24,3 Mt Cu) et d'or (41 Moz), il ne devrait pas entrer en production avant 2022 (et probablement bien au-delà). Selon Tethyan Copper, la mine, qui sera exploitée à ciel ouvert, devrait produire annuellement 200 kt de cuivre et 250 koz d'or. La compagnie a également annoncé la construction d'une usine de traitement et d'un pipeline reliant la mine au port de Gwadar afin de faciliter l'approvisionnement vers les fonderies du monde entier.

g) La Granja, Pérou

Le projet La Granja est développé par la société RIO TINTO et se situe dans la région de Cajamarca au Pérou. Bien que ce projet soit un des plus gros gisements connus avec quasiment 21 Mt de cuivre contenu, il existe assez peu d'informations à son sujet.

Débuté en 2008, le projet a rapidement fait l'objet d'une opposition sous la forme de grèves ou de blocages de la part des locaux. Ces derniers souhaitent en effet la mise en place d'une consultation, un accès à l'emploi, l'implication de la société minière dans la vie locale et la préservation de l'environnement. De plus, certains problèmes concernant la vente des terrains ont attisé les conflits.

Le dialogue entre Rio Tinto et les autorités locales a permis d'aboutir à la prolongation de la phase d'exploration, qui aboutira en 2024. La société s'est par ailleurs engagée à investir 580 millions de dollars sur cette période, avec une étude de faisabilité bancaire.

L'investissement total devrait s'élever à 2 milliards de dollars et les capacités de traitement seraient dans un premier temps de 70 kt par jour.

h) Kerr-Sulphurets-Mitchell (KSM), Canada

Si le projet KSM est d'abord connu pour ses ressources en or (106 Moz Au), il contient également de très grosses quantités de cuivre (20,8 Mt Cu), ainsi que de l'argent et du molybdène. En réalité, le projet KSM est la réunion de trois gisements de type porphyre : Kerr, Sulphurets et Mitchell.

KSM est détenu par la société junior SEABRIDGE GOLD depuis 2001 et se situe en Colombie-Britannique (Canada). La société mène depuis 2013 une campagne d'exploration active et a reçu en 2014 les autorisations environnementales locales et fédérales. Les différentes

campagnes d'exploration et la campagne de forage effectuée en 2018 ont permis d'accroître les ressources du gisement.

KSM devrait d'abord être exploité à ciel ouvert puis en souterrain par la technique de « block caving ». L'étude préliminaire de faisabilité annonce une capacité de traitement de 170 kt par jour et une production moyenne annuelle de 130 kt de cuivre. La durée d'exploitation de la mine est prévue sur 51 ans à partir de 2022, pour un investissement initial de 5,5 milliards de dollars.

i) Tampakan, Philippines

Bien que le projet Tampakan (Philippines) fasse parti des 10 plus gros projets mondiaux, son exploitation est régulièrement décalée dans le temps. En 2013, la société SAGITTARIUS MINES, filiale de GLENCORE XSTRATA, décide de vendre ses parts investies dans la société exploitante, INDOPHIL RESOURCES, à la société ALSONS PRIME INVESTMENT. L'investissement initial, jugé à plus de 5 milliards de dollars, en a donc subi les conséquences et cela s'est matérialisé par un report d'exploitation à 2019. Mais depuis, le président philippin Rodrigo Duterte a mis en place un ban sur l'exploitation à ciel ouvert, pour des raisons environnementales. Cette mesure devrait à nouveau reporter l'exploitation du projet Tampakan.

j) El Pachon, Argentine

Le projet El Pachon se situe dans la province de San Juan en Argentine, à seulement 5 km de la frontière avec le Chili et à une altitude d'environ 4 000 mètres. Ces caractéristiques en font un gisement particulièrement difficile à exploiter. GLENCORE avait initialement prévu que les concentrés seraient envoyés vers le port Coquimbo en passant donc à travers le Chili. Mais en 2014, GLENCORE est revenu sur son idée et les concentrés devraient finalement être embarqués dans un port argentin.

El Pachon est l'un des plus gros projets cuprifères de GLENCORE avec une production qui pourrait atteindre 400 kt par an durant les premières années. La production serait à ciel ouvert. Pour le moment, GLENCORE réévalue le projet et en particulier l'impact sur l'environnement. Le projet ne devrait donc pas rentrer en production avant plusieurs années.

3.5. RECYCLAGE

Le recyclage occupe une place importante et sans cesse croissante sur le marché du cuivre. Cela inclut les déchets neufs ou « new scraps » (généralement les chutes de fabrication lors des procédés) et les vieux déchets ou « old scraps » (produits en fin de vie).

3.5.1. Les déchets neufs

L'International COPPER STUDY GROUP (ICSG) a évalué la quantité de ces déchets neufs à environ 5,7 Mt en 2018. À noter que certaines études se concentrent sur les vieux déchets et passent un peu sous silence la boucle des « déchets neufs » qui n'ont pas transité par un usage final. En effet, si une partie des déchets neufs est propre et pure et réinjectée directement en boucle courte, une autre partie peut être souillée et non utilisable directement.

3.5.2. Les vieux déchets :

Il est communément admis que 85 % du cuivre en circulation dans les produits finis peut être récupéré. Leur durée de vie peut s'étaler de quelques années (électronique) à plus de 100 ans (construction). Lorsque le cuivre est non-allié et relativement pur, il est réutilisé directement

par les industriels pour obtenir des anodes. Les alliages de type bronze ou laiton sont fondus et réutilisés comme alliages, puisque les propriétés et la chimie sont conservées.

L'ICSG estime qu'environ 3 Mt de vieux déchets ont été utilisés par les fondeurs et 4 Mt par les affineurs en 2018.

En additionnant tous les types de déchets, c'est environ 9,7 Mt (5,7 Mt issus de déchets neufs et 4 Mt de vieux déchets utilisés par les affineurs) de cuivre secondaire qui a été consommé en 2018, soit environ 1/3 du cuivre total consommé (environ 30 Mt).

La quantité de cuivre recyclé dépend bien évidement des prix LME du cuivre. Lorsque les cours sont élevés, les fondeurs et affineurs utilisent plus de déchets. Lorsque les prix chutent, ils les réduisent.

La question du recyclage et des déchets, en particulier en lien avec la Chine, est traitée plus en détail dans la quatrième partie du présent rapport.

3.6. COURS DU CUIVRE

Le cuivre est coté et échangé sur trois marchés à terme : le London Metal Exchange (LME), le New York Commodities Exchange (COMEX) qui appartient depuis 2008 au Chicago Mercantile Exchange (CME) et le Shanghai Futures Exchange (SHFE). La cotation du cuivre remonte à 1877 pour le LME et c'est sur ce marché à terme qu'est négociée la plupart des contrats sur le cuivre (même si la cotation des métaux et en particulier des métaux de base semble basculer vers l'Asie et surtout la Chine).

Après que le prix du cuivre a été multiplié par six entre 1998 (1 500 $/t) et 2008 (quasiment 9 000 $/t), la crise des « subprimes » l'a fait plonger à 3 000 $/t (Figure 35). Néanmoins, cette chute des prix a vite été enrayée par le rachat de stocks de cuivre par la Chine (profitant des prix bas), les énormes injections de liquidités sur les marchés pour soutenir nombres de secteurs économiques et le retour des fonds d'investissements sur le devant de la scène. Après avoir atteint son plus haut historique en février 2011 (10 000 US$/t), le prix du cuivre oscille depuis quelques années autour de 6 000 $/t.

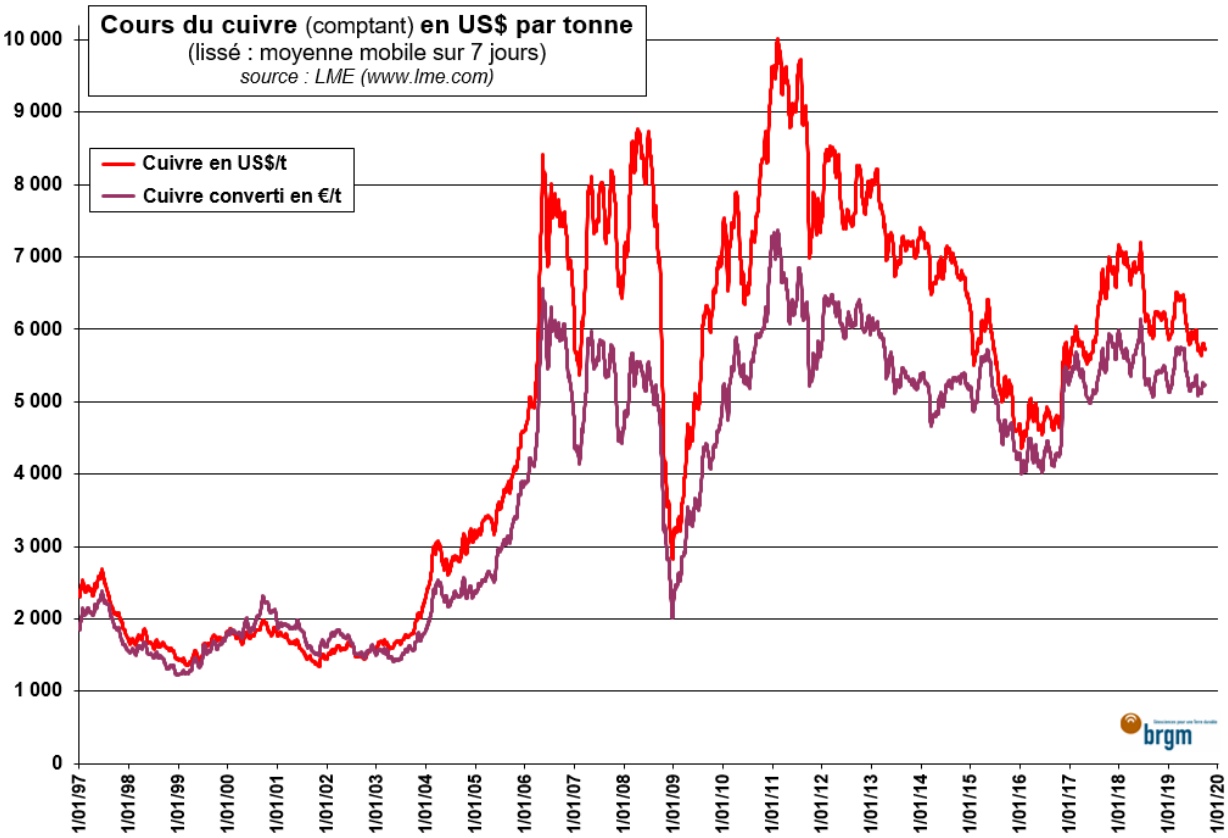


Figure 35 : Évolution du cours du cuivre entre 1997 et 2019.

Alors que plusieurs analystes dont Bloomsbury Minerals Economics s'accordaient à dire que les cours du cuivre et des métaux en général étaient régis par des fondamentaux traditionnels jusqu'en 2006 (offre, demande, stocks, économie mondiale), l'irruption sur le marché de nouveaux déterminants à partir des années 2000 comme la financiarisation des marchés (la gestion indicielle, nouveaux acteurs comme les fonds de pension etc.) ou l'arrivée de la Chine sur le marché, ont rendu le marché extrêmement volatil, rendant par conséquent les prévisions très difficiles.

Néanmoins, les variations de prix liées à des événements macroéconomiques ou de premier ordre se reflètent généralement sur les cours, et plus particulièrement sur les courbes en dollars constants (Figure 36). Pour rappel, les prix courants sont les prix tels qu'ils sont indiqués à une période donnée, en valeur nominale. Les prix constants sont les prix en valeur réelle, c'est-à-dire corrigés de la variation des prix par rapport à une donnée de base de référence, typiquement un indice des prix, pour éliminer toute variation due à l'inflation ou à la déflation.

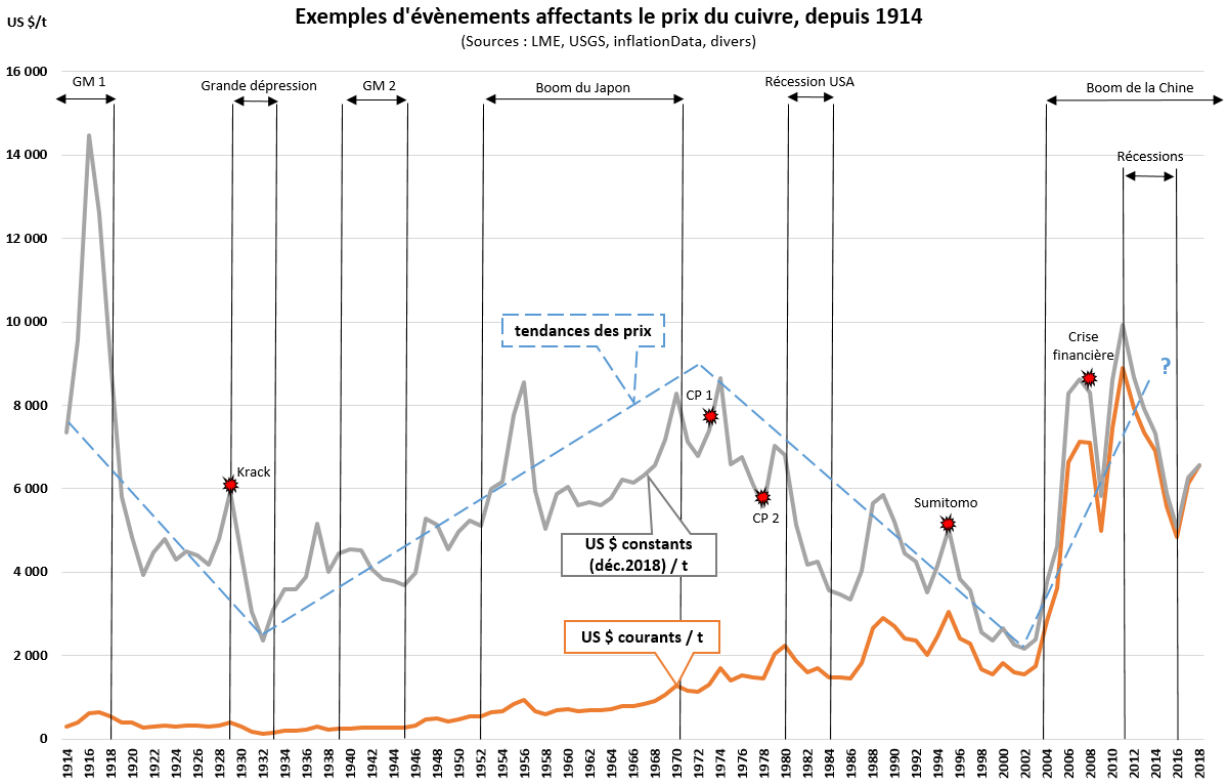


Figure 36 : Exemples d'évènements affectants le prix du cuivre, depuis 2014.

Comme vu plus haut, un des fondamentaux traditionnels est le niveau des stocks mondiaux visibles (ceux détenus par les principales bourses d'échange) et non visibles (inventaires des producteurs et consommateurs ou les stocks stratégiques). L'évolution de ces stocks est un indicateur dynamique à court terme, qui évoluait de manière inverse avec les cours jusqu'en 2009-2010 mais qui semble, actuellement, corrélé au prix du cuivre (Figure 37). Cela souligne notamment le rôle des nouveaux déterminants dans la cotation du cuivre. Depuis 2009, le niveau des stocks oscille entre 400 et 800 kt, soit 6 à 12 jours de consommation mondiale.

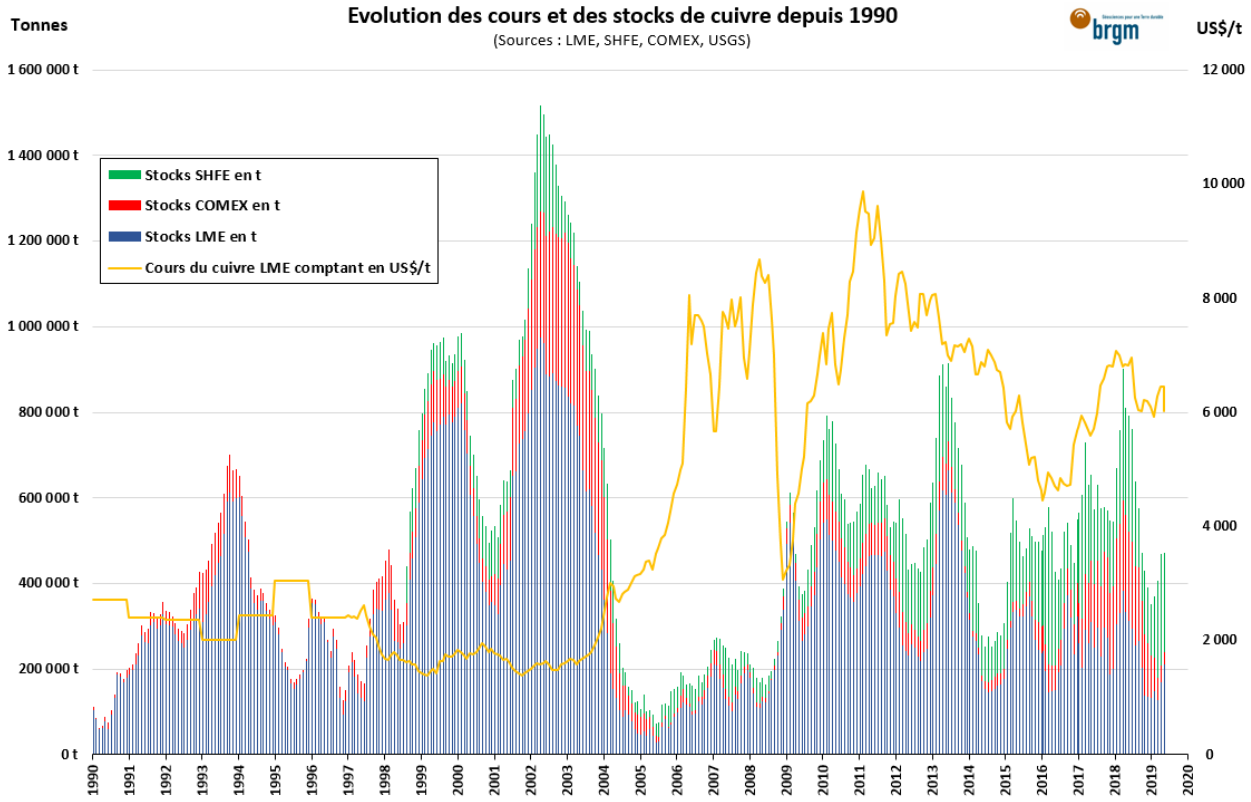


Figure 37 : Évolution des cours et stocks de cuivre entre 1990 et 2019.

4. La place de l'Amérique du Sud sur le marché du cuivre

Mathieu Leguérinel

4.1. ÉTAT DE LA PRODUCTION

L'Amérique du Sud[4] est la zone qui produit le plus de concentrés de cuivre annuellement avec 42 % de la production minière mondiale. En même temps, elle ne produit que seulement 12 % du cuivre raffiné mondial (Figure 38). Parmi les pays producteurs de cuivre sud-américains, le Chili en est l'acteur historique et occupe encore la première place. La montée du Pérou sur le devant de la scène est toutefois à souligner. Les autres pays produisant du cuivre sont le Brésil, l'Argentine, la Colombie, la Bolivie et, depuis 2019, le Panama et l'Équateur.

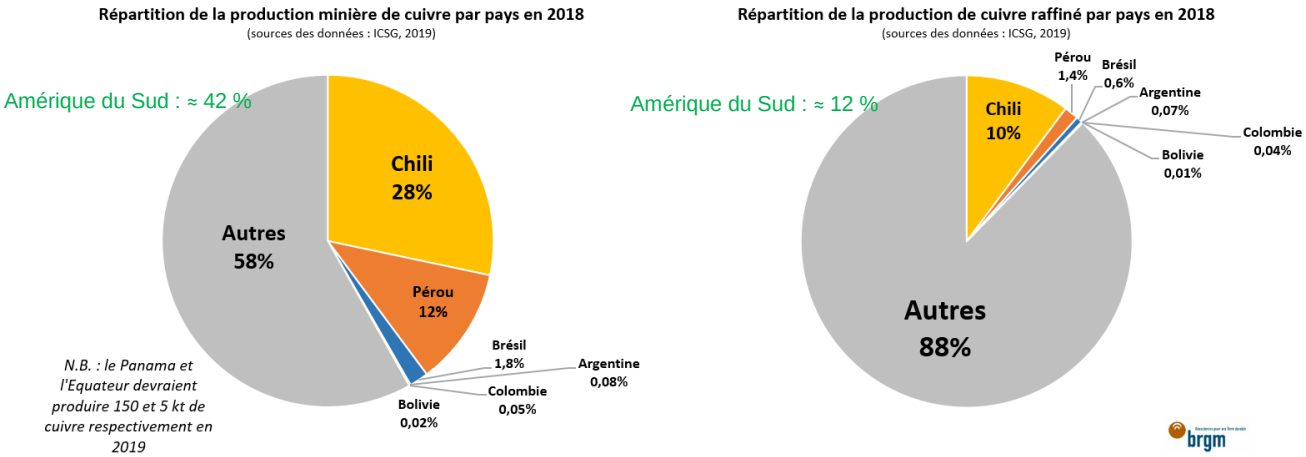


Figure 38 : Part de l'Amérique du Sud dans la production mondiale de concentrés de cuivre et de cuivre raffiné en 2018.

Pour des raisons géologiques, les principaux gisements de cuivre en Amérique du Sud se situent le long de la cordillère des Andes, sous la forme de porphyres cuprifères (voir description partie 2.2.1), expliquant de fait le rôle prépondérant du Chili et du Pérou (Figure 39, Figure 40, Figure 41, Figure 42 et Figure 43). Il est également probable qu'il existe des porphyres non encore découverts dans les pays comme l'Équateur et la Colombie en raison d'un couvert végétal plus important et de conditions socio-politiques historiquement moins favorables à l'exploration minière.

[4] Dans le présent rapport, l'Amérique du Sud renvoie au pays suivants : Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Équateur, Guyane Française (France), Guyana, Paraguay, Pérou, Suriname, Uruguay, Venezuela, ainsi que le Panama (qui fait au sens strict partie de l'Amérique Centrale).

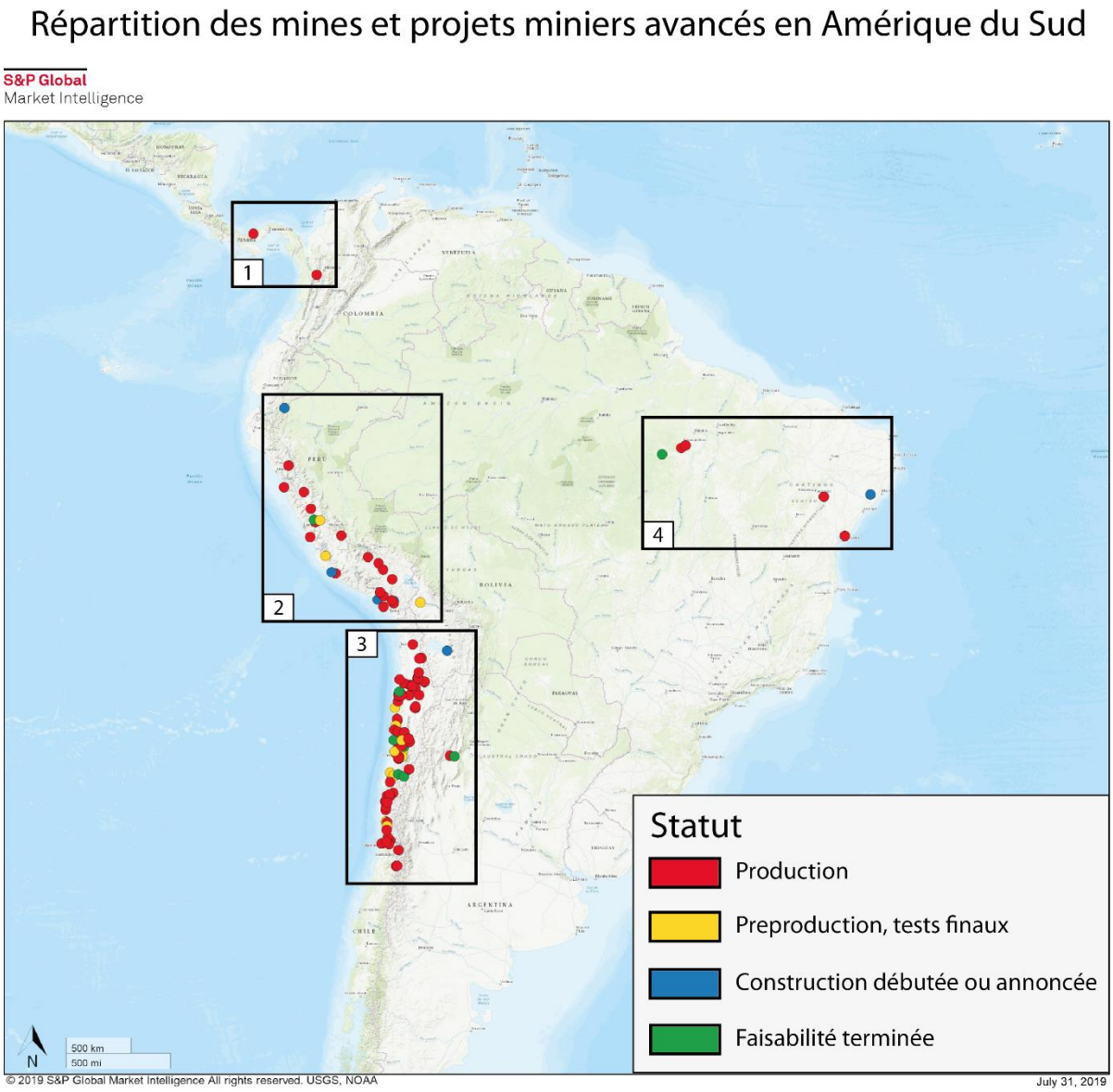


Figure 39 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019.

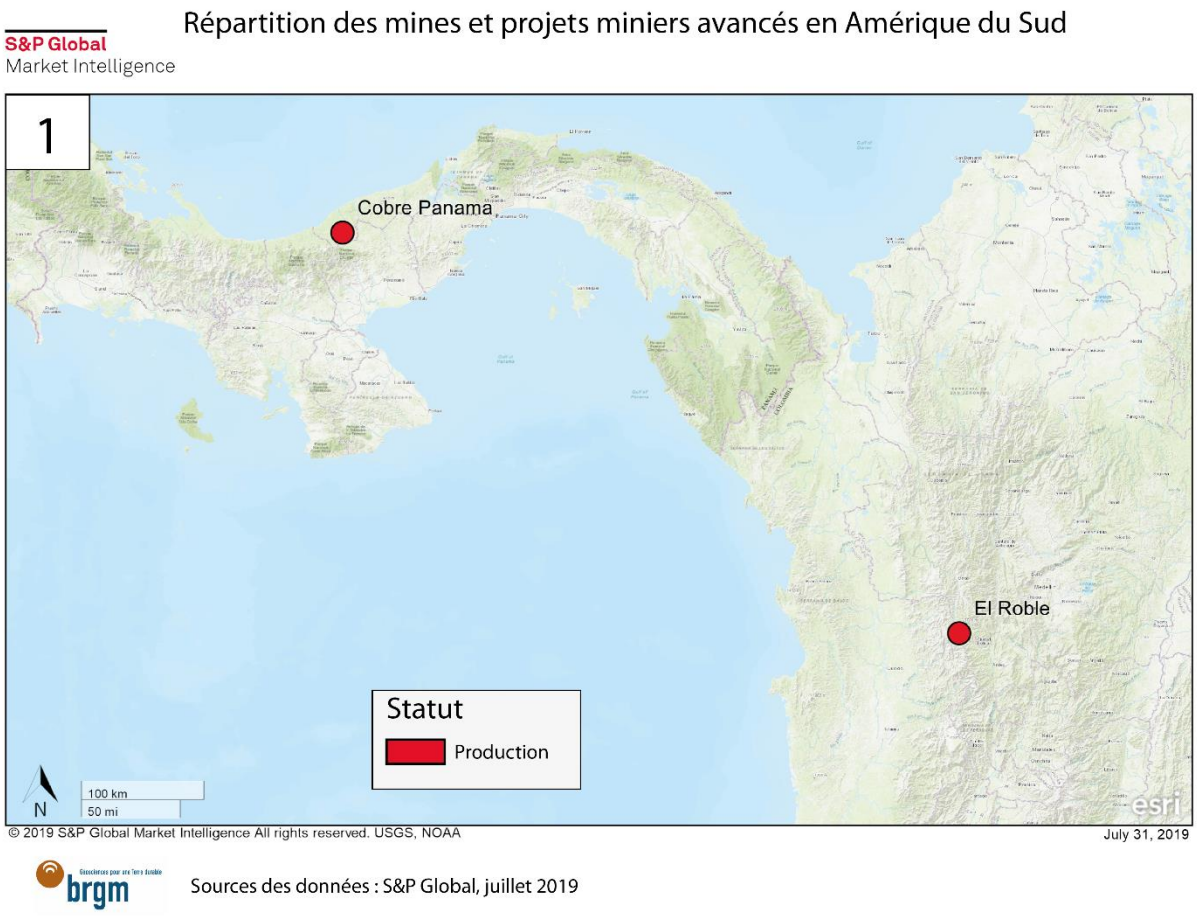


Figure 40 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone nord (Colombie et Panama).

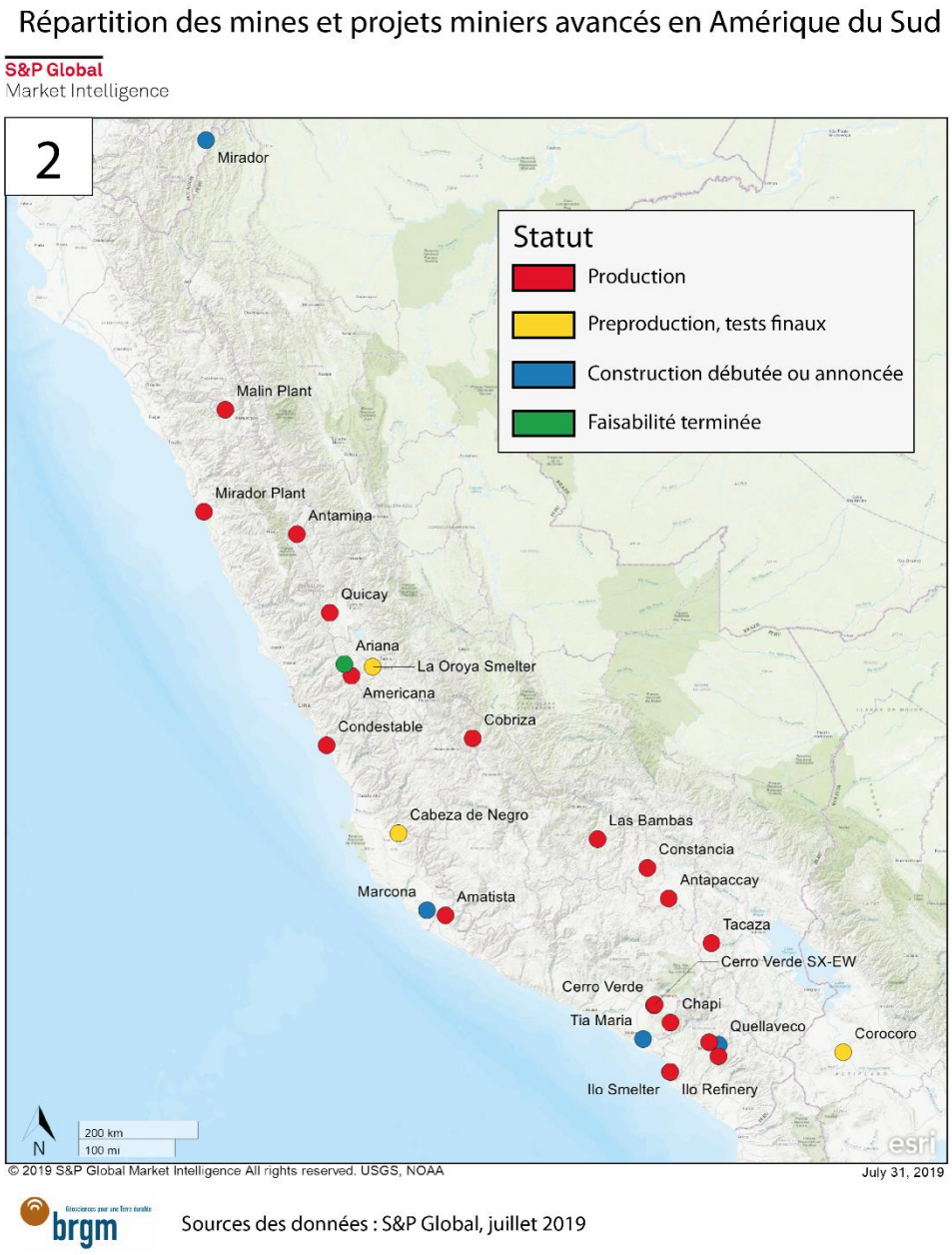


Figure 41 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone nord-ouest (Pérou et voisinage).

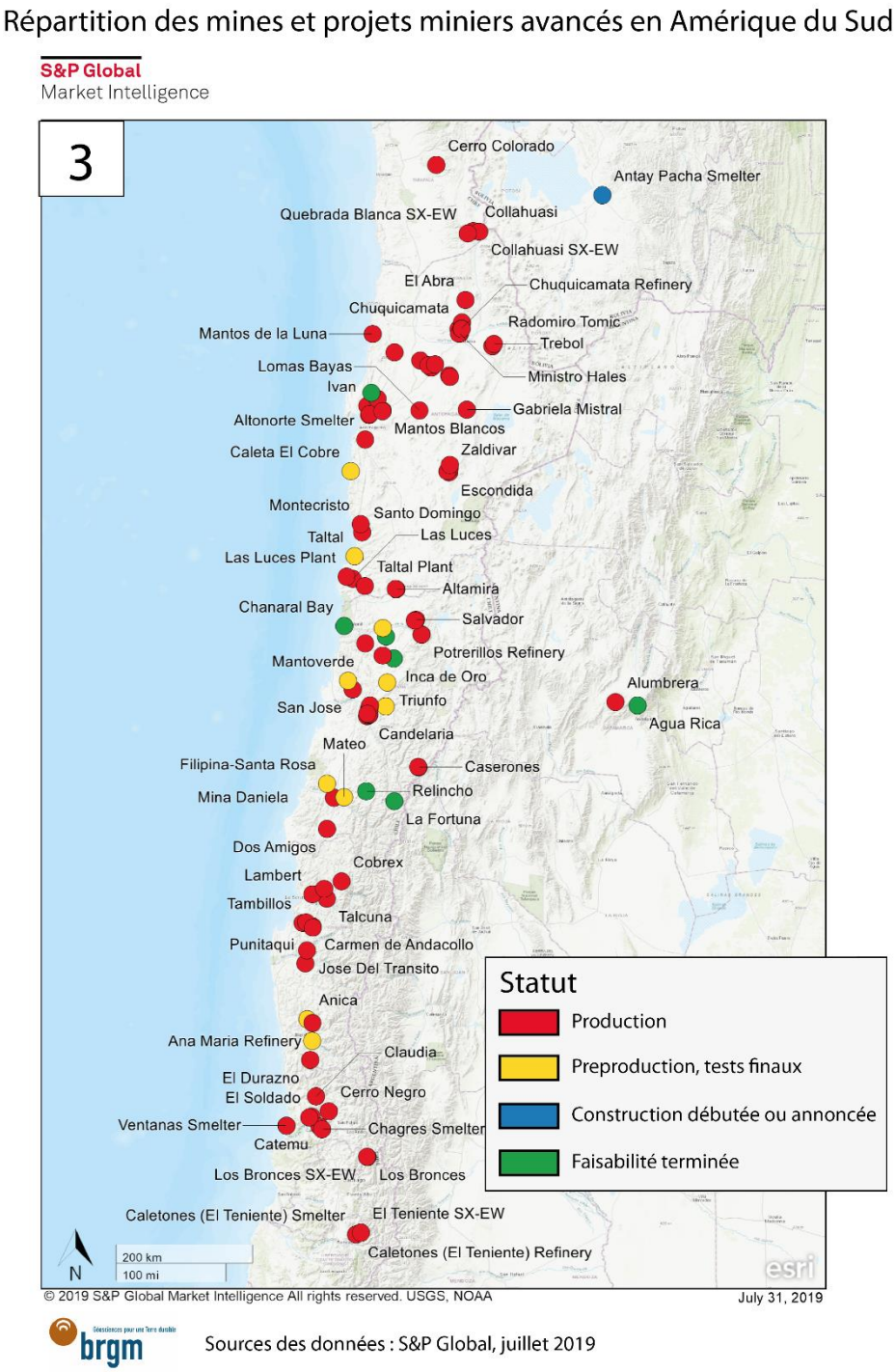


Figure 42 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone sud-ouest (Chili et voisinage).

Figure 43 : Localisation des principales exploitations minières de cuivre ou des projets les plus avancés en Amérique du Sud, au 31 juillet 2019 – zone est (Brésil).

4.2. RÉSERVES ET RESSOURCES EN AMÉRIQUE DU SUD

S&P Global rapporte que les budgets totaux alloués par les compagnies ou les gouvernements à l'exploration minière en 2018 ont été de 9 625 milliards de dollars, en hausse de 21 % sur un an. L'Amérique du Sud continue de drainer la grande majorité des investissements avec 28 % des parts de marché, en hausse de 14 % par rapport à 2017, et 44 % des budgets pour le cuivre, soit plus de 900 millions de dollars (Figure 44). Cinq pays se partagent plus de 80 % de ces investissements : le Pérou, le Brésil, le Chili, l'Argentine et l'Équateur.

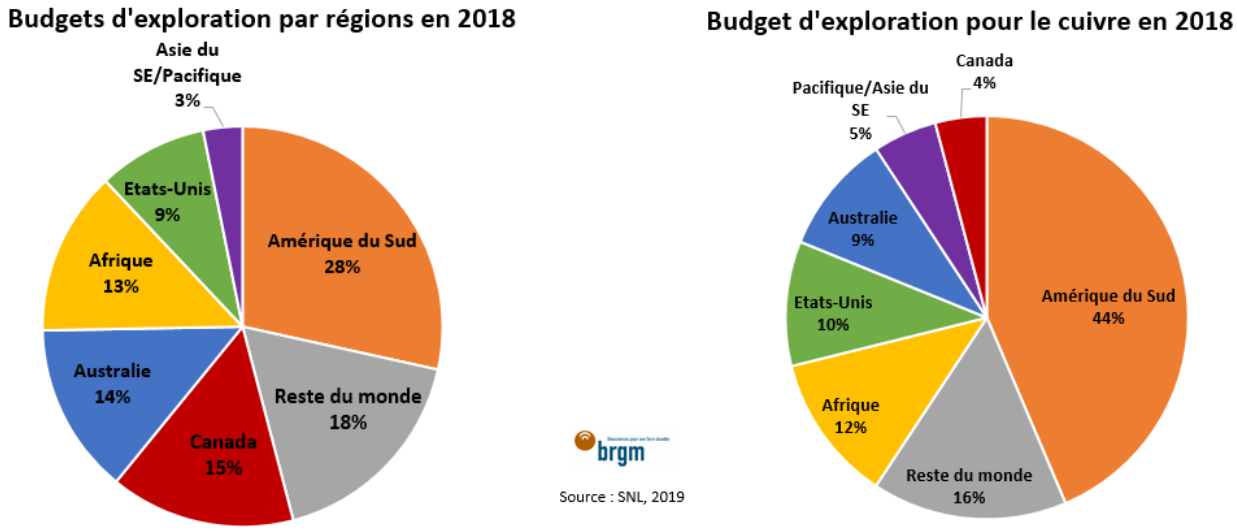


Figure 44 : Répartition des budgets d'exploration par régions en 2018, tous métaux à gauche, cuivre à droite.

Compte tenu des variations du cours des métaux, de la baisse des teneurs et des capitaux nécessaires à la mise en exploitation d'un gisement, il est probable qu'à terme, l'ouverture de nouveaux gisements puisse être uniquement possible en tenant compte des coproduits et sous-produits. Dans le cas des porphyres cuprifères, il s'agit généralement de l'or, de l'argent, du molybdène, du rhénium, du sélénium ou encore du tellure. Fort logiquement, valoriser ces sous-produits peut permettre, lorsque leurs cours sont élevés, d'exploiter en abaissant la teneur de coupure, et donc les coûts de production ou « cash costs » (Figure 45). Lorsque des coproduits ou sous-produits sont valorisés, la teneur économique peut être exprimée en équivalent cuivre (CuEq), en fonction des cours desdits sous-produits.

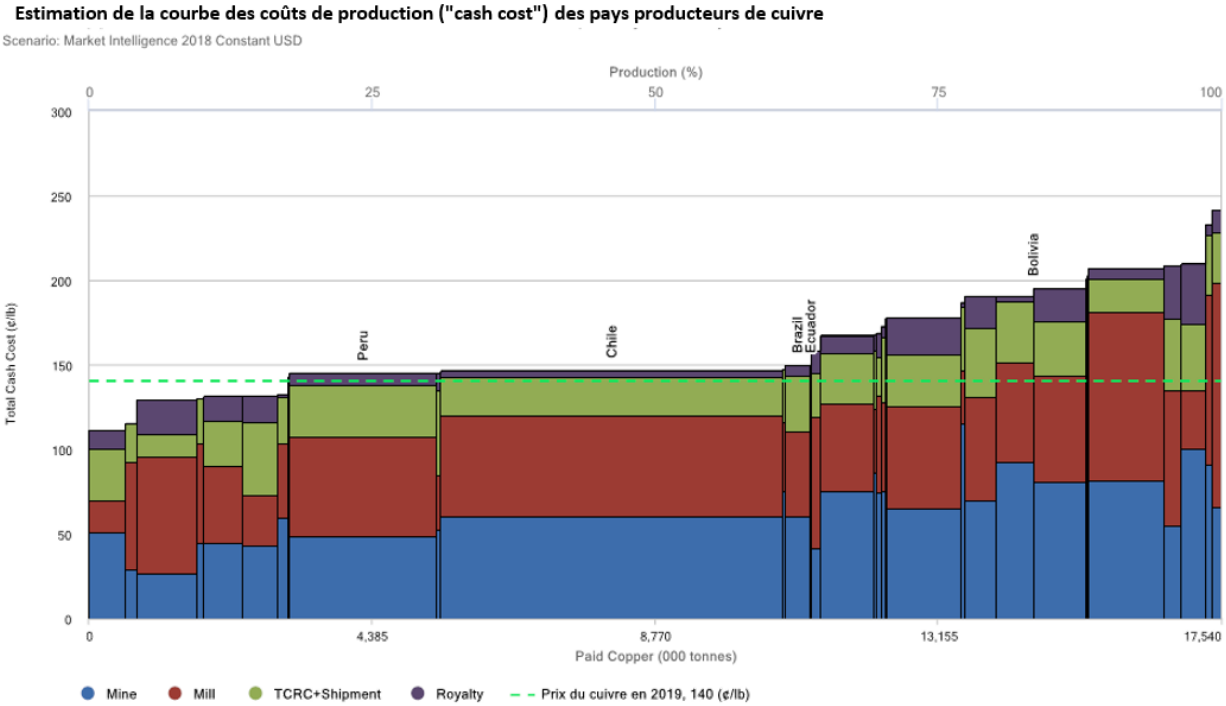


Figure 45 : Courbe des coûts de production des pays producteurs de cuivre en 2018.

4.3. DE NOUVEAUX ACTEURS ENTRENT EN JEU

4.3.1. La Colombie souhaite développer son industrie du cuivre

Bien que la production minière colombienne ait été historiquement tournée vers le charbon, l'or et l'émeraude, l'Agence Nationale des Mines a annoncé vouloir diversifier sa production, notamment de cuivre. La paix conclue en 2016 entre le gouvernement et les groupes rebelles d'une part et le potentiel géologique existant mais encore peu étudié d'autre part, peuvent aiguiser l'appétit de l'État et des opérateurs miniers pour développer le secteur minier colombien.

Actuellement, la Colombie ne possède qu'une seule mine de cuivre en activité, la mine d'El Roble, exploitée par la société ATICO MINING CORPORATION, dont la production annuelle est d'environ 10 kt de concentré de cuivre (avec or et argent en sous-produits). Cependant, de nombreuses compagnies développent ou prennent position dans des projets miniers : ANGLOGOLD ASHANTI - qui possède deux projets, Gramalote - en joint-venture avec B2GOLD, LA COLOSA, ou encore la junior canadienne MINERA COBRE - qui devrait débuter ses forages à Pantanos en 2019 et à Murindo en 2020.

Mais les tensions avec les populations restent très présentes, en particulier pour des raisons environnementales. C'est le cas de la société ANGLOGOLD ASHANTI qui rencontre des difficultés sur son projet Quebradona (cette même société avait dû renoncer à un projet de mine d'or de 2 milliards de dollars en 2017).

4.3.2. Le Panama fait sa place sur l'échiquier mondial

La société canadienne FIRST QUANTUM MINERALS a exporté ses premiers concentrés de cuivre en juin 2019 à partir de la mine de Cobre Panama, située à 120 km à l'ouest de Panama City (Figure 46). La production de concentrés de cuivre devrait se situer entre 140 kt et 175 kt en 2019. Toutefois, la société annonce déjà une hausse des capacités de traitement de minerai, qui passeront de 72 Mt à 100 Mt d'ici 2023. À terme, la mine de Cobre Panama devrait produire plus de 375 kt de concentrés par an, ce qui la situerait non loin des 10 plus grosses mines mondiales et de fait, placerait FIRST QUANTUM parmi les 6 premiers producteurs de cuivre mondiaux avec 900 kt Cu / an.

Figure 46 : La mine de Cobre Panama et son usine de traitement (© First Quantum).

La société, qui a dépensé plus de 1 G$ pour la construction en 2017, a de nouveau investi 830 M$ en 2018 et 110 M$ en 2019 pour permettre au projet d'aboutir, dans un temps très court puisque seulement 6 années se sont écoulées depuis l'acquisition du projet (rachat de la société INMET). Au cours de son exploitation (estimée à 34 ans), la mine devrait générer plus de 2 G$ d'exportation, ce qui représente 4 % du PIB annuel du Panama.

4.4. FERMETURES ET MISES AUX NORMES DES FONDERIES CHILIENNES

Nom	Capacité de fusion (kt)	Capacité d'affinage (kt)	Capacité de production d'acide sulfurique (kt)
Alto Norte	1 160		1 000
Chuquicamata	1 400	540	970
Potrerillos	680	130	460
Hernan Videla Lira	450		253
Chagres	660		500
Ventanas	430	410	330
Caletones	1 370		1 200
Total	**6 150**	**1 080**	**4 713**

Source : Cochilco 2019

Tableau 7 : Capacités des fonderies chilienne en 2019.

Le Chili possède sept fonderies dont trois sont associées à des raffineries (Chuquicamata, Ventanas et Potrerillos). Sur ces sept installations, seules deux sont détenues par des compagnies privées (Chagres et Alto Norte) (Tableau 7).

Dans un contexte de réduction de risques sanitaires et environnementaux, le Chili a décidé en 2013 d'imposer des standards d'émission plus restrictifs portant sur les particules fines, le dioxyde de soufre (SO_2), l'arsenic et le mercure. En effet, le ministère de l'environnement chilien a rapporté que les fonderies émettaient quatre fois plus de SO_2 que l'ensemble des centrales thermiques du pays (chiffres de 2008).

Avec l'établissement de ces nouveaux standards (Tableau 8), les fonderies ont désormais l'obligation de capter au minimum 95 % des émissions de dioxyde de soufre et d'arsenic. Les fonderies produisant de l'acide sulfurique par un procédé de contact double s'y sont attelées dès 2016 (VENTANAS, CHAGRES, ALTO NORTE) tandis que celles utilisant un procédé de contact simple y travaillent depuis 2018 (POTRERILLOS, CHUQUICAMATA, HERNAN VIDELA LIRA et CALETONES). Les nouvelles fonderies devront adopter des standards encore plus restrictifs : elles devront capter plus de 98 % du SO_2 et plus de 99,97 % de l'arsenic dégagé. De la même manière, les exploitants devront rester très vigilants sur les particules fines (en particulier pour les unités de séchage et des fours de nettoyage de laitiers) et le mercure (unité de fabrication de l'acide sulfurique).

Nom	Capture du SO_2 (%)			Investissement final (M US$)	Date de réouverture indicative
	2010	2014	2019		
Alto Norte	91,7	95	97	100	2017
Chuquicamata	89,1	94	96	939	nov-19
Potrerillos	85,7	86,4	95	438	avr-19
Hernan Videla Lira	90,7	96,8	97	54	déc-18
Chagres	95,1	98	98	71	2017
Ventanas	94,6	95	95	134	2017
Caletones	86,2	91,6	95	605	janv-19

Source : Cochilco 2019

Tableau 8 : Nouvelles normes sur la capture du SO_2 au Chili.

Les conséquences de la mise en place de ces nouvelles normes sont relativement importantes. D'une part, les investissements engagés sont conséquents (entre 50 millions et 1 milliard de dollars) et d'autre part, les fonderies doivent être fermées temporairement, le temps des travaux, ce qui impacte de fait les exportations chiliennes de cuivre raffiné. En effet, celles-ci ont baissé (- 109 kt en 2019 selon l'agence chilienne Cochilco) au profit des exportations de concentrés de cuivre (+ 239 kt). Cependant, les chiffres devraient à nouveau s'inverser puisqu'il est attendu une hausse de la production de 105 kt pour le cuivre raffiné et une baisse de 52 kt pour les concentrés en 2020. À noter que la production des sous-produits comme le molybdène va également pâtir des arrêts des fonderies.

4.5. BAISSE DES TENEURS ET CONSÉQUENCES

Même si la quantité de ressources disponibles n'est pas encore inquiétante à court terme, la qualité de ces ressources pose plus de problèmes, en particulier la teneur moyenne du minerai.

Si, il y a plusieurs années, la baisse des teneurs dans les gisements exploités tenait en grande partie à des facteurs technologiques (productivité accrue grâce à l'augmentation de la taille des engins miniers et donc possibilité d'exploiter à des teneurs plus faibles tout en réalisant des bénéfices), elle s'explique aujourd'hui davantage par des facteurs géologiques.

En effet, la teneur moyenne des gisements exploités a chuté de 41 % en presque 30 ans, passant de 1,68 % à 0,98 % entre 1990 et 2017 (Figure 47). Par ailleurs, la teneur moyenne des mines en exploitation est d'environ 0,62 % Cu et celle des mines récemment ouvertes de seulement 0,53 %. Pour les projets en cours d'étude, la teneur chute même à 0,43 % (Northey *et al*., 2017).

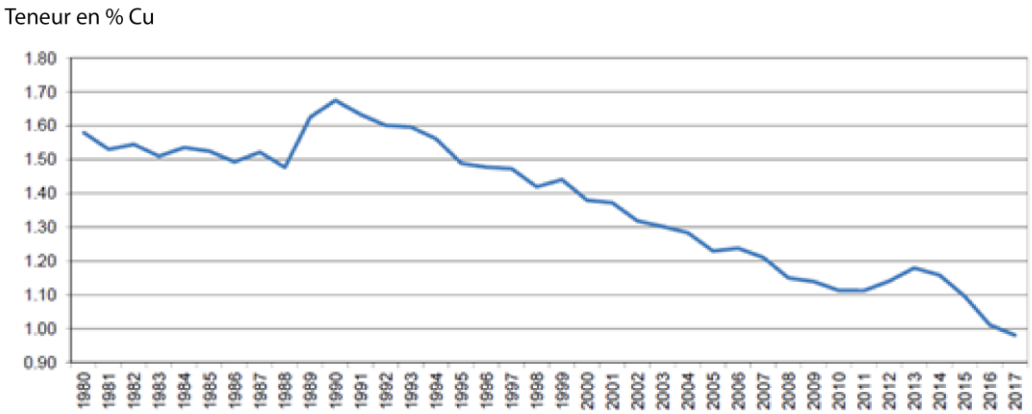


Figure 47 : Évolution de la teneur moyenne des gisements exploités entre 1980 et 2017 (source : Freepoint, 2018).

Une des principales causes de la baisse des teneurs est que les meilleurs gisements ont été exploités en premier et sont maintenant épuisés. Par exemple, les parties riches superficielles des grands gisements porphyriques dans les Andes (zone de cémentation à sulfures secondaires, riche en cuivre avec entre 1 et 3 % Cu, Figure 7) ont été exploitées et les compagnies utilisent maintenant les minerais sulfurés, moins riches en cuivre (0,3 à 0,9 % Cu).

De plus, les découvertes de gisements riches sont de plus en plus rares, ce qui oblige les compagnies à se rabattre sur des gisements de moindre qualité, plus pauvres, plus isolés ou encore, situés dans des zones instables.

Néanmoins, la chute des teneurs en cuivre est à nuancer car il existe de fortes disparités géographiques (Tableau 9). La teneur moyenne des gisements de cuivre de la Copperbelt (RDC-Zambie), encore sous-exploitée actuellement, est d'environ 1,68 % Cu, contre seulement 0,48 % Cu pour la zone Chili-Pérou (Mudd & Jowitt, 2018). Plus qu'en Asie et en Europe, c'est en Afrique que la teneur en cuivre des gisements répertoriés est la plus haute avec 1,11 % Cu. À l'inverse, la moyenne sud-américaine est la plus basse du fait de l'exploitation des gros porphyres cuprifères à faible teneur. Dans le tableau 9, le terme « eaux internationales » corresponde aux ressources sous-marines situées au-delà des zones économiques exclusives (ZEE), tels que les nodules, encroûtements et cheminées volcaniques (Tableau 9).

Zone géographique	Teneur moyenne en %Cu
Afrique	1,11
Eaux internationales	1,07
Asie	0,67
Europe	0,63
Océanie	0,43
Amérique du Nord	0,39
Amérique du Sud	0,30

Sources des données : Mudd & Jowitt, 2018

Tableau 9 : Teneur moyenne en cuivre des gisements exploités ou seulement étudiés par zone géographique.

De plus, plusieurs études ont permis de mettre en évidence de très gros gisements, parfois très riches en cuivre mais à de plus grandes profondeurs, donc avec des coûts de production plus hauts. Pour rentabiliser leur développement, ces gisements pourront entrer en production si les prix restent durablement élevés.

Figure 48 : La mine de Collahuasi au Chili (© ANGLO AMERICAN).

4.6. AUTRES FACTEURS POUVANT IMPACTER LA PRODUCTION DE CUIVRE

Outre les paramètres vus précédemment, de grands enjeux affectent le développement du secteur minier mondial, et en particulier sud-américain. Nous pouvons citer entre autres les accidents de terrain, les aléas climatiques ou encore les grèves qui peuvent conduire à la signature de nouveaux accords entre les employés et la direction des mines. Ces facteurs ont été évalués par les consultants de FREEPOINT COMMODITIES et contribuent à faire baisser en moyenne de 4 à 8 % la production annuelle mondiale de cuivre (Figure 49). Bien que le calcul ait été effectué à l'échelle mondiale, un bon nombre de ces facteurs est transposable à la zone Amérique du Sud, à laquelle plusieurs autres problématiques peuvent être ajoutées comme les conséquences des impuretés dans les minerais par exemple.

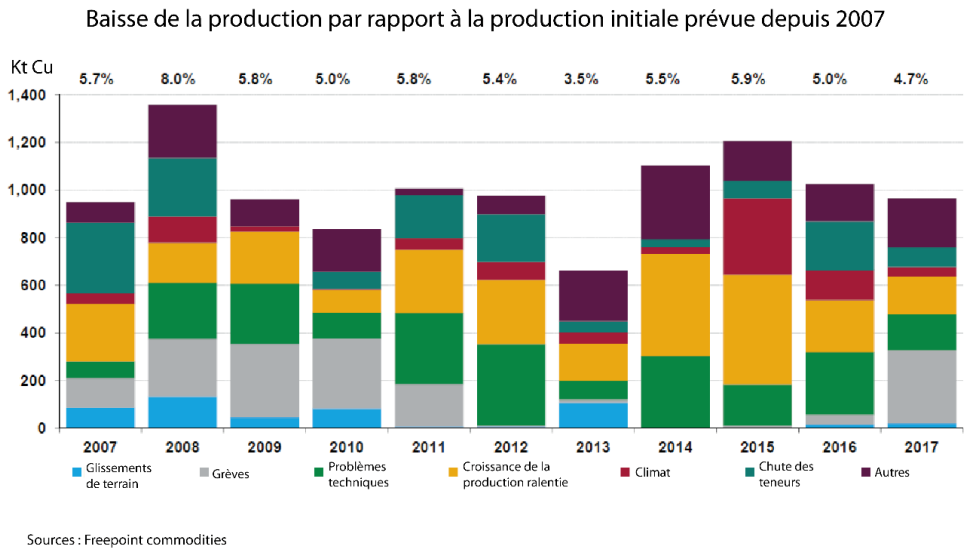


Figure 49 : Facteurs ayant impacté à la baisse la production minière mondiale de cuivre depuis 2007.

4.7. CONSOMMATION D'EAU : EXEMPLE DU CHILI

En Amérique du Sud et tout particulièrement au Chili, la consommation d'eau nécessaire à la production minière pose de plus en plus de problèmes, à tel point que plusieurs projets sont stoppés par les autorités, sous la pression de la population locale. Au Chili, la plupart des grandes mines de cuivre sont situées au nord de Santiago, dans le désert d'Atacama, l'un des plus secs au monde. L'accès à l'eau et surtout aux nappes souterraines est donc devenu un enjeu stratégique.

Au vu des procédés et des volumes traités, l'industrie minière en général, et celle du cuivre en particulier, est très grande consommatrice d'eau, notamment durant le traitement minéralurgique du minerai. L'eau est par exemple utilisée pour les besoins suivants :

- mine et transport des minerais : extraction des minerais, plaquage des poussières au sol ;
- traitements minéralurgiques : concassage, broyage, triage, flottation ;
- procédé hydrométallurgique : solution de lixiviation avec acide et eau, évaporation ;
- procédé pyrométallurgique : électrolyse ;
- autres : nettoyage, nourriture, sanitaires etc.

Les compagnies ne cessent de développer de nouveaux moyens pour récupérer et recycler les eaux usées présentes au cours des étapes de traitements ou dans les déchets. Puisque la consommation d'eau utilisée par l'industrie minière dépend en premier lieu du niveau de production, modéliser la demande en eau nécessite auparavant de prévoir et d'anticiper la production minière de cuivre. L'organisme étatique Cochilco prévoit une hausse de 28 % sur 10 ans de la production minière, qui passerait d'environ 5,8 Mt à plus de 7 Mt entre 2018 et 2029. Plus en détail, la production de cuivre par la filière hydrométallurgique poursuivrait sa baisse (0,821 Mt en 2029 contre 1,586 Mt du total produit en 2017) au profit de la production de concentrés (6,821 Mt en 2029 contre 3,917 Mt en 2017), et en particulier de sulfures (+75 % en 10 ans). La part de production de blisters et de cathodes devrait quant à elle rester sensiblement la même.

La production minière, dont le taux de croissance annuel moyen devrait être de 2,1 % entre 2018 et 2029, va tirer la demande en eau à un rythme de 4,2 % par an (Figure 50).

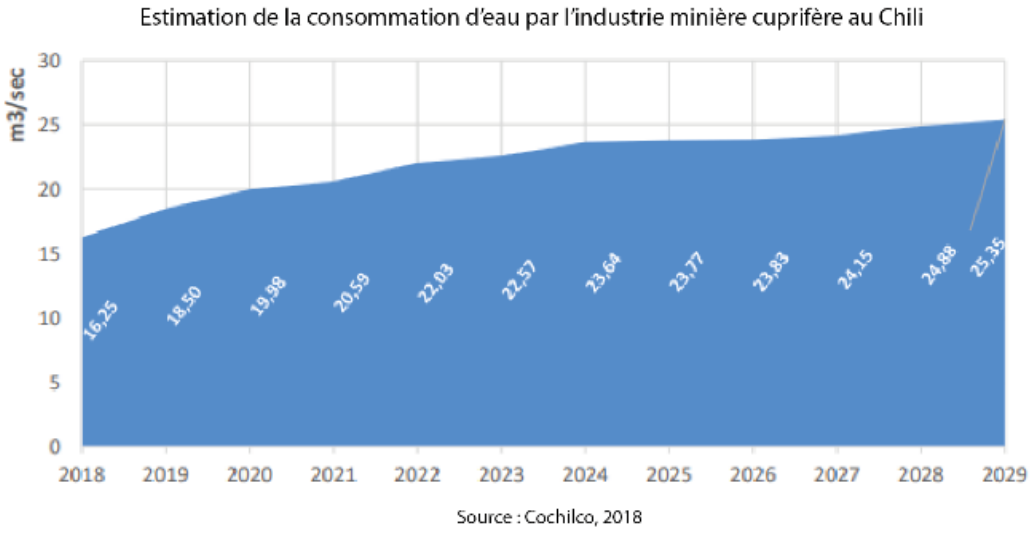
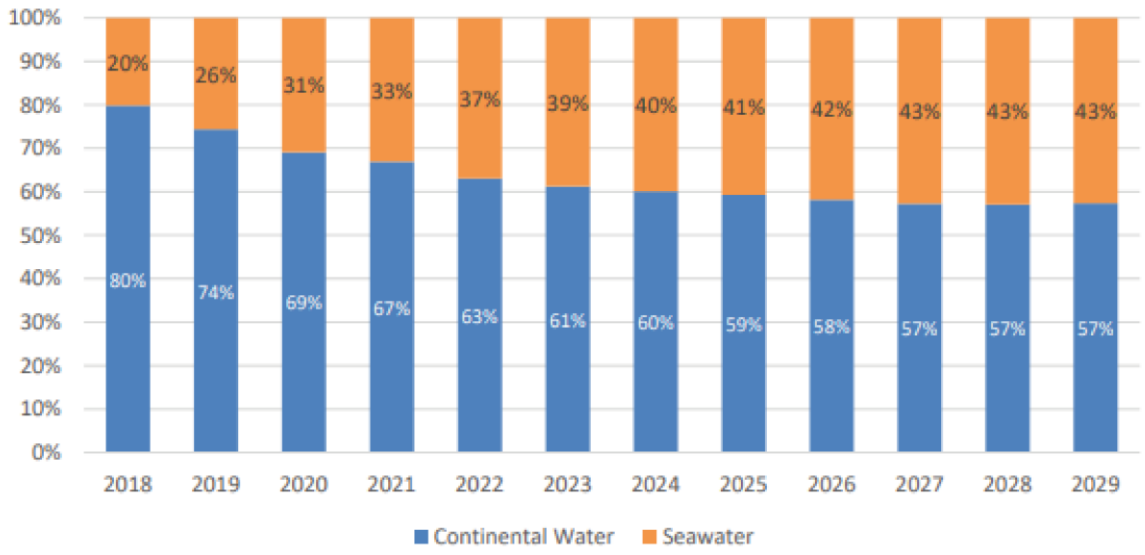


Figure 50 : Estimation de la consommation d'eau par l'industrie minière cuprifère chilienne entre 2018 et 2029.

Ce différentiel de hausse est notamment dû à la variation des minerais, quantitativement et qualitativement. En effet, le traitement des minerais sulfurés se fait par le procédé de flottation qui consomme d'importantes quantités d'eau. Par ailleurs, la baisse de teneurs en cuivre dans les minerais implique que pour produire une même quantité de cuivre, il faut traiter un volume de roches plus importantes, et donc consommer davantage d'eau.

Pour faire face à la demande croissante en eau et aux problèmes qui y sont associés, plusieurs usines de concentration de minerais utilisent maintenant de l'eau de mer, dessalée ou telle quelle. Cochilco a également calculé que si la consommation en eau « continentale » devait croître de 12 % en 10 ans pour atteindre 14,5 m^3 pour produire 1 tonne de cuivre, celle de l'eau de mer devrait s'envoler avec une hausse de 230 % entre 2018 et 2029. Cela représenterait 43 % de la demande totale en eau. Par ailleurs, la consommation en eau salée serait de 10,8 m^3 / t en 2029 (Figure 51).

Estimation de la consommation d'eau douce et salée par l'industrie minière cuprifère au Chili



Source : Cochilco, 2018

Figure 51 : Estimation des parts de consommation d'eau douce et salée par l'industrie minière cuprifère chilienne entre 2018 et 2029.

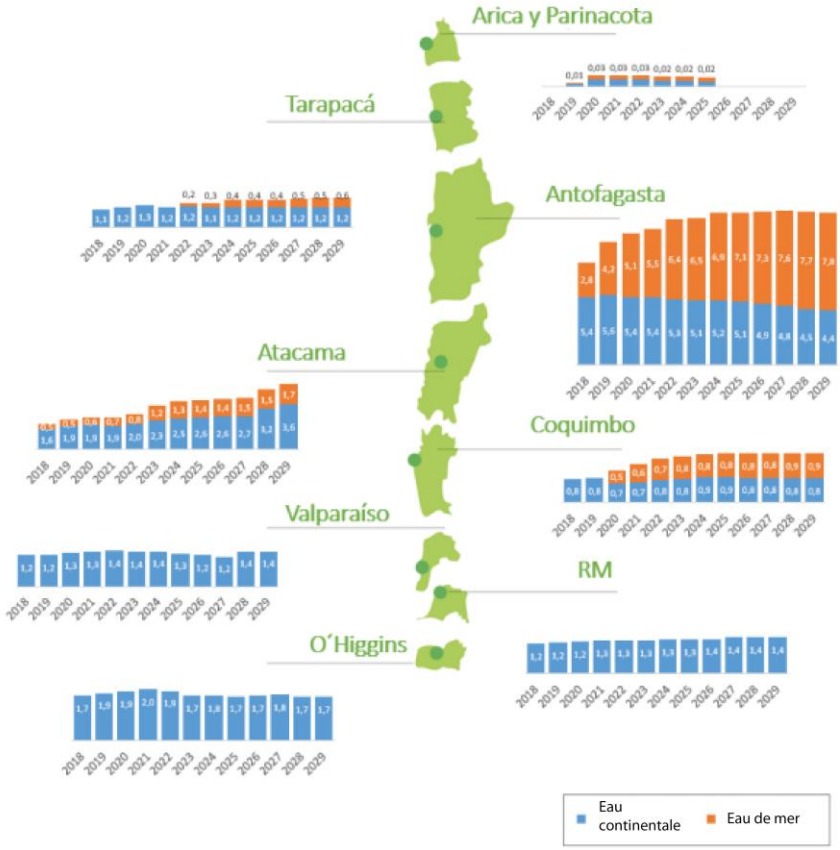
En termes de consommation par tonne de cuivre produite, le Chili consomme actuellement environ 13 m^3 d'eau continentale et 3,3 m^3 d'eau de mer. D'ici 2029, il devrait ensuite passer respectivement à 14,5 (+ 12 %) et 10,8 m^3 (+ 230 %). Néanmoins, il existe de fortes disparités sur le type d'eau consommée par région. C'est dans les régions d'Antofagasta et de Coquimbo que l'eau de mer, brute et dessalée, est la plus utilisée (Figure 52).

Dans la région d'Antofagasta, les entreprises minières ont développé leur filière eau salée au détriment de l'eau douce. C'est le cas des mines d'Escondida, Centinela, Antucoya, Mantos de la Luna, Las Cenizas Taltal ou encore les usines de traitement de J.A Moreno et Sierra Gorda. De plus, certains projets en développement ou certaines mines en extension devraient utiliser de l'eau de mer, traitée ou non, comme les usines de CODELCO ou EL ABRA. Dans la région de Coquimbo, il est envisagé de construire une usine de dessalement à osmose inverse avec une capacité de 400 litres/seconde pour la consommation de plusieurs projets comme l'extension de Los Pelambres ou le projet Dominga. Enfin, la région Atacama, l'une des plus sèches du monde, devrait voir l'arrivée de plusieurs usines de dessalement en raison

du nombre croissant de projets miniers ou d'extension comme Mantoverde, Candelaria, Santo Domingo ou encore Diego de Almagro.

D'ici 2029, Cochilco estime que l'utilisation de l'eau de mer, dessalée ou non, représentera 64 % de l'eau utilisée dans la région d'Antofagasta, 51 % dans la région de Coquimbo, et 32 % dans les régions d'Atacama et de Tarapaca.

Estimation de la consommation d'eau continentale et d'eau de mer par l'industrie minière cuprifère chilienne selon les régions



Source : Cochilco, 2018

Figure 52 : Estimation de la consommation d'eau continentale et d'eau de mer par l'industrie minière cuprifère chilienne selon les régions entre 2018 et 2029.

Néanmoins, construire des usines de dessalement et les utiliser demande un très gros investissement et contribue à faire monter les coûts de production. En 2013, les coûts de traitement pour dessaler l'eau de mer étaient de 5 $/m^3 au Chili, contre seulement 2,5 $/m^3 aux USA. Les dépenses des usines à cet effet peuvent atteindre plusieurs centaines de millions de dollars, voire dépasser le milliard de dollars. Cependant, malgré ce coût bien plus élevé, les entreprises seraient obligées de se tourner vers cette technologie puisque plusieurs projets d'importance ont été remis en question à cause de consommations excessives en eau potable ou bien à cause de risques de pollutions d'eau superficielle.

5. Le marché des déchets de cuivre : impact des nouvelles régulations chinoises sur l'offre

Maïté Le Gleuher

5.1. PLACE DU CUIVRE SECONDAIRE DANS LA PRODUCTION MONDIALE

Le cuivre est recyclable et réutilisable à l'infini sans perte de performance ni de propriétés. En 2017, l'International Copper Study Group (ICSG) estimait que 33 % de la demande mondiale en cuivre était satisfaite grâce au cuivre recyclé (Figure 53). Environ 9,5 Mt de cuivre provenant de produits en fin de vie et de la refonte directe de chutes d'usine ont été utilisés en 2017. Cette utilisation est de 9,7 Mt en 2018.

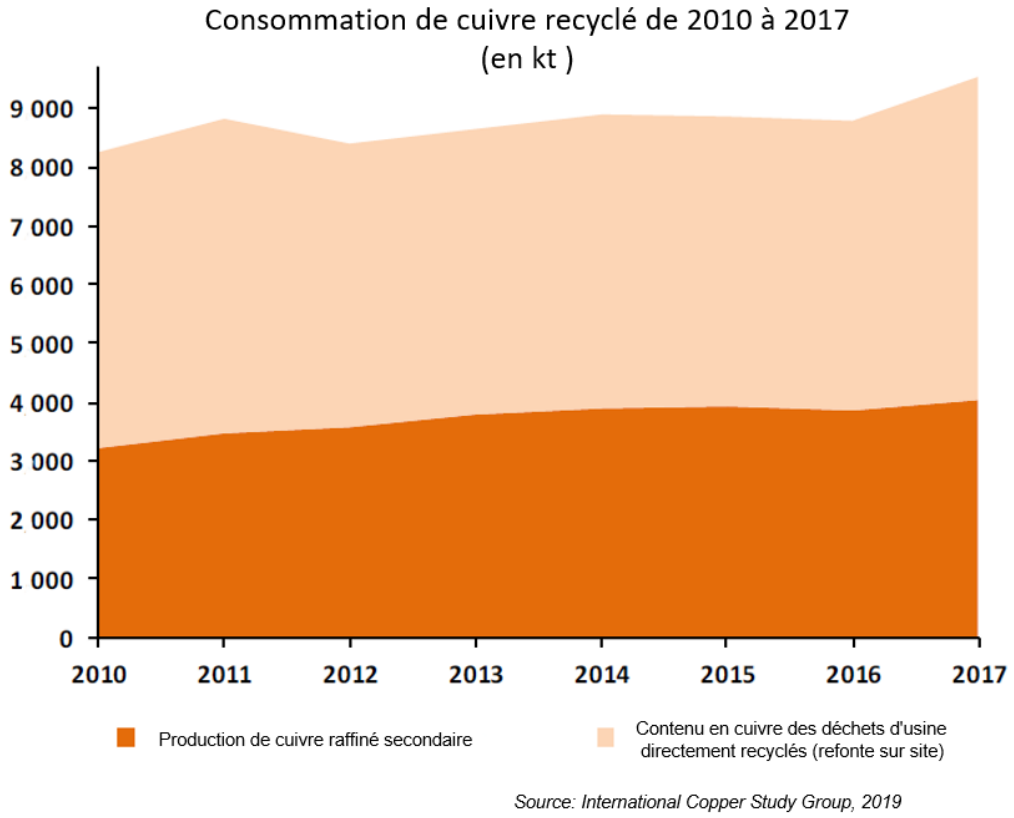


Figure 53 : Consommation de cuivre recyclé de 2010 à 2017.

La production mondiale de cuivre raffiné secondaire, c'est-à-dire issu principalement de la collecte de produits mis au rebut, s'élevait à 4 Mt en 2017 et s'est maintenue à ce niveau en 2018 ; elle représentait 17 % de la production totale de cuivre raffiné cette même année. Pour sa part, la Chine en a produit 2,2 Mt à partir de déchets importés ou générés sur place, soit 24 % de sa production totale de métal raffiné (ICSG). La part de la production chinoise de cuivre raffiné secondaire a diminué depuis quelques années - elle s'élevait à 32 % en 2012 - suite à la mise en place de normes environnementales plus contraignantes pour les raffineries. Pour comparaison, la production secondaire de cuivre raffiné représentait 41 % de la production allemande.

Les fabricants de semi-produits utilisaient également moins de déchets (8 % en 2017) selon le Shanghai Metals Market (SMM), car le faible écart entre le prix des cathodes et celui des déchets ne les incite pas à utiliser ces derniers.

5.2. LES DÉCHETS DE CUIVRE CONSOMMÉS EN CHINE

Environ 60 % des déchets de cuivre utilisés dans l'économie chinoise étaient importés en 2018, contre 80 % dix ans plus tôt (SMM, 2019).

5.2.1. Les déchets générés en Chine

Si l'urbanisation du pays et l'amélioration du niveau de vie ont décuplé la consommation chinoise de cuivre, une large proportion des produits contenant ce cuivre est encore en usage. À partir de la prochaine décennie, des quantités considérables de déchets devraient cependant arriver sur le marché intérieur avec la mise au rebut des équipements et des biens de consommation en fin de vie.

Le remplacement des lignes électriques (30 %), les appareils électroménagers en fin de vie (25 %) ainsi que le secteur du bâtiment (22 %) fournissent l'essentiel des déchets cuivreux (Figure 54). Le taux de récupération des déchets de cuivre a fortement progressé et se situerait autour de 60 % depuis 2013 (Wang *et al.*, 2017) avec l'amélioration des technologies de recyclage, les incitations fiscales - telles que des réductions de TVA pour les entreprises agréées de recyclage et de transformation - et la forte demande en cuivre (Figure 55).

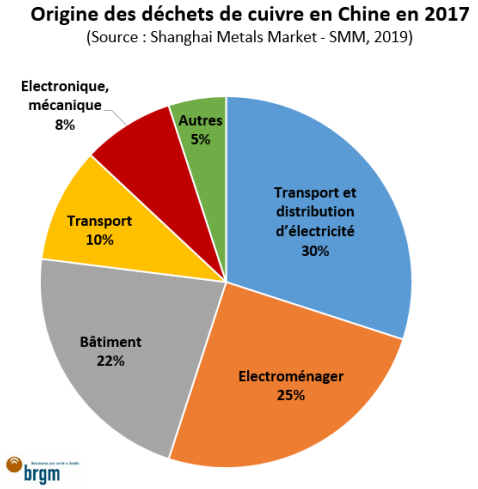


Figure 54 : Origine des déchets de cuivre en Chine en 2017.

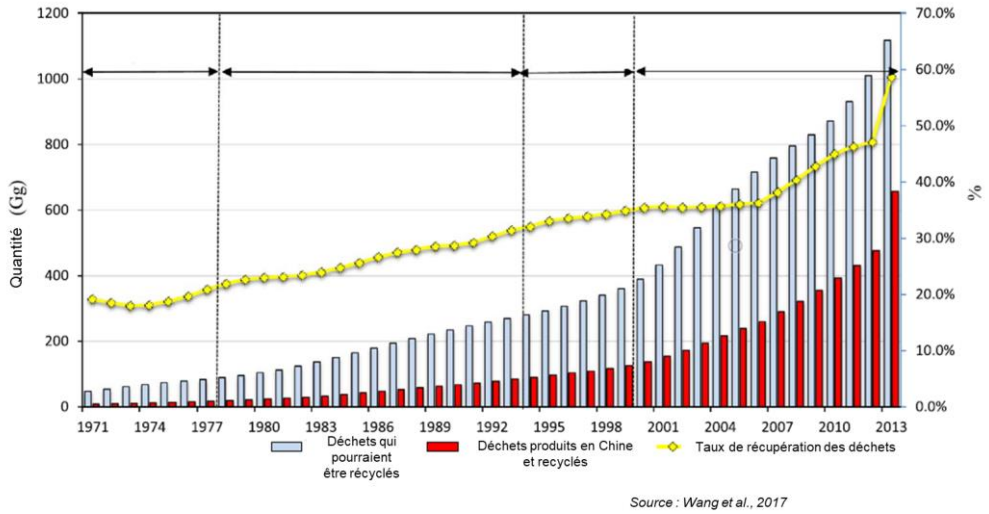


Figure 55 : Évolution de la production et du taux de récupération des déchets de cuivre en Chine de 1971 à 2013 (source : Wang et al.*, 2017).*

5.2.2. Les déchets importés et les nouvelles régulations chinoises

a) Les différents types de déchets importés

Les déchets et débris de cuivre importés relèvent de l'une des deux catégories suivantes :

- **catégorie 6** : ces déchets ne nécessitent aucun démantèlement et la teneur moyenne en cuivre des lots est d'environ 75 % (SMM, 2019). Environ 10 % des importations chinoises de déchets entrant dans cette catégorie sont des matériaux de choix contenant plus de 99 % de cuivre, tels que les câbles électriques dénudés – le cuivre « Millberry » ou « Berry » des recycleurs – qui peuvent être utilisés directement par les raffineries. Le cuivre « mêlé » qui est constitué de tuyaux de plomberie et de chutes diverses présentant, par exemple, des traces de soudures et contenant au moins 95 % de cuivre doit être fondu avant de subir un convertissage. Il représente environ la moitié des arrivages, le reste étant constitué de déchets de bronze et laiton (Figure 56) ;

Figure 56 : Exemples de déchets de catégorie 6. a) Cuivre Millberry ; b) Cuivre mêlé (source : http ://www.ribafarre.com/).

- **catégorie 7** : ces déchets sont constitués de matériels qui doivent préalablement être démontés pour récupérer le cuivre et la teneur moyenne des lots est d'environ 25 %. Ils sont typiquement composés de câbles électriques avec isolant (cuivre gainé), de parties de moteurs, de radiateurs, etc. (Figure 57) ;

Figure 57 : Exemples de déchets de catégorie 7. a) Câbles électriques gainés ; b). Réservoirs ; c) Stators de moteur électrique; d) Déchets de plomberie (source : http ://www.asm-recycling.co.uk/scrap-metal/copper.html ; http ://ecometal.mc/en/rottami.php ; https ://www.scrapmonster.com/scrap/no-2-insulated-copper-wire-scrap/13).

b) Les nouvelles régulations

Pour répondre à son besoin énorme en matières premières, la Chine a ouvert sa porte aux déchets produits par les pays industrialisés dès les années 1980. Le pays est rapidement devenu la destination incontournable des déchets métalliques et non métalliques de la planète. Cependant, face à l'ampleur des volumes de déchets - parfois mal triés ou non recyclables, à leur cortège de problèmes sanitaires et environnementaux dénoncés dans les médias, et à une montée de l'opinion chinoise contre ces importations, le gouvernement chinois a durci le ton. Les inspections et les blocages des cargaisons dans les ports chinois se sont intensifiés durant l'opération « barrière verte - green fence » en 2013. Cette opération qui visait principalement les arrivages de déchets électroniques et de ballots de papiers et de plastiques a également conduit à une diminution des importations de déchets cuivreux.

En juillet 2017, le gouvernement chinois a annoncé à l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) sa volonté de réduire ou d'interdire l'importation d'un certain nombre de déchets solides, dont les déchets cuivreux (Reuters, 2018 & 2019 ; SMM, 2019).

Les nouvelles règles d'importation concernant le cuivre et déjà entrées en vigueur incluent :

- un resserrement du seuil d'impuretés autorisé à 1 %, depuis le 1er mars 2018 ;
- une restriction sur les importations de déchets de cuivre, nécessitant un démantèlement avant leur utilisation (déchets de catégorie 7 de la classification chinoise) en 2018 ;
- l'interdiction d'importer des déchets de cuivre nécessitant un démantèlement avant leur utilisation (déchets de catégorie 7) depuis le 1er janvier 2019 ;
- une restriction sur des importations de déchets de cuivre pouvant être directement utilisés (déchets de catégorie 6, Code HS 7404000090), avec l'introduction de quotas et de permis d'importation depuis le 1er juillet 2019.

Parallèlement à ces restrictions s'est ajoutée, dans un contexte de guerre commerciale entre les États-Unis et la Chine, l'imposition d'un droit de douane de 25 % sur les importations de déchets de cuivre en provenance des États-Unis, en riposte aux taxes américaines mises en place en août 2018.

c) L'évolution des importations de déchets cuivreux au cours des 25 dernières années

Portées par le développement économique du pays, les importations chinoises de déchets de cuivre ont plus que doublées de 2000 à 2008 pour culminer à 5,6 Mt, en masse brute (code HS 7404), avant la crise financière globale (Figure 58). En 2018, et selon les chiffres des douanes chinoises, ces importations ne s'élevaient plus qu'à 2,4 Mt car limitées par la nouvelle politique environnementale. En 2019, seulement 1,5 Mt de déchets de catégories 6 devraient arriver sur le marché chinois, dont 0,6 Mt de quotas (SMM) pendant le second semestre (Tableau 10).

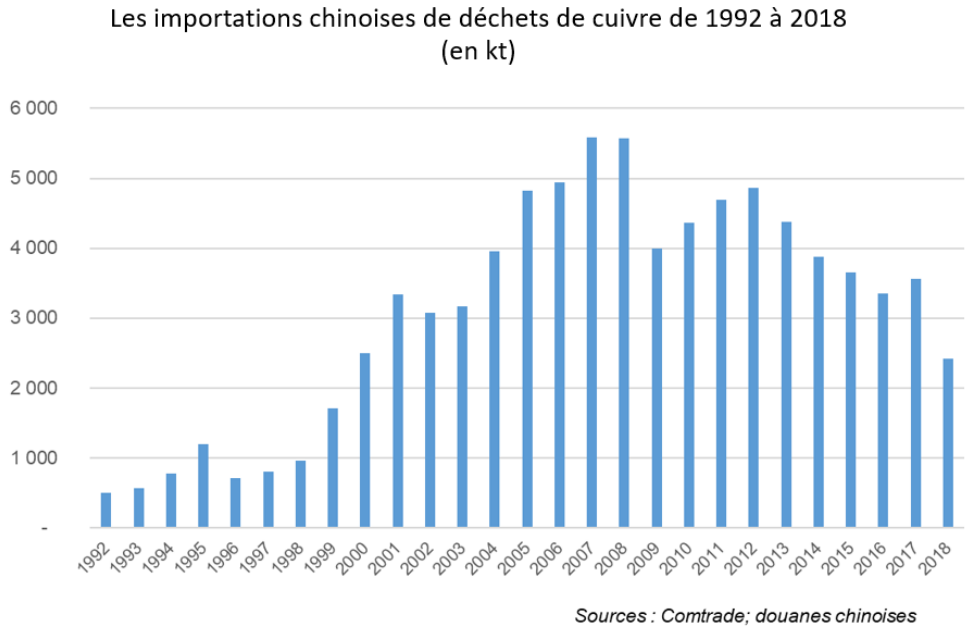


Figure 58 : Évolution des importations chinoises de déchets de cuivre de 1992 à 2018.

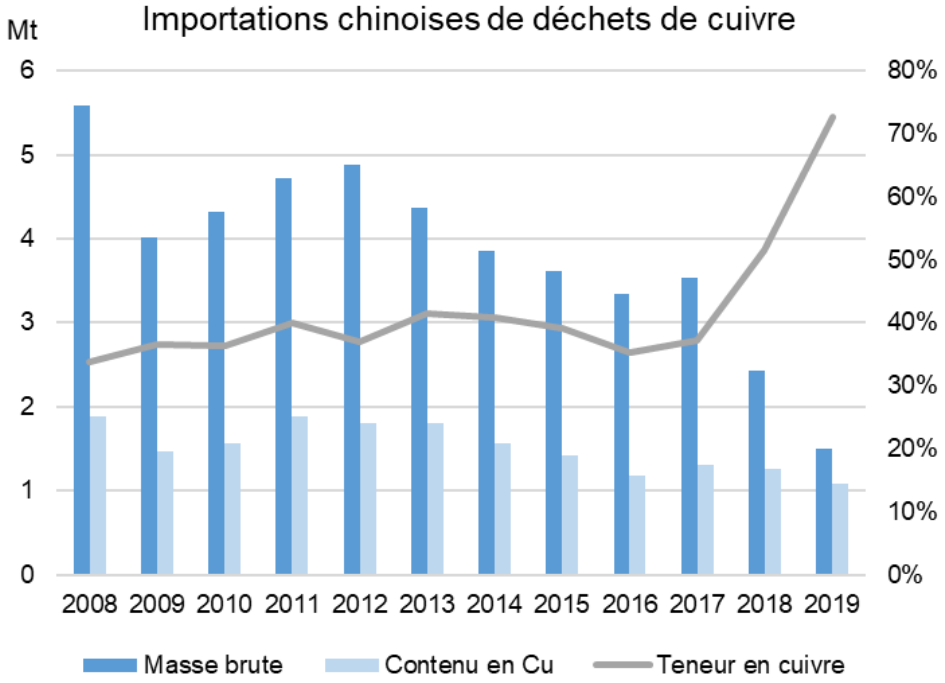
Date de publication	Tonnages	Cuivre contenu
	Tonnes	Tonnes
20/06/2019	240 429	192 343
10/07/2019	124 450	99 560
14/08/2019	87 680	70 144
23/09/2019	31 658	25 326
17/10/2019	57 365	45 892
05/11/2019	11 110	8 888
Total	552 692	442 153

Source : Shanghai Metals Market

Tableau 10 : Quotas d'importations de déchets cuivreux de catégorie 6 en 2019 (au 05/11/2019).

d) Teneurs en cuivre des déchets importés

Les teneurs en cuivre des arrivages ont, par contre, augmenté : n'excédant pas 15 % en 2000, elles se sont maintenues à environ 35-40 % sur la période 2008-2017 (Figure 59). La teneur en cuivre des déchets importés en 2019 s'est considérablement accrue suite à l'embargo sur les importations de déchets de catégorie 7, pauvres en cuivre. La hausse de la quantité de cuivre importé dans les déchets a donc partiellement compensé la chute des tonnages. Selon SMM, le contenu en cuivre des importations en 2019 devrait atteindre 1,09 Mt, soit une diminution relativement faible de l'ordre de 160 kt par rapport à 2018.



Source: Douanes chinoises, Shanghai Metals Market

Figure 59 : Évolution des teneurs en cuivre des déchets importés de 2008 à 2019.

5.3. RECONFIGURATION DES FLUX MONDIAUX DE DÉCHETS DE CUIVRE

Les restrictions sur les importations de déchets de cuivre ainsi que les droits de douanes imposés sur les importations en provenance des États-Unis ont profondément bouleversé la carte des flux mondiaux de ces déchets depuis 2018.

Les États-Unis, premier producteur et exportateur mondial de déchets de cuivre, ont été le principal fournisseur de la Chine durant 16 années. En 2017, la Chine et Hong Kong accueillaient 72 % des exportations de déchets de cuivre et d'alliages de cuivre des États-Unis (724 kt), le reste étant principalement expédié au Canada, Allemagne et Corée du Sud (Figure 60).

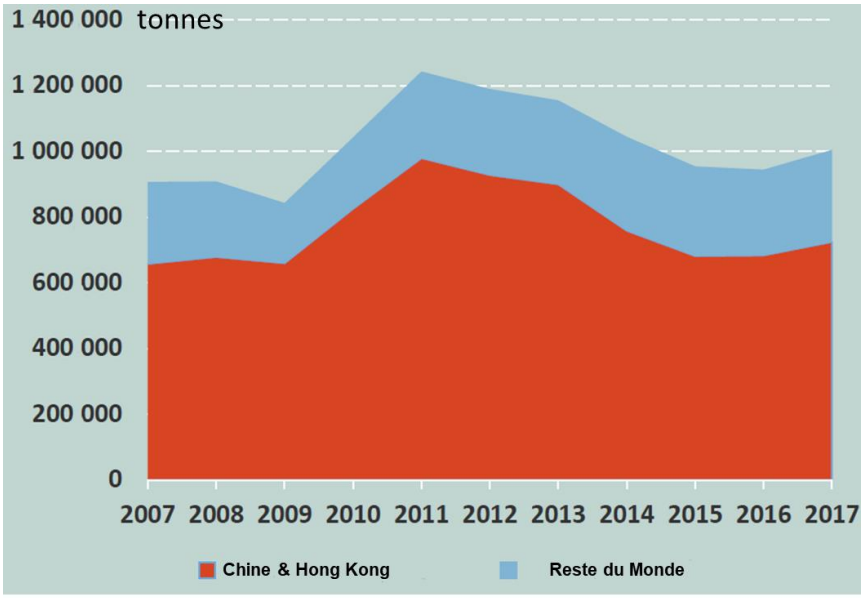


Figure 60 : Les exportations américaines de déchets de cuivre et d'alliages de cuivre de 2007 à 2017(source : ISRI, 2019).

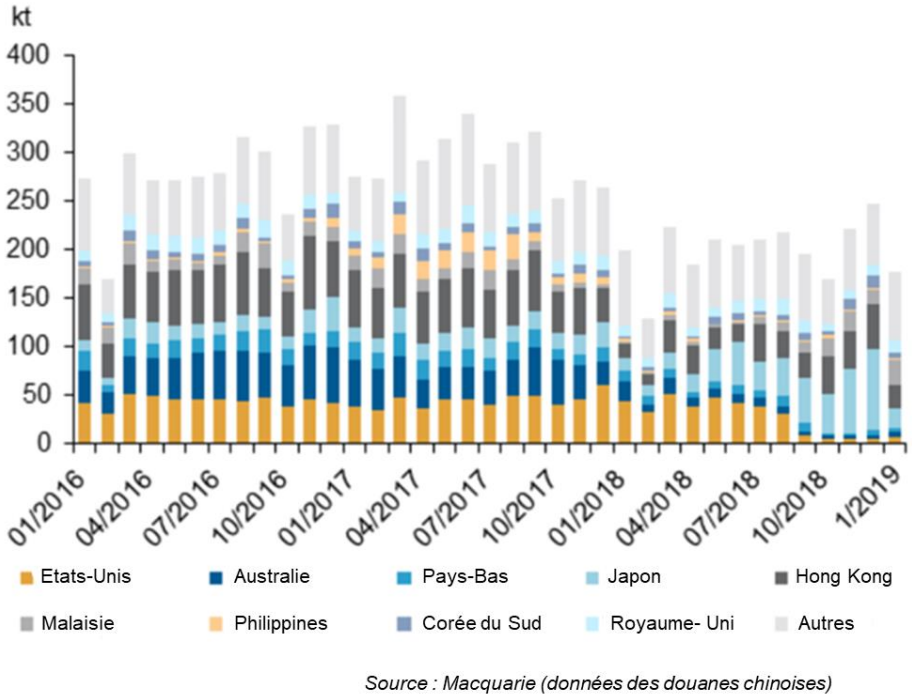


Figure 61 : Provenance des importations chinoises de déchets de cuivre de janvier 2016 à janvier 2019 (source : ISRI, 2019).

Les importations chinoises provenant soit directement des États-Unis, soit via Hong Kong ou un autre pays tiers, ont chuté considérablement avec l'imposition de droits de douanes dès 2018 (Figure 61). Les restrictions sur les importations se font également ressentir dans l'Union européenne et en Australie qui envoyaient surtout en Chine des matériaux nécessitant un démantèlement, gourmand en main d'œuvre et susceptible de générer des pollutions (catégorie 7).

Les pays producteurs ont donc dû stocker leurs déchets ou trouver de nouveaux exutoires. Une partie de la valorisation des déchets de catégorie 7 est redirigée vers les pays de l'Asie du Sud-Est comme la Malaisie, la Thaïlande et les Philippines notamment. Les matériaux y sont démantelés et purifiés avant d'être exportés vers la Chine en tant que déchets de catégorie 6. Bon nombre d'industriels chinois, soucieux d'assurer leur approvisionnement en déchets, investissent dans des sites de traitement de déchets et des fonderies dans la région, notamment des fonderies d'alliage de cuivre.

5.4. AUGMENTATION DES IMPORTATIONS DE CONCENTRÉS DE CUIVRE

Pour pallier le resserrement de l'offre en déchets cuivreux, les raffineurs et fondeurs chinois ont acheté plus de concentrés de cuivre en 2019. Ils ont profité de la hausse des quotas d'exportations de concentrés indonésiens de la mine de Grasberg, ainsi que de la montée en puissance de la mine de Cobre Panama (First Quantum), au Panama. Les importations ont augmenté de 8 % pour atteindre 18 Mt (en masse brute) sur la période janvier-octobre 2019, par rapport à 2018 (Figure 62).

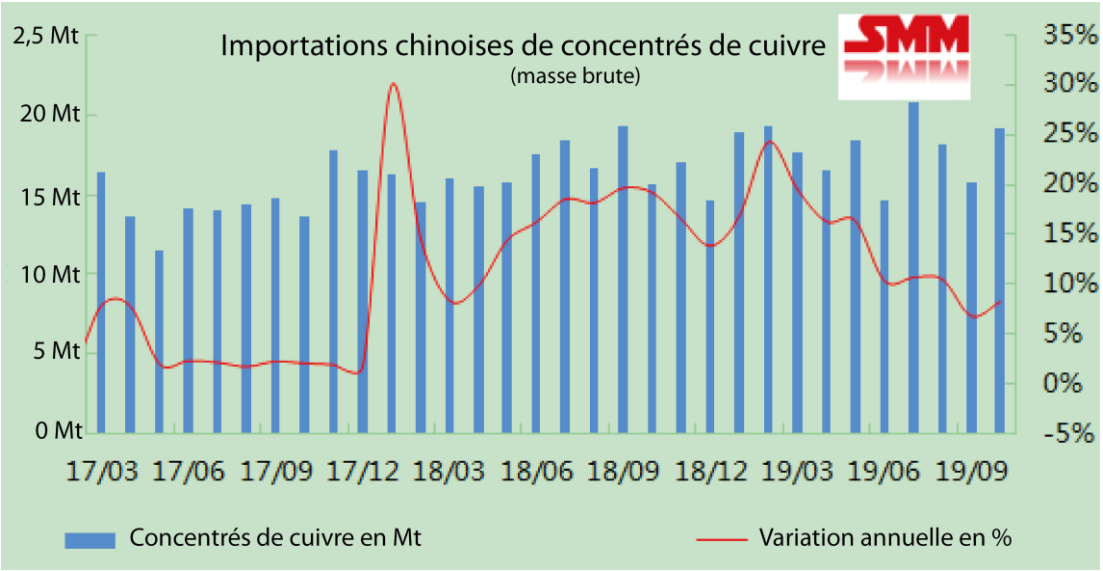


Figure 62 : Les importations chinoises de concentrés de cuivre de mars 2017 à septembre 2019 (source : SMM, 2019).

5.5. VERS UNE RECLASSIFICATION DES DÉCHETS EN MATIÈRES PREMIÈRES ISSUES DU RECYCLAGE

Le Ministère chinois de l'écologie et de l'environnement a annoncé un arrêt total de toutes les importations de déchets solides d'ici à la fin de l'année 2020. Face aux difficultés d'approvisionnement en déchets des industriels chinois, les autorités chinoises seront certainement amenées à autoriser les déchets de catégorie 6 à sortir du statut de déchet après préparation pour être reclassifiés en tant que « matières premières issues du recyclage ».

6. Perspectives

Mathieu Leguérinel

Après une hausse de 2,5 % en 2018, la production minière mondiale de cuivre devrait reculer de 0,5 % en 2019 et s'établir à 20,5 Mt. Sur les quelques projets qui ont vu le jour en 2019, seul celui de Cobre Panama (compagnie First Quantum) dont la production a débuté au second trimestre 2019 est significatif et devrait mettre sur le marché entre 140 et 175 kt de concentrés de cuivre cette année. Hormis l'expansion de la mine de Toquepala au Pérou (+ 100 kt de concentrés de cuivre par an), les autres projets affichent des capacités de production de concentrés de cuivre d'environ 50 kt. La plupart des grands projets ne commenceront pas à produire avant 2021 (au plus tôt) et produiront majoritairement des concentrés (Kamoa-Kakula, Spence, Mina Justa etc.). Selon l'ICSG, la production minière de cuivre devrait progresser de 2 % en 2020 et plus de 2 % en 2021.

La production mondiale de cuivre raffiné ne devrait croître que de 0,5 % en 2019, à 24,6 Mt, bien en deçà de la hausse enregistrée en 2018 par rapport à 2017 (+ 2,5 %). Les fermetures temporaires pour la mise aux normes environnementales ont été plus importantes que prévues au Chili et en Zambie, avec des baisses respectives sur un an de 250 kt et 100 kt. En revanche, la Chine affiche une hausse de 6 % de sa production de métal raffiné grâce à l'installation de nouvelles capacités, dont Nanguo (Guangxi), Baiyin II ou encore Qiqihaer (ZIJIN MINING). Hors Chine, la production mondiale de cuivre raffiné devrait baisser de 2,5 % en 2019. La production mondiale de cuivre raffiné devrait augmenter de 4 % en 2020 grâce à une disponibilité plus importante de concentrés sur le marché et l'augmentation des capacités de production en Chine. La production de cuivre raffiné secondaire (issue du recyclage) devrait, quant à elle croître de 1,5 % en 2019 et 2 % en 2020.

Pour l'ICSG, la demande apparente mondiale de cuivre ne devrait augmenter que de 0,3 % en 2019 à 24,6 Mt (contre 3,3 % en 2018), en raison d'un repli significatif de la croissance de la demande en Europe et d'un ralentissement en Chine. Les analystes de l'ICSG et de CRU anticipent une reprise de la croissance de la demande entre 2020 et 2022 qui n'excédera pas 2 %, avec une progression de la demande en Inde (+6 %), Chine (+1,8 %) et dans le reste de l'Asie, alors qu'elle ne devrait pas dépasser 1 % dans le reste du monde.

Si l'ICSG ou Fastmarkets s'accordent à dire que l'année 2019 sera marquée par un déficit en cuivre estimé entre 300 et 350 kt, la suite est moins évidente et les opinions divergent puisque Fastmarkets imagine la tendance se poursuivre en 2020 (- 350 kt) alors que l'ICSG voit un inversement de la tendance (+ 280 kt) en 2020 et 2021 (+ 70 kt). Au-delà, CRU parie sur un marché du cuivre raffiné en surplus jusqu'en 2022 (entre 100 et 200 kt) puis en déficit en 2023 et 2024.

La chute des prix du cuivre durant le premier semestre 2019 est une conséquence de plusieurs facteurs dont les principaux sont le ralentissement de l'économie mondiale, les tensions géopolitiques États-Unis - Chine et le renforcement du dollar américain. Assez curieusement, les pertes de production dues aux perturbations (grèves, accidents, météo etc.), la faiblesse des stocks et des frais de traitement et de raffinage (TC/RC) bas (respectivement 81 $/t et 8,1 c/lb) n'ont pas enrayer la baisse des cours. Néanmoins, le rebond du cours du cuivre observé sur le second semestre 2019 (6 038 $/t en moyenne sur les 19 premiers jours de décembre contre 5 708 $/t en août) peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- une demande importante en cuivre de la Chine sur la fin d'année, reflétée par une hausse des importations de concentrés de cuivre et de cuivre raffiné ;

- la signature d’un accord commercial entre Washington et Pékin, évitant l’introduction le 15 décembre 2019 de nouvelles taxes sur les importations étatsuniennes provenant de Chine ;
- le niveau très bas des stocks chinois, probablement inférieurs à 250 kt (plus bas depuis juin 2013) ;
- les restrictions sur les importations de déchets de cuivre en Chine ;
- la hausse de capacité des fonderies et donc un potentiel accroissement de la demande en concentrés de cuivre, favorisant une baisse des coûts de fusion-affinage (TC/RC).

Pour de nombreux analystes (CRU, FASTMARKET, BANK OF AMERICA, CITI ou encore MORGAN STANLEY), les perspectives sur le cuivre sont plutôt bonnes et les prix devraient rester au-dessus de 6 000 $/t en 2020, et pourraient même dépasser les 7 000 $/t à partir de 2023/2024.

7. Bibliographie

AngloAmerican (2019) - Disponible en ligne : https ://www.angloamerican.com/.

AIE – International Energy Agency (2018) - Global EV outlook 2018. Disponible en ligne : https ://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2018.

Antaike (2017) - Analysis of the effects of policy on the ban of 7th category copper scrap import. Disponible en ligne : http ://www.antaike.com/content.php?id=84742.

Argus Media (2019) - Disponible sur abonnement payant en ligne : https ://metals.argusmedia.com/ .

ASM Metal Recycling (2019) - Disponible en ligne : https ://www.asm-recycling.co.uk/.

Baikal Mining Company (2019) - Disponible en ligne : https ://www.bgk-udokan.ru/.

BHP (2019) - Disponible en ligne : https ://www.bhp.com/.

BRGM (2018) - Fiche de criticité du cuivre. Minéralinfo. Disponible en ligne sur : http ://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite.

Cesbron F., Lebrun P., Le Cléac'h J.-P. *et al. (*2008) - Minéraux du cuivre – chalcopyrite et quelques minéraux de cuivre dérivés ou associés. Minéraux et fossiles, Hors-série N° 27, Novembre 2008, 112 p.

Comex - CME Group / Chicago Mercantile Exchange Group (2019) - Disponible en ligne : https ://www.cmegroup.com/company/comex.html.

Cochilco – Comisión Chilena del Cobre (2019) - Disponible en ligne : www.cochilco.cl.

Copper Alliance (2016) - Disponible en ligne : https ://copperalliance.fr/.

CRIRSCO – Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (2019) - Disponible en ligne : http ://www.crirsco.com/.

Ecometal (2019) - Disponible en ligne :http ://ecometal.mc/en/rottami.php.

First Quantum Minerals (2019) - Disponible en ligne : https ://www.first-quantum.com/.

Glencore (2019) - Disponible en ligne : https ://www.glencore.com/.

Hocquard C., Labbé J.-F. **et Lassale A**. (2010) - Identification des risques associés au marché du cuivre. Rapport final. BRGM/RC-59035-FR, 141 p., 117 fig., 4 ann.

ICSG – International Copper Study-Group (2019) - Disponible sur abonnement payant en ligne : www.icsg.org.

ICSG - International Copper Study group (2019) - The World Copper Factbook 2019. Disponible en ligne : https ://www.icsg.org/.

InflationData (2019) - Disponible en ligne : https ://inflationdata.com/.

ISRI (2019) - 2018 Recycling Industry Yearbook. Disponible en ligne : https ://www.isri.org/.

ISRI (2019) - Commodity News. Disponible en ligne : https ://www.isri.org/news-publications.

IVANHOE MINES (2019) - Disponible en ligne : https ://www.ivanhoemines.com/.

Jébrack M., Marcoux E. (2008) - Géologie des ressources minérales. 667 p. Société de l'Industrie Minérale.

KGHM (2019) - Disponible en ligne : https ://kghm.com/.

London Metal Exchange (2019) - Disponible en ligne : www.lme.com.

Mining.Com (2019) - Disponible en ligne : https ://www.mining.com/.

Mudd G., Gavin S. (2018) - Growing Global Copper Resources, Reserves and Production : Discovery Is Not the Only Control on Supply.

Nornickel (2019) - Disponible en ligne : https ://www.nornickel.com/.

Northern Dynasty Minerals Ltd (2019) - Disponible en ligne : https ://www.northerndynastyminerals.com/

Northay, S.A., **Mudd, G.M., and Werner, T.T**. (2017) - Unresolved complexity in assessments of mineral resource depletion and availability : Natural Resources Research, v. 27, 15 p.

Ribba Farre (2019) - Disponible en ligne : http ://www.ribafarre.com/.

Rio Tinto (2019) : Disponible en ligne : https ://www.riotinto.com/.

S&P Global Market Intelligence (2019) - Disponible sur abonnement payant en ligne : https ://platform.marketintelligence.spglobal.com/.

Schmitz, C.J. (1979) - World non-ferrous metal production and prices, 1700–1976 : London, Frank Cass and Co, 432 p.

Scrap Monster (2019) - Disponible en ligne : https ://www.scrapmonster.com/.

Seabridge Gold (2019) - Disponible en ligne : https ://seabridgegold.net/.

Seat (2019) - Electric vehicles. A road map to electrification. 31st International Copper Conference, Madrid (8 mars 2018).

SHFE – Shanghai Futures Exchange (2019) - Disponible en ligne : http ://www.shfe.com/.

Shanghai Metals Market (SMM) (2019) - Analysis, prospect of China's primary, secondary.

Market of copper, aluminium, lead in 2019 (Juin 2019) - Disponible en ligne :

http ://static-metal.smm.cn/production/subscribe/email/zExbz20190618131121.pdf

Shanghai Metals Market (SMM) (2019) - Disponible en ligne : https ://news.metal.com/.

Teck Resources (2019) - PDAC Technical Session - Copper. Michael Schwartz. PDAC, Toronto (3 mars 2019).

Tethyan Copper Company (2019) - Disponible en ligne : https ://www.tethyan.com/.

USGS (2019) - Mineral Commodity Summaries - United States Geological Survey - Reston, Virginia, disponible en ligne :

https ://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries.

Wang M., Chen W., Zhou Y. *et al.* (2017) - Assessment of potential copper scrap in China and policy recommendation., Resources Policy, Vol. 52, pp. 235–244. http ://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.12.009.

Wood Mackenzie (2019) - Disponible en ligne : https ://www.woodmac.com/.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
Direction des géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr