

## CUIVRE 2012

### MATIÈRES PREMIÈRES :

La teneur moyenne de l'écorce terrestre est de 55 ppm.

#### **Minerais :**

Ils sont très divers avec plus de 165 variétés de minéraux. Les teneurs des minerais exploités sont généralement comprises entre 0,5 et 2 %, exceptionnellement jusqu'à 5 % par exemple au début de l'exploitation de la mine de Neves Corvo (Portugal). La teneur moyenne des minerais exploités est passée de 1,34 % en 1990 à 0,78 % en 2008. Les minerais se présentent sous deux formes chimiques principales qui conditionnent leur traitement :

- Sulfurée : qui représentent 80 % de la production mondiale sous forme de chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), chalcosine ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )... Les gisements sulfurés sont principalement de type porphyres cuprifères et sont présents dans les cordillères ouest américaines et les chaînes alpines.
- Oxydée (principalement sous forme de carbonates) : sous forme de malachite ( $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$ ), azurite ( $2\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$ ), cuprite ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )... Les minerais oxydés sont souvent présents dans les parties supérieures des gisements, zones d'altérations importantes, le cœur de ces derniers étant sulfuré.

De nombreux autres éléments métalliques sont souvent associés au cuivre : [Fe](#), [Ni](#), [Zn](#), [Pb](#), [Co](#), Mo, Ge, [Au](#), [Ag](#)... Les minerais de cuivre sont une ressource importante de molybdène (54 % de sa production provient de mines de cuivre) et de rhénium. Dans le cas particulier de la mine d'Olympic Dam (Australie) le cuivre est associé à de l'uranium. La présence d'autres éléments valorisables peut parfois permettre l'exploitation de gisement de faible teneur en cuivre. Pour une production minière de 16 millions de t de cuivre, les éléments suivants ont été coproduits : molybdène (250 000 t), cobalt (98 000 t), bismuth (8 500 t), sélénium (2 600 t), tellure (450 t), rhénium (54 t), terres rares (130 000 t).

#### **Exploitations minières :**

##### Au Chili :

- La mine souterraine de cuivre la plus importante au monde est celle d'El Teniente, exploitée par la société [Codelco](#) avec 2 400 km de galeries. La production, en 2012, est de 417 200 t de Cu, 6 094 t de Mo, 82,8 t de Ag, 738 kg d'or et 1,2 million de t d'acide sulfurique. La mine est exploitée industriellement depuis 1904. Les réserves sont de 1,54 milliard de t de minerai à 0,99 % de Cu.

- La mine de cuivre à ciel ouvert la plus importante au monde est celle d'Escondida, découverte en 1981, ouverte en 1991, située à 3 100 m d'altitude dans le désert d'Atacama, avec, en 2012, 1,076 million de t de Cu extraites dont 765 500 t de cuivre contenu dans les concentrés produits et 310 300 t directement sous forme de cathodes de cuivre. L'exploitation est constituée de 2 mines à ciel ouvert, l'une de 645 m de profondeur et de 3,9 x 2,7 km, l'autre de 525 m de profondeur sur 2,5 x 2,2 km. Les concentrés sont évacués sous forme de pulpe par une canalisation de 170 km, jusqu'au port de Coloso sur l'océan Pacifique. Les cathodes produites sont exportées par le port d'Antofagasta. La teneur moyenne du minerai extrait est de 1,13 %, les réserves sont de 4,93 milliards de t de minerai sulfuré contenant 0,71 % de Cu, 1,98 milliard de t de minerai sulfuré à 0,47 % de Cu, destinées à la lixiviation et 116 millions de t de minerai oxydé à 0,89 % de Cu

également destinés à être lixiviés. La mine est exploitée par [BHP-Billiton](#) qui possède 57,5 % de la société Minera Escondida , aux côtés de [Rio Tinto](#) (30 %) et Mitsubishi (10 %).

De nombreuses autres mines chiliennes sont parmi les plus importantes au monde : Chuquicamata, Radomiro Tomic, Collahuasi, Los Pelambres, Andina...

Au Pérou :

- La mine d'[Antamina](#), située à 4 300 m d'altitude exploite, à ciel ouvert, depuis 2001, un minerai à 1,21 % de Cu et 3,03 % de Zn. En 2011, la production a été de 333 700 t de Cu, 235 400 t de Zn et 6 070 t de Mo. Les réserves sont de 822 millions de t de minerai contenant, en moyenne, 0,96 % de Cu, 0,66 % de Zn, 0,022 % de Mo et 10,4 g/t de Ag. Les concentrés de cuivre et de zinc sont acheminés à l'aide d'une canalisation de 21 à 25 cm de diamètre sur une distance de 302 km jusqu'au port de Punta Lobitos situé près de la ville de Huarmey. La société (Compania Minera Antamina) exploitant la mine est détenue à 33,75 % par [Xstrata](#), 33,75 % par [BHP-Billiton](#), 22,5 % par [Teck](#) et 10 % par Mitsubishi.

- La mine à ciel ouvert de [Cerro Verde](#) détenue à 53,56 % par Freeport a produit, en 2012, 269 890 t de cuivre. les réserves sont de 4 milliards de t de minerai contenant 0,38 % de Cu, 0,015 % de Mo, 1,54 g/t de Ag.

Aux Etats-Unis : les mines sont situées, par ordre décroissant des productions, dans les Etats suivants : Arizona, Utah, Nouveau Mexique, Nevada, Montana. 18 mines extraient 99 % de la production.

- La mine la plus importante, [Morenci](#), dans l'Arizona, est exploitée, à 85 %, par [Freeport](#) en association avec [Sumitomo](#) (15 %). Ouverte, en souterrain en 1872, la mine est devenue à ciel ouvert en 1937. Elle est exploitée en partie de façon classique par extraction mécanique du minerai et concentration et en partie par lixiviation en tas du minerai ou par lixiviation directe dans la mine suivie d'une extraction par solvant puis d'une électrolyse donnant directement des cathodes de cuivre. En 2012, sa production a été de 286 670 t de cuivre et 1 361 t de Mo. Les réserves prouvées et probables sont de 685 millions de t à 0,50 % de Cu et 0,021 % de Mo destinées à fournir des concentrés, 422 millions de t à 0,52 % de Cu destinées à être lixiviées en tas et 2,91 milliards de t de minerai à 0,18 % de Cu destinées à être lixiviées directement dans la mine.

- La mine de [Bingham Canyon](#), dans l'Utah, près de Salt Lake City, est exploitée par [Rio Tinto](#). En 2012, sa production a été de 163 200 t de Cu, 9 400 t de Mo, 64,9 t de Ag, 6,2 t d'or. Les réserves sont de 704 millions de t de minerai contenant 0,49 % de Cu, 0,046 % de Mo, 2,14 g/t de Ag, 0,20 g/t d'or. La mine, ouverte en 1903, a produit depuis son ouverture, 19 millions de t de cuivre soit plus que toute autre mine de cuivre dans le monde. C'est l'excavation réalisée par l'homme la plus importante au monde (4,4 km de diamètre pour 1,2 km de profondeur).

Dans l'Union européenne : les principales mines, exploitées par [KGHM](#), sont situées en Pologne. Les autres pays producteurs miniers sont la Bulgarie, la Suède, le Portugal, l'Espagne et la Finlande.

- La mine souterraine de [Neves Corvo](#), au Portugal, a commencé à être exploitée en 1990 pour le cuivre et 2006 pour le zinc. La production, en 2012, est de 2,5 millions de t de minerai contenant 2,6 % de Cu et 530 000 t de minerai contenant 7,3 % de Zn. Les concentrés de cuivre obtenus ont une teneur de 23,9 % en Cu, ceux de zinc de 47,3 % en Zn. Les taux de récupération sont de 88,2 % pour Cu et 71,0 % pour Zn. La production de 2012 a été de 58 559 t de Cu, 30 006 t de Zn, 87 t de Pb et 29,9 t de Ag. Les réserves sont de 24,1 millions de t de minerai de cuivre contenant 3,1 % de

Cu, 0,9 % de Zn, 0,2 % de Pb, 40 g/t de Ag et 22,7 millions de t de minerai de zinc contenant 7,4 % de Zn, 0,3 % de Cu, 1,7 % de Pb, 70 g/t de Ag. La mine est exploitée par la société canadienne [Lundin Mining](#).

Exploitation de gisements sous-marins :

Des projets d'exploitation d'amas sulfurés polymétalliques sous-marins sont en cours de développement, en particulier, celui de [Nautilus Minerals](#), dans la mer de Bismarck, en Papouasie Nouvelle Guinée, à 1 600 m de profondeur. Le gisement, Solwara 1, possède des ressources de 1,03 million de t contenant 7,2 % de Cu, 0,4 % de Zn, 23 g/t de Ag, 5 g/t d'or.

**Principales mines :** en milliers de t de capacité de production, en 2011.

Escondida (Chili)	1 250	Péninsule de Taimyr (Russie)	430
Chuquibambilla et Radomiro Tomic (Chili)	920	Morenci (Etats-Unis)	420
Grasberg (Indonésie)	750	Antamina (Pérou)	370
Collahuasi (Chili)	520	Andina (Chili)	300
Los Pelambres (Chili)	470	Bingham Canyon (Etats-Unis)	280
El Teniente (Chili)	434	Batu Hijau (Indonésie)	250

Source : ICSG

**Traitement des minerais :** la plus grande partie des minerais (représentant 83 % de la production primaire de cuivre, en 2011) subit une concentration avant des opérations pyrométallurgiques suivies d'un raffinage. L'autre partie des minerais (représentant 17 % de la production primaire de cuivre, en 2011) est traitée, sans concentration, selon le procédé dénommé SX/EW (dissolution - extraction par solvant - puis électrolyse) donnant directement du cuivre de qualité commerciale sous forme de cathodes. Voir plus loin la partie métallurgie.

Concentration : elle concerne les minerais sulfurés. Le broyage fin des minerais (grains < 0,15 mm) est suivi d'une concentration par flottation dans des cellules de 60 à 100 m<sup>3</sup>. La molybdénite (MoS<sub>2</sub>) contenue flotte naturellement, le sulfure de cuivre étant alors déprimé à l'aide de sulfure de sodium (0,2 g/L). Le taux de récupération du molybdène est compris entre 27 et 60 %. La flottation des sulfures de cuivre est réalisée en présence de xanthates (25 à 300 g/t) ou de dithiophosphates (100 à 150 g/t). Le taux de récupération du cuivre est de 90 à 95 %. Les concentrés obtenus contiennent environ 31 % de Cu. Les opérations de concassage et broyage représentent jusqu'à 85 % des coûts de concentration.

**Productions minières :** en 2012, en milliers t de Cu contenu. Monde : 16 740, Union européenne à 27 : 823.

Chili	5 434	Zambie	690
Chine	1 642	R. D. du Congo	549
Pérou	1 302	Canada	538
Etats-Unis	1 194	Mexique	525
Australie	919	Indonésie	402
Russie	720	Pologne	424

Sources : ICSG

Au Chili, les principaux producteurs sont, en 2012, en milliers de t de cuivre : Codelco (1 758), BHP-Billiton (724), [Antofagasta](#) (710), Anglo American (490), Rio Tinto (314), Freeport (300), Xstrata (257). Dans ce pays, la production est pénalisée par la situation géographique des principaux gisements dans le désert de l'Atacama et les besoins en eau et en énergie.

- Les besoins en eau de la mine d'Escondida (60 m<sup>3</sup>/t de Cu) ont nécessité la construction d'une usine de désalement d'eau de mer près d'Antofagasta, sur la côte du Pacifique avec une amenée de l'eau, par 2 canalisations de 180 km.
- La société [GNLM](#) détenue à 63 % par GdF-Suez et 37 % par Codelco possède, à Mejillones, un terminal gazier recevant du gaz naturel liquéfié et le regazéifiant pour alimenter une centrale électrique de 1 100 MW de capacité.

**Principaux producteurs** : en 2012, en milliers de t de cuivre extrait des exploitations minières.

<a href="#">Codelco</a> (Chili)	1 758	<a href="#">Antofagasta</a> (Chili)	710
<a href="#">Freeport</a> (Etats-Unis)	1 334	<a href="#">KGHM</a> (Pologne)	676
<a href="#">BHP-Billiton</a> (Australie)	1 095	<a href="#">Anglo American</a> (Afrique du Sud)	660
<a href="#">Grupo México</a> (Mexique)	826	<a href="#">Rio Tinto</a> (Australie)	549
<a href="#">Xstrata</a> (Suisse)	747	<a href="#">Norilsk</a> (Russie)	364

Sources : rapports d'activité des sociétés

[Codelco](#) (Corporation National del Cobre de Chile), société d'état chilienne, exploite 6 complexes miniers : Chuquicamata (355 901 t, en 2012), Radomiro Tomic (427 791 t), El Teniente (417 200 t), Andina (249 861 t), Gabriela Mistral (133 000 t), Salvador (62 728 t) et détient 49 % des parts de la mine d'El Abra exploitée par Freeport et 20 % d'Anglo American Sur. L'exploitation de Ministro Hales, près de Chuquicamata, est en construction, avec 160 000 t/an prévues à compter de 2013. En 2012, la production de molybdène a été de 19 676 t, celle d'argent de 284 t, d'or de 2,4 t et d'acide sulfurique de 3,1 millions de t. En 2012, les minerais extraits ont une teneur moyenne de 0,73 % de cuivre. En valeur, les revenus de la société ont été réalisés à 91 % par la production de cuivre, 9 % par celle des coproduits (Mo, Ag, Au et acide sulfurique). Le cuivre a été vendu à 77 % sous forme de cathodes, 18 % de concentrés, 5,5 % de blister. 12 % de l'électricité chilienne est consommée par Codelco. La consommation d'eau est de 600 millions de m<sup>3</sup>, recyclée à 72 %. Les réserves prouvées et probables sont de 9,4 milliards de t de minerai à 0,68 % en moyenne.

[Freeport-McMoRan Copper & Gold](#) a absorbé Phelps Dodge, en mars 2007. La production a été, en 2012, de 618 246 t aux Etats-Unis (mines dans l'Arizona de [Morenci](#), [Bagdad](#), [Sierrita](#), [Miami](#) et [Safford](#) et au Nouveau Mexique de [Chino](#) et [Tyrone](#)), de 300 278 t au Chili (51 % de la mine de [El Abra](#) - en commun avec Codelco et 80 % des mines de [Candelaria](#) et [Ojos del Salado](#)), de 269 890 t au Pérou (53,56 % de la mine de [Cerro Verde](#)), de 315 245 t en Indonésie (90,64 % de la mine de [Grasberg](#)) et de 157 850 t en République Démocratique du Congo (56 % de la mine de [Tenke Fungurume](#)). Outre celle de cuivre, la production de molybdène a été de 36 741 t, celle de cobalt (à Tenke Fungurume) de 6 804 t, celle d'or de 26,7 t. Les réserves prouvées et probables sont de 17,4 milliards de t de minerai dont 11,2 milliards de t prouvées contenant 0,38 % de Cu, 0,013 % de Mo, 0,97 g/t de Ag et 0,08 g/t d'or.

Les mines de [BHP-Billiton](#) sont situées au Chili (Cerro Colorado (83 400 t de cathodes, en 2012), 57,5 % d'Escondida (333 800 t dans des concentrés et 127 000 t de cathodes), Spence (180 300 t de

cathodes)), Pérou (33,75 % d'Antamina avec 127 000 t dans des concentrés), Australie (Olympic Dam avec 192 600 t de cathodes) et Etats-Unis (Pinto Valley avec 5 400 t de cathodes).

Les mines de [Xstrata](#) sont situées en Argentine (50 % d'Alumbrera avec 135 743 t, en 2012), Australie (Mount Isa avec 142 705 t et Ernest Henry avec 34 106 t), Canada (Kidd Creek avec 34 106 t), Chili (44 % de Collahuasi avec 107 928 t dans des concentrés et 16 195 t de cathodes et Lomas Bayas avec 73 333 t de cathodes), Pérou (33,75 % de Antamina avec 150 809 t, Tintaya avec 37 977 t et Antapaccay avec 5 027 t).

Les mines de [Rio Tinto](#) sont situées aux Etats-Unis ([Kennecott Utah Copper](#) exploite la mine de Bingham Canyon avec, en 2012, 163 200 t), au Chili (30 % de Escondida avec 314 200 t), en Indonésie (40 % de Grasberg), en Australie (80 % de Northparkes avec 43 100 t) et en Afrique du Sud (57,7 % de Palabora avec 28 300 t).

[KGHM](#) exploite 3 mines souterraines dans le sud-ouest de la Pologne, à Lubin, Polkowice-Sieroszowice et Rudna et après l'acquisition, en 2012, de la société canadienne Quadra FNX Mining, 3 mines au Canada (McCreedy, Morrison et Podolsky), 2 mines aux Etats-Unis (Robinson et Carlota) et une mine au Chili (Franke). En 2012, production de 676 300 t de Cu (dont 564 800 t en Pologne), 25 000 t de plomb, 4 800 t de nickel, 1 274 t de Ag, 85 t de sélénium, 5 t de rhénium, 2 t d'or, 2 t de platine et palladium. Le gisement polonais, découvert en 1957, est situé entre 600 et 1380 m de profondeur avec une épaisseur moyenne de 4,8 m et occupe une surface de 550 km<sup>2</sup>. La production a commencé en 1968. En Pologne, en 2012, 30,2 millions de t de minerai ont été extraites avec une teneur moyenne de 1,59 % de Cu.

**Réserves:** en millions de t de cuivre contenu, en 2012. Monde : 680.

Chili	190	Chine	30
Australie	86	Russie	30
Pérou	76	Indonésie	28
Etats-Unis	39	Pologne	26
Mexique	38	Zambie	20

Source : USGS

En 1950, les réserves étaient de 90 millions de t. En 1970, de 280 millions de t.

**Marché international** : il est important car les pays producteurs et consommateurs (sauf les États-Unis) sont distincts. Le commerce international porte sur les concentrés, le blister et surtout sur le cuivre raffiné (voir plus loin).

Principaux pays exportateurs de cuivre contenu dans les minerais ou les concentrés, en 2011, en milliers de t. Total exporté : 5 326.

Chili	1 700	Etats-Unis	260
Pérou	828	Brésil	159
Australie	454	Papouasie-Nlle Guinée	146
Canada	370	Espagne	146
Indonésie	368	Mongolie	143

Source : Cochilco

Les exportations chiliennes ont porté, en cuivre contenu, en 2011, sur un total de 5 067 000 t dont 1 699 000 t de minerais ou concentrés, 393 000 t de blister, 2 976 000 t de cuivre raffiné. Les exportations chiliennes ont été destinées à la Chine pour 32,1 %, au Japon pour 13,1 %, à la Corée du Sud pour 7,5 %, aux Etats-Unis pour 6,4 %, au Brésil pour 5,3 %, au Pays Bas pour 4,4 %, à l'Italie pour 4,4 %, à l'Inde pour 4,0 %.

Principaux pays importateurs : de cuivre contenu dans les minerais ou les concentrés, en 2011, en milliers de t. Total importé : 4 983.

Chine	1 598	Allemagne	281
Japon	1 151	Bulgarie	146
Corée du Sud	433	Brésil	114
Inde, en 2010	430	Philippines	114
Espagne	371	Finlande	104

Source : Cochilco

**Situation française** : pas de production minière et l'industrie métallurgique est peu développée. Les réserves sont très faibles : Rouez (Sarthe, 200 000 t), Chessy (Rhône, 150 000 t), [Salsigne](#) (Aude, 15 000 t).

**MÉTALLURGIE** : selon 2 voies :

- Pyrométallurgique destinée aux minerais sulfurés. Elle concerne, en 2011, 83 % de la production et nécessite un raffinage ultérieur. Elle est approvisionnée principalement par des concentrés qui représentent 85 % du cuivre traité. Les 15 % restant proviennent du recyclage de déchets.

- Hydrométallurgique destinée aux minerais oxydés ou aux minerais sulfurés pauvres traités par biolixiviation. Elle concerne, en 2011, 17 % de la production et ne nécessite pas de raffinage ultérieur. Elle est réalisée dans des installations obligatoirement proches de l'extraction minière.

**Pyrométallurgie** : elle est effectuée en 3 étapes suivies d'un raffinage.

- Grillage partiel des concentrés vers 550-650°C : l'oxydation partielle des sulfures de fer, présents à des teneurs élevées systématiquement dans tous les minerais sulfurés, donne un "mixte" composé de sulfures de cuivre et de fer et d'oxyde de fer. As et [Sb](#) sont éliminés sous forme de composés volatils et récupérés.

- Fusion pour matte : la poursuite de l'oxydation, à 1100-1200°C, a lieu après la fusion des concentrés.

L'oxyde de cuivre formé réagit avec le sulfure de fer restant selon la réaction :



FeO passe, sous forme de silicates, dans les scories qui surnagent sur une matte fondue (formée de Cu<sub>2</sub>S et FeS restant). La plus grande partie du fer est ainsi éliminée ainsi qu'une partie du plomb. La fusion a lieu dans des fours réverbères, électriques ou flash-smelting afin de limiter la pollution par les fumées riches en [SO<sub>2</sub>](#).

- Conversion : poursuite de l'oxydation de la matte liquide par de l'air ou du dioxygène, vers 1300°C, en 2 étapes dans des convertisseurs de type Pierce-Smith ou Hoboken pendant une durée d'environ 4 heures.

- 1<sup>ère</sup> phase de soufflage scorifiant : élimination totale du fer et des autres éléments métalliques plus oxydables que le cuivre qui passent dans des scories. Il reste Cu<sub>2</sub>S appelé matte blanche.

- 2<sup>ème</sup> phase de soufflage pour cuivre selon la réaction :



On obtient du cuivre noir, appelé blister, contenant de 98 à 99,5 % de Cu. Il reste un peu de Cu<sub>2</sub>O. Le dioxyde de soufre est récupéré pour produire de l'acide sulfurique, avec une production moyenne de 2,7 t d'acide par t de cuivre.

- Principales installations industrielles d'élaboration de blister, en 2011, en milliers de t de capacité annuelle :

Guixi (Jiangxi, Chine)	900	Besshi (Ehime, Japon)	450
Birla Copper (Gujarat, Inde)	500	Norilsk (Russie)	400
Codelco Norte (Chili)	450	El Teniente (Chili)	400
Hambourg (Allemagne)	450	Jinchuan (Chine)	400
Saganoseki (Ohita, Japon)	450	Sterlite (Inde)	380

Source : ICSG

Raffinage du blister : principalement par électrolyse à anode soluble.

Le blister est coulé sous forme d'anodes de 350 kg, 1 m<sup>2</sup> de surface, 13 à 50 mm d'épaisseur.

Les cathodes sont formées de feuilles de départ minces de cuivre raffiné (8 kg). Chaque cellule contient par exemple 30 anodes et 31 cathodes. L'électrolyse est réalisée à 65°C. Les cathodes sont changées tous les 10 jours, les anodes solubles tous les 20 jours (chaque anode donne 2 cathodes). Les cathodes obtenues ont une teneur en cuivre de 99,99 %. La tension appliquée entre les électrodes est de 0,25 à 0,4 V avec une consommation électrique de 250 kWh/t Cu. La composition du bain d'électrolyse est la suivante : Cu<sup>2+</sup> : 45 g/L, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : 185 g/L.

- Les impuretés métalliques présentes dans le blister soit restent en solution ou précipitent (Zn, Fe, Ni, Co, Sn, Pb) soit sont insolubles (Ag, Au, Pt) et elles sont récupérées dans les boues anodiques. D'autres impuretés (As, Sb, Bi) se déposent, en partie avec le cuivre, et devront être éliminées ultérieurement. La purification de 100 t de cuivre donne de 0,5 à 1 t de boues de composition moyenne : Cu : 20 à 50 %, Ag : 5 à 25 %, Au < 4 %, ainsi que : As, Sb, Sn... On estime que 80 % de l'argent et 15 % de l'or produits dans le monde, sont extraits de boues provenant de l'électro-affinage de métaux, principalement de cuivre.

- Les coûts, par exemple pour la société Codelco, se répartissent ainsi : extraction minière : 18 %, concentration : 34 %, pyrométallurgie : 31 %, raffinage : 12 %, servives communs : 5 %.

- En France, la seule usine de raffinage du cuivre, la Compagnie Générale d'Électrolyse du Palais (87, contrôlée à 58 % par Pechiney), qui produisait 63 113 t de cuivre, en 1996, a fermé en 1998. Elle traitait du cuivre recyclé et du blister importé.

- Principales installations industrielles de raffinage, en 2011, en milliers de t de capacité annuelle :

Guixi (Jiangxi, Chine)	900	Codelco Norte (SX-EW, Chili)	470
Chuquicamata (Chili)	600	Toyo/Niihama (Japon)	450
Yunnan Copper (Chine)	500	Amarillo (Texas, Etats-Unis)	450
Birla Copper (Gujarat, Inde)	500	El Paso (Texas, Etats-Unis)	415
Jinchuan (Chine)	500	Las Ventanas (Chili)	400

Source : ICSG

Le blister peut être également purifié par affinage thermique afin d'éliminer une partie des impuretés plus oxydables que le cuivre : Fe, S, As, Pb, Sb. On procède par soufflage d'air dans le bain de blister liquide. Lors de cette opération une partie du cuivre s'oxyde en  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Afin de réduire cet oxyde on peut procéder par perchage avec du bois vert (Codelco utilise de l'eucalyptus) dont l'immersion provoque un dégagement brutal de CO et  $\text{H}_2$  lors de sa combustion. Le bois peut être remplacé par des produits pétroliers ou divers autres réducteurs. Ce procédé est très minoritaire par rapport au raffinage électrolytique à anode soluble.

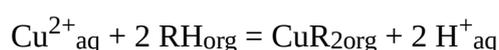
**Hydrométallurgie** : le traitement des minerais par ce procédé entraîne une pollution atmosphérique nettement plus faible que lors des opérations pyrométallurgiques, mais les métaux précieux restent dans la gangue et ne sont donc pas récupérés. Ce procédé concerne, principalement les minerais "oxydés" facilement solubles mais aussi, de plus en plus, les minerais sulfurés de faible teneur à l'aide de l'assistance de bactéries lors des opérations de lixiviation, appelées alors biolixiviation.

Historiquement, les premières opérations d'hydrométallurgie ont été effectuées, en 1670, lors du traitement du minerai de Rio Tinto, en Espagne. Après lixiviation, la solution contenant de 0,3 à 3,5 g/L de Cu était traitée par cémentation à l'aide de fer (1,4 à 2 kg de Fe/kg de Cu). Le ciment obtenu contenait de 85 à 90 % de cuivre. Depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, cette technique est abandonnée et supplantée par l'extraction par solvant.

L'hydrométallurgie des minerais de cuivre comporte trois opérations successives (le procédé est dénommé SX/EW : extraction par solvant/électro-extraction) :

- Une dissolution des minerais par lixiviation généralement réalisée à l'aide d'acide sulfurique (1 à 15 g d'acide/L). Lorsque la gangue est basique (calcaire ou dolomitique), le coût de la lixiviation acide devient prohibitif, elle est remplacée par une lixiviation à l'aide d'une solution aqueuse d'ammoniac. La solution obtenue titre de 1 à 6 g de Cu par L, concentration trop faible pour pouvoir subir une électrolyse, car sa faible conductivité entraînerait une résistance élevée au passage du courant électrique et une consommation d'énergie importante par effet Joule.

- Une extraction par solvant spécifique qui permet après déextraction à l'aide d'acide sulfurique (160 à 260 g d'acide/L) d'obtenir une solution contenant de 40 à 70 g de  $\text{Cu}^{2+}$ /L. Les solvants utilisés, quélates bidentates, sont des hydroxyphényloximes ( $((\text{C}_6\text{H}_3)\text{R}(\text{OH})\text{NOHA})$ ) avec R un radical  $\text{C}_9\text{H}_{19}$  ou  $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$  et A : H pour les aldoximes ou  $\text{CH}_3$  ou  $\text{C}_6\text{H}_5$  pour les kétoximes. Le solvant est dilué dans du kérosène. L'équation de l'équilibre mis en jeu lors de l'extraction - déextraction est la suivante :

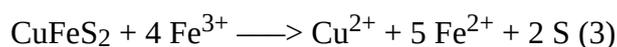
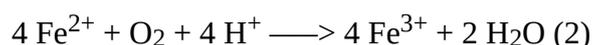


L'équilibre est déplacé vers la droite lors de l'extraction puis vers la gauche lors de la déextraction avec récupération et recyclage du solvant..

- Une électrolyse de la solution aqueuse contenant  $\text{Cu}^{2+}$  entre une anode insoluble en plomb (avec ajout de 6 % de Sb) de 100 kg qui a une durée de vie d'environ 4 ans et une cathode en cuivre sous forme d'une feuille de départ de 5 kg. La composition du bain d'électrolyse varie de 15 g  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$  et 70  $\text{Cu}^{2+}/\text{L}$  avant électrolyse jusqu'à 80 g  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{L}$ , et 25  $\text{Cu}^{2+}/\text{L}$  après électrolyse puis, la solution appauvrie en  $\text{Cu}^{2+}$  et enrichie en acide, est recyclée. La tension est comprise entre 2 et 2,5 V (dont tension thermodynamique : 0,89 V, surtension  $\text{O}_2$  : 0,6 V, chute ohmique : 0,6 V) avec une densité de courant de 150 à 300  $\text{A}/\text{m}^2$ . La consommation électrique est importante (de 2000 à 2500 kWh/t de Cu).

Les cathodes sur lesquelles se dépose le cuivre sont déchargées tous les 5 à 6 jours lorsqu'elles atteignent 60 kg. Elles titrent 99,8 % Cu et sont utilisées sans raffinage ultérieur pour des usages non électriques du cuivre (le plomb est dans ce cas une impureté gênante).

Biolixiviation : l'hydrométallurgie est également utilisée pour traiter des minerais sulfurés mais il faut, à la lixiviation classique associer une attaque bactériologique, appelée biolixiviation car les minerais sulfurés sont difficilement solubles. Les bactéries utilisées (thiobacillus ferrooxidans, thiobacillus thiooxidans, leptospirillum ferrooxidans) se développent naturellement dans les gisements sulfurés, le maximum de leur développement étant atteint pour des pH compris entre 1,8 et 2,8 et des températures comprises entre 30 et 35°C. Leur concentration naturelle dans les gisements varie de  $10^6$  à  $10^{10}/\text{cm}^3$  en surface à  $10^3/\text{cm}^3$  en profondeur. Par ailleurs, les solutions ne doivent pas être trop concentrées en cuivre, toxique pour ces bactéries si sa concentration dépasse 3 g/L. Elles tirent leur énergie de l'oxydation des formes réduites du soufre et de celle du fer (II) en fer (III). Ces bactéries catalysent l'oxydation, par le dioxygène de l'air, des ions sulfures et du soufre en ions sulfates et des ions Fe (II) en Fe (III) (réactions 1,2,4) :



La biolixiviation est employée pour traiter des minerais de faible teneur ou les stériles de traitements antérieurs. Elle peut être utilisée in situ mais est surtout employée pour traiter des minerais ou des stériles disposés en tas (concassés en grains de 6 à 10 mm puis agglomérés avec 3 à 7 kg d'acide sulfurique par tonne de minerai) sur des sols étanches. La solution lixiviante (pH de 1,5 à 2) enrichie d'éléments nutritifs pour les bactéries (azote...) percole à travers le minerai en s'enrichissant en cuivre (II). La biolixiviation en amas dure de 3 à 6 mois. Par exemple, à Bingham Canyon, aux Etats-Unis, un minerai de faible teneur (< 0,4 % de Cu) disposé en amas de plusieurs millions de t permet de récupérer ainsi jusqu'à 200 t/jour de cuivre. La biolixiviation de minerais sulfurés de faible teneur a débuté en mai 2006 à la mine [d'Escondida](#) avec 180 000 t de Cu/an. Le minerai est disposé sur une aire de traitement de 5 km sur 2 km. Le taux de récupération du cuivre est d'au moins 36 %. Les réserves sont ainsi de 1,98 milliard de t de minerai sulfuré à 0,47 % de Cu.

Après dissolution du cuivre par biolixiviation, la solution obtenue subit la suite des opérations classiques d'hydrométallurgie (voir plus haut).

Production de cuivre par hydrométallurgie : en 2011, en milliers de t. Monde : 3 153.

Chili	2 025	Mexique	82
Etats-Unis	450	Laos	79
R. D. du Congo	251	Zambie	60
Pérou	140	Australie	39

Source : Cochilco

- Au Chili, en 2011, sur une production totale de 5 262 000 t, 2 025 000 t sont obtenues directement sous forme de cathodes par hydrométallurgie et 3 237 000 t dans des concentrés qui ont été soit exportés soit traités sur place pour donner 1 364 000 t de blister à leur tour soit exportées soit raffinées sur place pour donner 999 000 t raffinées par anode soluble et 69 000 t raffinées thermiquement.

- Aux Etats-Unis, en 2012, sont en activité : 3 fonderies produisant du blister, 3 raffineries par anode soluble, 4 raffineries thermiques, 15 exploitations de lixiviation-extraction par solvant-électrolyse.

Après métallurgie, quel que soit le procédé utilisé, le cuivre se présente sous forme de cathodes.

## **PRODUCTIONS :**

**Blister** : en 2011, en milliers de t. Monde : 14 012, Union européenne à 27 : 2 286.

Chine	2 826	Etats-Unis	541
Japon	1 438	Pologne	540
Chili	1 364	Corée du Sud	540
Russie	850	Australie	441
Inde	749	Zambie	381
Allemagne	591	Kazakhstan	380

Source : Cochilco

**Cuivre raffiné** : en 2012, en milliers de t. Monde : 20 132, Union européenne à 27, en 2011 : 2 701.

Chine	5 767	Allemagne	686
Chili	2 902	Corée du Sud	621
Japon	1 516	Pologne	564
Etats-Unis	1 001	Zambie	533
Russie	882	Australie	461
Inde	700	R. D. du Congo	455

Source : ICSG

En 2012, pour une production de cuivre raffiné de 20,132 millions de t, 16,536 millions de t proviennent d'une production primaire, 3,596 millions de t proviennent d'une production secondaire.

**Principaux pays exportateurs de cuivre raffiné** : en 2011, en milliers de t. Total : 8 351. Union européenne : 1 242.

Chili	2 976	Pérou	345
Zambie	640	Pologne	328
Japon	437	Russie	325
Australie	376	Kazakhstan	248
Inde	358	Allemagne	192

Source : Cochilco

**Principaux pays importateurs de cuivre raffiné** : en 2011, en milliers de t. Total : 7 738, Union européenne : 1 994.

Chine	2 836	Corée du Sud	347
Allemagne	734	Turquie	337
Etats-Unis	649	Thaïlande	230
Italie	615	Brésil	226
Taiwan	461	France	226

Source : Cochilco

Evolution historique de la production de cuivre (d'après Pour la Science n°228) :

Elle a débuté il y a 7 mille ans à partir de cuivre natif. A l'époque de l'empire romain la production atteignait 15 000 t/an (entre 250 avant J.C. et 350 après J.C., la production cumulée aurait été de 5 millions de t). En Europe, jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, on assiste à une stagnation de la production à des valeurs inférieures à 2 000 t/an. En Chine, sous la dynastie Sung (X - XII<sup>ème</sup> siècle), la production était de 13 000 t/an. Ces pointes de production ont été retrouvées par analyse des glaces du Groenland. Dans l'Antiquité et au Moyen Age, la dissémination de cuivre dans l'atmosphère représentait 15 % de la production. Actuellement celle-ci n'est que de 0,25 %. Les quantités de cuivre déposées sur la calotte glaciaire du Groenland au cours des 2500 ans qui ont précédé la révolution industrielle sont 15 fois plus importantes que celles déposées entre le début de la révolution industrielle et nos jours.

Fermeture, fin 1992, sûrement du plus vieux lieu de travail industriel, au monde : la mine de Falun, en Suède, en activité depuis plus de 1000 ans. Au XVI-XVII<sup>ème</sup> siècle, elle produisait les 2/3 du cuivre mondial et a fait la richesse de la Suède. Au total ont été extraites de cette mine 500 000 t de Zn, 400 000 t de Cu, 160 000 t de Pb, 380 t de Ag, 5 t de Au.

### **RECYCLAGE** :

Lors de son utilisation, une grande partie du cuivre ne se dégrade pas et peut donc être recyclé. On estime que 85 % du cuivre en circulation est récupérable et que sa durée moyenne d'utilisation est de 30 ans (de quelques années dans les applications en électronique jusqu'à plus de 100 ans dans la construction). Le cuivre recyclé est soit raffiné, de façon identique au blister, soit réutilisé directement (dans le cas des câbles électriques, de certains alliages ou des chutes neuves de fabrication).

On estime que 80 % du cuivre extrait depuis la préhistoire est toujours en circulation.

En 2008, sur une consommation mondiale de 24 millions de t de cuivre raffiné, 6 millions de t proviennent de cuivre recyclé après simple fusion et 2,7 millions de t de déchets de cuivre ayant subi un raffinage, soit au total une part du cuivre recyclé dans la consommation mondiale de 36,2

% . La part du recyclage est de 41,4 % en Europe, 33,5 % en Asie et 29,5 % en Amérique du Nord. En ce qui concerne le cuivre raffiné, la part des déchets recyclés est de 15 %.

On estime que le stock de cuivre présent dans les véhicules automobiles est d'environ 3 millions de t en Europe et aux Etats-Unis, avec le recyclage de 200 000 à 250 000 t de cuivre par an dans chacune des entités géographiques.

- Aux Etats-Unis, en 2012, 650 000 t ont été recyclées à partir de chutes de fabrication, 170 000 t à partir de matériaux usagés. Au total, dans ce pays, le recyclage couvre 33 % de la consommation.

### **SITUATION FRANÇAISE** : en 2012.

- Importations de cuivre raffiné sous forme de cathodes : 150 314 t du Chili : 66 %, d'Allemagne : 13 %, de Pologne : 12 %.

- Exportations de cuivre raffiné sous forme de cathodes : 2 428 t, vers l'Allemagne à 94 %.

- Consommation de cuivre raffiné, en 2011 : 183 000 t.

La France est absente d'une grande partie du cycle du cuivre, en particulier de la métallurgie et du raffinage, contrairement à l'Allemagne et la Belgique. Par contre, elle possède une importante industrie de première transformation.

### **L'industrie française de première transformation de Cu** : en 2007.

- Production de demi-produits : 428 000 t dont la moitié sous forme de fils et câbles, à partir de cathodes importées ou de cuivre recyclé (110 000 t).

- Consommation de demi-produits : 466 000 t.

- Fabrication de fils et câbles : elle est réalisée par tréfilage lui même alimenté par "fil machine". Le "fil machine" est réalisé par coulée continue puis laminage à chaud. Il se présente sous forme de bobines pesant jusqu'à 7 t (fils de diamètre, en général, 8 mm et jusqu'à 20 mm). En France, en 2007, a consommé 268 000 t de cuivre et 78 000 t d'aluminium.

Principal producteur : [Nexans](#), société française, parmi les deux premiers mondiaux pour les câbles de télécommunications et d'énergie.

Produit des câbles en cuivre ou en [aluminium](#) mais aussi des fibres optiques. Les câbles sont utilisés pour transporter de l'électricité, des communications, des données informatiques...

Consommation, en 2012, dans le monde de 492 000 t de cuivre et 148 000 t d'aluminium.

En France, une usine de fabrication de "fil machine".

- Société Lensoise de Cuivre (SLC), production : 180 000 t/an.

Une usine de recyclage de cuivre et d'aluminium à Calais (36 % de la société Recycables, an association avec Sita, filiale du groupe Suez Environnement), production 20 000 t/an.

Autres producteurs en France :

[Prysmian France](#), filiale du groupe italien Prysmian (ex Pirelli depuis 2005). Usines à Paron (89) : 25 000 t/an de câbles, Charvieu (38) : 34 000 t/an de câbles, Chavanoz (38), Amfreville (76), Angy (60), La Bresse (88).

[Silec cable](#) : société du groupe General Cable, une usine à Montereau (77), production de 70 000 t/an de câbles (en tous matériaux).

Alsafil, à Sélestat (67), filiale du [Bronze Industriel](#), produit du fil machine et des fils de divers alliages de cuivre.

- Fabrication de demi-produits (barres, fils, profilés, tubes, laminés) directement ou après élaboration d'alliages par fonderie.

Principal producteurs : [KME Group](#), société italienne, 1<sup>er</sup> producteur mondial de demi-produits en cuivre et alliages hors fils et câbles (626 000 t/an).

Usines de production en France (Tréfinmétaux jusqu'en 2007) : Boisthorel (61), Givet (08), Niederbrück (68).

Autres producteurs en France : [Gindre-Duchavany](#) (filiale du groupe autrichien Umcor Holding), usine à Pont-de-Cheruy (38), [Griset](#) (filiale de la société allemande Bavaria Industriekapital), 16 000 t/an, usine à Villiers-Saint-Paul (60)...

## **UTILISATIONS :**

**Consommations mondiales** : en 2011, en milliers de t de cuivre raffiné, hors recyclage par simple fusion. Monde : 19 472, Union européenne : 3 816.

Chine	7 915	Italie	602
Etats-Unis	1 756	Taiwan	557
Allemagne	1 251	Brésil	421
Japon	1 007	Inde	402
Corée du Sud	747	Turquie	382
Russie	675	Espagne	318

Source : Cochilco

En 2012, la consommation mondiale est de 20,472 millions de t dont 8,788 millions de t en Chine.

En 2008, sur une consommation mondiale de 24 millions de t de cuivre, 6 millions de t proviennent de cuivre recyclé après simple fusion.

**Formes d'utilisations** : dans le monde, en 2004. Barres et fils de cuivre : 46 %, barres et fils d'alliages de cuivre : 14 %, tubes de cuivre : 12 %, feuilles d'alliages de cuivre : 9 %, feuilles de cuivre : 7 %, fonderie : 6 %.

**Secteurs d'utilisations** : en 2012.

Electricité	34 %	Transport	13 %
Construction	31 %	Produits de consommation	9 %
Industries mécaniques	13 %		

Source : Codelco

## **Utilisations particulières :**

- On estime, en Europe, que 8 millions de km de câbles de cuivre assurent le transport de courant électrique.

- Résistant à la corrosion marine, il est utilisé pour des pompes et canalisations d'eau de mer.

- Le transport de l'eau potable dans des canalisations en cuivre permet d'éviter le développement de bactéries telles que, par exemple, celles du genre légionella.
- Fongicide : utilisé sous forme de chlorure ou de sulfate, par exemple dans la bouillie bordelaise qui contient, en présence de chaux, 20 % de sulfate de cuivre, afin de lutter en viticulture ou arboriculture, en particulier contre le mildiou.
- [Pigment](#) pour céramiques et [verres](#).
- Le corps humain adulte contient 100 mg de cuivre. L'apport journalier recommandé par l'OMS est de 2 mg/jour avec une limite supérieure de 12 mg/jour qui ne doit pas être dépassée. Les principaux aliments riches en cuivre sont le foie de bœuf (39 mg/kg), le chocolat (36 mg/kg), les huîtres et légumes secs (9 mg/kg).
- Couvertures et évacuation des eaux pluviales dans le bâtiment : utilisation relativement faible en France (5 000 t/an), plus importante en Allemagne (70 000 t/an) et Italie (60 000 t/an). En France, les couvertures de l'église de la Madeleine et de la Bourse, datant de Napoléon 1<sup>er</sup>, sont en cuivre. Le panthéon de Rome, au 2<sup>ème</sup> siècle après J-C, était recouvert de cuivre. Dans cette application, outre l'aspect esthétique et la résistance à la corrosion, l'avantage du cuivre réside dans son faible coefficient de dilatation : 1,68 mm/m pour 100°C.
- L'[or](#) de bijouterie (750/1000) contient 15 % de Cu.
- Automobile : un véhicule de gamme moyenne contient 2 km de câbles en cuivre ou en alliage de cuivre soit une masse d'environ 20 kg qui peut atteindre 45 kg pour les véhicules hybrides.
- Les pièces de 1, 2 et 5 centimes d'euro, sont en acier recouvert par un mince dépôt électrolytique de cuivre (les cents nord-américains et canadiens ont un cœur en zinc). Les pièces de 10, 20 et 50 centimes d'euro sont en "nordic gold" c'est-à-dire en alliage contenant, en masse, 89 % de Cu, 5 % de Al, 5 % de Zn et 1 % de Sn. Les parties jaunes des pièces de 1 et 2 euros sont constituées d'un alliage (maillechort) contenant 75 % de Cu, 20 % de Zn et 5 % de Ni. Les parties blanches de ces pièces sont formées par un cœur de nickel pur inséré entre 2 couches d'un cupronickel constitué de 75 % de Cu et 25 % de Ni. Lors de la fabrication des premières pièces en euro, la consommation de cuivre a été de 180 000 t sur 2 ans, soit 2 % de la consommation européenne de cuivre pour produire 60 milliards de pièces.
- Le cuivre est concurrencé par les fibres optiques dans les réseaux de télécommunications.
- En 1997, début de l'utilisation, par IBM, de l'utilisation du cuivre, en remplacement de l'aluminium, pour le transport des électrons dans les puces en microélectronique. La mise au point d'une couche barrière entre le [silicium](#) et le cuivre a permis d'éviter la diffusion de ce dernier dans le substrat de silicium.