

ZINC 2015

MATIÈRES PREMIÈRES :

La teneur moyenne en zinc de l'écorce terrestre est de 80 ppm.

Les émissions atmosphériques naturelles de zinc liées au volcanisme, à l'érosion des roches... sont estimées à 5,9 millions de t/an. Les émissions liées aux activités humaines sont estimées à 57 000 t/an.

Dans les minerais, le zinc est très souvent associé à [Pb](#) et [Cd](#) ainsi qu'à [Fe](#), [Cu](#), [Bi](#), [Sb](#), [As](#), [Ge](#), [In](#), [Ag](#), [Au](#)... Les minerais de zinc sont la principale source de [cadmium](#), [germanium](#) et [indium](#).

Minerais : le principal est la blende ou sphalérite (ZnS), les autres sont la smithsonite (ZnCO₃), l'hémimorphite ou calamine (Zn₄Si₂O₇(OH)₂.H₂O). La blende représente 95 % de la production minière.

La teneur des minerais tout venant est comprise entre 4 et 20 % de Zn. 80 % des exploitations minières représentant 64 % de la production sont souterraines, 8 % (15 % de la production) à ciel ouvert et 12 % (21 % de la production) associent les 2 types d'exploitation. En 2009, il y a 144 mines en exploitation dans le monde.

Principales mines en activité, fin 2015 : en milliers de t zinc contenu dans les concentrés miniers produit en 2015.

Red Dog (Etats-Unis)	567	Cerro Lindo (Pérou)	177
Rampura Agucha (Inde)	510	Peñasquito (Mexique)	177
Mc Arthur River (Australie)	273	Mount Isa (Australie)	154
Antamina (Pérou)	235	Tara (Irlande)	133
San Cristóbal (Bolivie)	225	Skorpion (Namibie)	82

Source : Hindustan Zinc et rapports de sociétés

- De 2008 à 2014, la plus importante mine de zinc dans le monde a été celle de Rampura Agucha, dans le Rajasthan, en Inde, exploitée par [Hindustan Zinc](#), détenu à 64,9 % par [Vedanta](#) et 29,5 % par l'état indien. Sa production a été, en 2015-16, de 510 000 t de zinc et 55 200 t de plomb. Les réserves prouvées et probables sont de 8,8 millions de t de minerai renfermant 13 % de Zn, 1,9 % de Pb et 52 g/t de Ag pour la mine à ciel ouvert et 42,3 millions de t de minerai renfermant 14,1 % de Zn, 1,8 % de Pb et 60 g/t de Ag pour la mine souterraine. La production de 2015-16 est en diminution car la mine est en cours de transition entre une exploitation à ciel ouvert et une exploitation souterraine.

- La plus grande mine de zinc au monde, jusqu'en 2008 et depuis 2015, est celle de Red Dog, en Alaska. L'exploitation, à ciel ouvert, par [Teck](#), a démarré en 1990, le gisement avait été découvert en 1968. Les réserves prouvées et probables sont de 56,6 millions de t de minerai contenant 14,6 % de Zn, 4,1 % de Pb et 73,8 g/t d'argent. En 2015, la production a été de 567 000 t de Zn, 117 600 t de Pb et, en 2014, de 712 t d'argent. 29 % de la production de concentrés est traité dans la raffinerie

exploitée par Teck, à Trail, au Canada, en Colombie Britannique. L'épuisement de la mine principale (Red Dog "Main") est compensé par l'exploitation de gisements adjacents dont Red Dog "Aqqaluk" qui est également exploité à ciel ouvert.

Aux Etats-Unis, la production avec 15 mines en exploitation provient, en 2015, à 74 % d'Alaska avec la mine de Red Dog (567 000 t de Zn) et celle de Greens Creek exploitée par [Hecla Mining](#) avec 61 934 t de Zn.

- Century, troisième plus importante mine de zinc jusqu'en 2015, propriété de [Minerals and Metals Group \(MMG\)](#) filiale du groupe chinois [China Minmetals Corporation](#), située en Australie, au nord-ouest de la province du Queensland a fermé en novembre 2015. Le gisement, découvert en 1990, a été exploité à ciel ouvert à partir de 1999. En 2015, dernière année d'exploitation, la production a été de 392 667 t de zinc, 79 153 t de plomb et 81 t d'argent.

En Australie, exploitée par [Glencore](#), la mine de Mc Arthur River a produit, en 2015, 272 700 t de Zn, 53 000 t de Pb et 54 t de Ag. Les réserves prouvées et probables sont de 102 millions de t renfermant 10,0 % de Zn, 4,8 % de Pb et 49 g/t de Ag. Les mines de Mount Isa, regroupées avec celles de Lady Loretta et George Fisher, en Australie au nord-ouest de la province du Queensland, exploitées également par [Glencore](#) ont produit, en 2015, 478 200 t de zinc, 163 000 t de plomb et 203 t d'argent. Ce complexe minier produit également du cuivre, avec 205 600 t. Les réserves prouvées et probables sont, fin 2015, de 15,5 millions de t de minerai de cuivre contenant 1,85 % de cuivre et de 14,1 millions de t de minerai de cuivre contenant 2,62 % de Cu ainsi que 78 millions de t de minerai de zinc contenant 7,5 % de zinc, 4,0 % de plomb et 69 g/t d'argent.

- La mine de zinc d'[Antamina](#), au Pérou, est exploitée par Glencore à 33,75 %, BHP-Billiton à 33,75 %, Teck à 22,5 % et Mitsubishi à 10 %. Elle est située dans la cordillère des Andes entre 4 200 et 4 700 m d'altitude, dans la province de Huari. Le minerai, extrait à ciel ouvert, est concentré puis mis en suspension dans l'eau et envoyé à l'aide d'un minéralduc de 302 km de longueur jusqu'au port de Punta Lobitos situé près de Port Huarmey afin d'être exporté. Le minéralduc de 21 à 25 cm de diamètre est enfoui à 1 m de profondeur. Le trajet dure environ 50 h, avec une capacité de 2,5 millions de t/an. Les réserves prouvées et probables sont, fin 2015, de 598 millions de t avec 0,95 % de Cu, 0,97 % de Zn, 0,023 % de [Mo](#) et 10,6 g/t de Ag, ainsi que du plomb et du bismuth. En 2015, la production est de 390 500 t de Cu, 235 000 t de Zn, du molybdène, du plomb et 186 t d'argent. La production a débuté en 2001 et devrait se poursuivre jusqu'en 2026.

- La plus importante mine européenne est celle de Tara en Irlande, exploitée par [New Boliden](#). En 2015, la mine a produit 133 000 t de Zn, 17 000 t de Pb et 1,3 t de Ag. Les réserves prouvées et probables sont de 17 millions de t de minerai contenant 6,3 % de Zn et 1,5 % de Pb.

Minéralurgie ou concentration :

Après extraction du minerai, celui-ci subit un traitement physique consistant à éliminer une grande partie de la gangue. Dans le cas des minerais sulfurés, une flottation est généralement effectuée. Elle consiste à séparer d'une part les parties valorisables d'un minerai et d'autre part la gangue, en jouant sur leurs propriétés de surface et plus particulièrement sur le caractère hydrophobe ou hydrophile (mouillant) de celles-ci.

Avant de pouvoir séparer les constituants du minerai, il faut "libérer" les particules valorisables par broyage qui sera d'autant plus poussé que, par exemple les sulfures métalliques à récupérer, seront

disséminés dans le minerai sous forme de fines particules. Ainsi, les blocs de quelques m³ extraits de la mine seront broyés jusqu'à atteindre quelques dizaines à quelques centaines de micromètres.

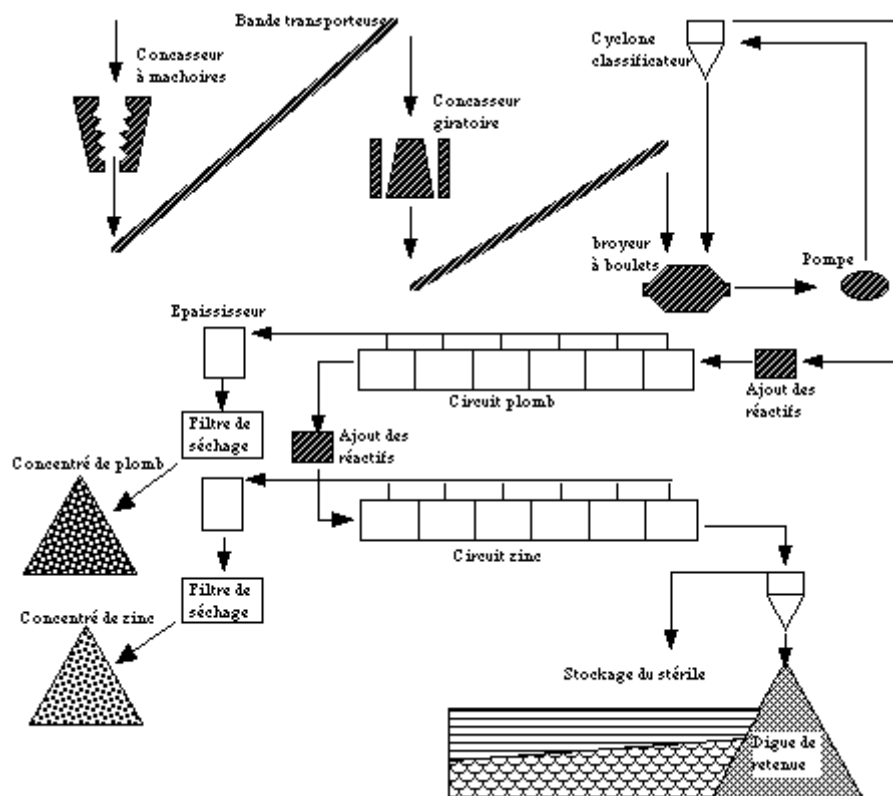
La flottation est réalisée dans des cuves dans lesquelles le minerai broyé est mis en suspension aqueuse. Des ajouts éventuels sont effectués pour ajuster le pH, modifier les propriétés de surface des particules à l'aide de collecteurs, former des mousses stables. D'autres ajouts permettent de moduler l'action des agents collecteurs : des déprimants augmentent le mouillage, des activants annihilent les effets des déprimants. Par ailleurs, une arrivée d'air permet de former des bulles qui entraînent en surface les éléments valorisables qui se retrouvent dans des mousses en formant une écume. Cette dernière, après séchage, donne des concentrés.

Il est également possible de séparer sélectivement divers sulfures métalliques d'une part de la gangue et d'autre part entre eux.

Après flottation les concentrés contiennent de 40 à 60 % de Zn (en moyenne 53 %) sous forme de sulfure de zinc ZnS. Lors de la flottation le zinc n'est pas transformé chimiquement, il reste sous forme de sulfure.

En général, la concentration est effectuée dans des installations voisines de l'extraction minière, les concentrés étant évacués, souvent par voie maritime, vers les installations de traitement métallurgique. Le schéma ci-dessous illustre les opérations de concentration par flottation.

Schéma de principe d'un circuit de flottation différentielle



Exemple de flottation concernant un minerai contenant de la blende, de la pyrite et de la [galène](#), dans une gangue de [calcite](#) et de [dolomie](#).

Broyage : le minerai a été broyé pour que 80 % du produit passe au tamis de 170 microns.

Flottation : les résultats moyens du traitement par flottation sont les suivants :

Produits	Masse en %	Teneur en Pb	Teneur en Zn
Tout-venant	100,0	5,7	6,9
Concentré de galène	7,2	70,9	3,6
Concentré de blende	10,3	0,5	52,1
Rejet final	82,5	0,7	1,6

Consommations de réactifs :

Circuit plomb		Circuit zinc	
<u>CaO</u>	1500 g/t	CaO	2560 g/t
NaCN	70 g/t	CuSO ₄	300 g/t
Ethyl et amyloxanthate	70 g/t	Ethyl et amyloxanthate	120 g/t
Huile de pin	5 g/t		

Composition des concentrés obtenus :

Éléments	Concentré de galène	Concentré de blende
Zn %	4,7	50,3
<u>S</u> %	16,7	31,5
<u>Pb</u> %	70,0	1,0
<u>Cu</u> %	1,0	0,50
<u>Cd</u> %		0,15
<u>Fe</u> %	6,0	11,10
<u>Sn</u> %		0,007
<u>Bi</u> %	0,02	
CaO %	0,6	0,5

MgO %		0,3
SiO2 %	0,4	0,25
Al ₂ O ₃ %		0,8
Ag g/t	800	70
Sb g/t	0,2	0,01
As g/t	0,3	0,15

Productions minières : en 2015, en milliers de t de Zn contenu. Monde : 13 400, Union Européenne (Irlande, Suède, Portugal, Pologne, Finlande..., en 2014) : 745.

Chine	4 900	Mexique	660
Australie	1 580	Bolivie	430
Pérou	1 370	Kazakhstan	340
Etats-Unis	850	Canada	300
Inde	830	Irlande	230

Source : USGS

Principaux pays exportateurs : en 2015, en milliers de t de concentrés. Monde : 11 269.

Australie	3 038	Mexique	628
Pérou	1 972	Irlande	453
Belgique	795	Suède	438
Etats-Unis	712	Turquie	337
Bolivie	683	Kazakhstan	322

Source : ITC

Les exportations de l'Australie sont destinées à la Chine à 45 %, à la Corée du Sud à 21 %, au Japon à 10 %. Celles du Pérou à la Chine à 41 %, à la Corée du Sud à 14 %, à l'Espagne à 13 %, au Japon à 8 %.

Principaux pays importateurs : en 2015, en milliers de t de concentrés. Monde : 12 084.

Chine	3 243	Pays Bas	552
Corée du Sud	1 904	Finlande	550
Belgique	1 175	Canada	535
Japon	917	France	327
Espagne	823	Norvège	288

Source : ITC

Principaux producteurs : en 2015, en milliers de t de Zn contenu dans les concentrés miniers.

Glencore (Suisse)	1 445	New Boliden (Suède)	299
Hindustan Zinc (Inde)	821	Cia Minera Volcan (Pérou)	285
Teck (Canada)	658	Nyrstar (Belgique)	234
Minmetals (Chine)	393	Sumitomo (Japon)	229
Votorantim (Brésil)	349	GoldCorp (Canada)	177

Source : Hindustan Zinc et rapports des sociétés

Glencore exploite des mines de zinc en Australie, dans le Queensland, à Mount Isa et Lady Loretta avec une production, en 2015, de 478 200 t de zinc et Mc Arthur River avec 272 700 t, au Kazakhstan avec 193 400 t, au Canada, à Matagami avec 52 000 t et Kidd avec 63 200 t, au Pérou à Antamina avec 71 200 t, Iscaycruz avec 85 200 t et Yauliyacu avec 30 800 t, en Bolivie à Sinchi Wayra et Illapa avec 72 100 t, en Argentine, à Aguilar avec 32 830 t, en Namibie, à Rosh Pinah avec 61 770 t, au Burkina Faso, à Perkoa avec 92 000 t.

Vedanta exploite, en Inde, à Rampura-Agucha, dans le Rajasthan, la plus importante mine au monde, ainsi que 4 autres mines, Kayad, Sindesar, Rajpura et Zawac, au travers de Hindustan Zinc Limited (HZL), société possédée à 64,9 %, l'état indien en détenant 29,5 %, avec, en 2015-16 une production de 744 000 t de zinc, 145 000 t de plomb et 425 t d'argent. En mai 2010, Vedanta a acquis les activités d'Anglo American dans le zinc et le plomb, avec les mines de Skorpion en Namibie (81 938 t de Zn en 2015-16), Lisheen en Irlande (71 825 t de Zn et 8 726 t de Pb en 2015-16) qui a été fermée en novembre 2015 et Black Mountain en Afrique du Sud (29 272 t de Zn, 34 114 t de Pb, 4 729 t de Cu, 41 t de Ag, en 2015-16), détenue à 74 %.

Teck, a produit, en 2015, 658 000 t de zinc contenu dans des concentrés lors de l'exploitation des mines de Red Dod, en Alaska, avec 567 000 t, Antamina, au Pérou avec une participation de 22,5 % d'une production de 235 000 t, Duck Pond, au Canada, fermée fin juin 2015, avec une production de 7 000 t de zinc et Pend Oreille, aux Etats-Unis, dans l'état de Washington, avec une production qui a redémarré en décembre 2014 et 31 000 t en 2015.

Réserves mondiales : estimées, en 2015, à 200 millions de t en Zn contenu. En milliers de t.

Australie	63 000	Etats-Unis	11 000
Chine	38 000	Inde	10 000
Pérou	25 000	Canada	6 200
Mexique	15 000	Bolivie	4 600

Source : USGS

Situation française : en 2015.

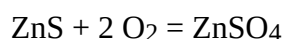
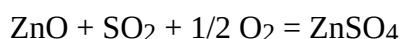
- Les mines, exploitées par Metaleurop, ont fermé en décembre 1991 pour les Malines (30) et en décembre 1993 pour St Salvy (81).
- Importations : 327 444 t à 24 % de Bolivie, 17 % d'Allemagne, 13 % d'Australie, 9 % du Portugal.
- Exportations : 62 558 t vers la Belgique à 57 %, les Pays Bas à 25 %, la Finlande à 9 %.

METALLURGIE DE PREMIERE FUSION en 2 étapes : grillage puis réduction.

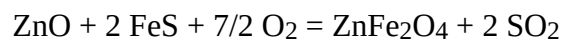
Grillage : il est réalisé par chauffage, à 900 - 1100°C, en présence d'air, selon la réaction :



Des réactions parasites sont susceptibles de se produire, principalement, la formation de sulfate selon des réactions qui ont lieu à 500-600°C, le sulfate formé étant décomposé vers 900°C :



Lorsque le concentré est riche en [fer](#), ce qui est souvent le cas, il se forme des ferrites, oxydes mixtes de zinc et de fer, selon la réaction :



Ces ferrites sont insolubles dans l'[acide sulfurique](#) dilué utilisé lors des opérations hydrométallurgiques et leur présence a longtemps été un obstacle à ces opérations.

Les autres éléments métalliques qui accompagnent le zinc dans le concentré minier subissent le même type de transformation : les sulfures sont transformés en oxydes.

Le dioxyde de soufre formé, avec une teneur de 6 à 7 % dans le gaz évacué du grillage, est récupéré et transformé en acide sulfurique (jusqu'à 2 t de H₂SO₄/t de Zn). Ainsi, les producteurs de zinc, ainsi que ceux de [plomb](#), sont également producteurs d'acide sulfurique. A l'usine d'Auby, en France, 99,5 % du [SO₂](#) produit lors du grillage est transformé en [H₂SO₄](#) selon le procédé de contact à double catalyse, la production a été, en 2015, de 193 000 t d'acide pour une production de 169 000 t de zinc.

Le concentré de zinc, après grillage, est appelé calcine.

La réalisation industrielle du grillage dépend des procédés métallurgiques de réduction utilisés par la suite.

- Si la réduction est effectuée par hydrométallurgie, il faut que la finesse initiale du concentré soit préservée afin de faciliter l'attaque acide. Il faut donc éviter tout frittage de la calcine et opérer plutôt à basse température (900-950°C). La présence de sulfate, en faible teneur, n'est pas gênante.

Dans ce cas, un [grillage en lit fluidisé](#) est utilisé : les particules à griller sont mises en suspension dans de l'air qui est insufflé à travers des orifices, de 5 mm de diamètre, présents dans la sole du four. Le débit d'air est d'environ 10 m³/min/m² de sole. La combustion a lieu vers 900-950°C. La teneur résiduelle en soufre, principalement sous forme de sulfate, est de 1,5 à 2 %. En France, lors du grillage de ses concentrés de zinc, l'usine Nyrstar d'Auby (59) utilise ce procédé (procédé Vieille Montagne - Lurgi qui est le plus répandu dans le Monde). Le four de grillage de Nyrstar à Balen, en Belgique, grille 850 t de concentrés/jour.

- Si la réduction est effectuée par pyrométallurgie (qui concerne les concentrés riches en plomb), selon des techniques proches de celles du haut fourneau, il faut que la calcine puisse supporter la charge du four et donc posséder une bonne résistance mécanique à l'écrasement tout en restant poreuse pour que le monoxyde de carbone puisse la réduire. La calcine est agglomérée par frittage lors d'un grillage effectué à haute température (1000°C et plus). La teneur en soufre total (sous forme de sulfure et de sulfate) doit être la plus faible possible (< 0,5 %).

Dans ce cas, un [grillage sur machines Dwight et Lloyd](#) est utilisé : ce type de grillage est également utilisé pour les concentrés de plomb qui sont, en général, réduits par pyrométallurgie. Les machines Dwight et Lloyd se présentent comme une bande sans fin de chariots mobiles munis de grilles, glissant sur des caissons étanches. L'air est soufflé à travers les grilles. La température de grillage est d'environ 1000°C (voir le chapitre consacré au [plomb](#)). La réaction de grillage étant très exothermique, afin d'éviter des températures trop élevées qui en faisant fondre le sulfure de plomb diminueraient la porosité de la charge, le concentré cru est dilué dans de la calcine déjà formée à des taux de 12 à 20 %.

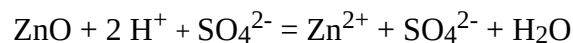
Diaporama sur le grillage

Réduction : elle est effectuée selon 2 procédés :

- Hydrométallurgique qui concerne 90 % de la production.
- Pyrométallurgique (ou procédé thermique).

Hydrométallurgie : elle se déroule en 4 étapes.

- Lixiviation : la calcine est attaquée par une solution diluée d'acide sulfurique (180 à 190 g/L). Cette solution est récupérée, à la fin de l'électrolyse, pour être recyclée en amont des opérations hydrométallurgiques. Elle contient également de 30 à 50 g/L d'ions Zn^{2+} qui n'ont pas été récupérés totalement par électrolyse et qui sont ainsi recyclés. La dissolution est effectuée vers 55 à 65°C, la chaleur étant apportée par la dissolution des oxydes. L'oxyde de zinc passe en solution selon la réaction :



Les autres oxydes métalliques présents dans la calcine passent également en solution sauf l'oxyde de plomb qui donne du sulfate de plomb très peu soluble. Les métaux précieux, argent et or, restent insolubles ainsi que, en général, la gangue, si celle-ci est siliceuse.

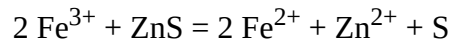
La dissolution de ZnO et des autres oxydes se traduit par une consommation d'acide et donc par une augmentation de pH. Cette dissolution dure de 1 à 4 heures et de 75 à 90 % du zinc passe en solution. Le zinc qui reste insoluble est celui qui, lors du grillage, a formé, avec l'oxyde ferrique, des ferrites. Ce zinc est récupéré par une opération complémentaire.

- Élimination des ions ferriques : lors de la lixiviation, appelée lixiviation neutre, le milieu est rendu oxydant par injection d'air ou de dioxygène ou par ajout de dioxyde de manganèse ou de permanganate de potassium afin, principalement, d'oxyder les ions Fe^{2+} , éventuellement présents, en ions Fe^{3+} . A ce stade, tous les ions Fe^{3+} ne sont pas dissous, une partie est incluse dans les ferrites insolubles. La solution passe, de façon continue, de cuves en cuves, le pH de la solution augmentant progressivement, par ajout de calcine, pour atteindre 5 dans la dernière cuve. A ce pH, l'hydroxyde ferrique précipite. Une décantation permet de séparer la solution des résidus insolubles.

Le résidu solide peut contenir, si le minerai de départ est riche en fer, une part importante du zinc initialement présent dans le minerai. Il est nécessaire de récupérer ce zinc en attaquant ce résidu, à chaud, vers 90-95°C, par la solution d'acide sulfurique provenant de l'électrolyse. Dans ces conditions, la ferrite est dissoute et les ions contenus, Fe^{3+} et Zn^{2+} , passent en solution. Cette opération est appelée lixiviation acide.

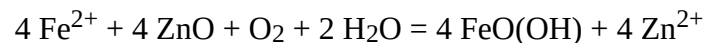
Toute la difficulté de l'hydrométallurgie du zinc réside, pour les minerais riches en fer, ce qui est le cas de ceux actuellement exploités, dans l'élimination des ions ferriques. En effet, par élévation de pH, l'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ précipite. Celui-ci peut être séparé d'une solution par décantation : c'est ce qui se produit lors de la "lixiviation neutre". Mais, si on souhaite, et cela est le cas industriellement, récupérer au maximum les ions Zn^{2+} de la solution, il est nécessaire de filtrer et de laver le précipité. Or, l'hydroxyde ferrique est très difficile, sinon impossible industriellement, à filtrer. Pour résoudre cette difficulté, plusieurs procédés sont utilisés, le plus employé a été longtemps celui dit "à la jarosite", les jarosites formant une famille de composés de formule

Fe₆(OH)₁₂(SO₄)₄M₂ avec M = Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ag⁺, H₃O⁺... Le procédé le plus employé actuellement est celui dit "à la goethite". La solution provenant de la lixiviation acide est traitée, à 95°C, par de la blende non grillée. Les ions Fe³⁺ sont réduits en Fe²⁺ selon la réaction :



Le résidu solide, contenant le soufre formé et la blende non dissoute, réintègre le circuit de traitement en amont du grillage.

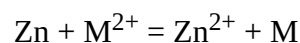
Le pH de la solution est augmenté, par ajout de calcine, pour atteindre environ 3, en présence de dioxygène pur ou d'air afin d'oxyder les ions Fe²⁺. La réaction mise en jeu est la suivante :



Les ions Fe³⁺ précipitent sous forme de goethite FeO(OH) et sont ainsi éliminés de la solution qui contient moins de 1 g/L d'ions Fe³⁺.

La solution issue de la lixiviation acide réintègre le circuit de traitement, en amont de la "lixiviation neutre". En même temps que les ions ferriques, les éléments suivants sont éliminés par précipitation : [Al](#), [Ga](#), [In](#), [Sb](#), [Sn](#), [As](#) et [Ge](#).

- Purification de la solution : après lixiviation, dans la solution, outre Zn²⁺, les ions suivants sont encore présents : Cu²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺, Co²⁺, Mn²⁺. L'élimination de la plupart d'entre eux est effectuée par réduction à l'aide de poudre de zinc. L'emploi de zinc permet d'éviter l'introduction d'ions étrangers. Les ions Mn²⁺, non réduits, resteront en solution, mais par contre, les autres ions seront réduits selon la réaction, avec M = [Cu](#), [Cd](#), [Ni](#), [Co](#) :



Les ions Cu²⁺ et Cd²⁺ sont très facilement réduits, cela est plus difficile pour Ni²⁺ et Co²⁺ qui demandent la présence d'activateurs et une température de 75 à 95°C. Ces métaux se déposent sur les particules de zinc, d'environ 30 micromètres de diamètre, en excès. La quantité de zinc utilisée dépend de la teneur en impuretés, elle varie de 16 à plus de 100 kg/t de zinc produit. Cette opération de purification, appelée cémentation, est réalisée, en continu, durant plusieurs heures (de 1 à 8 h). Une filtration sur toile très fine permet de récupérer les particules de zinc enrobées par les métaux déposés. Ce solide, appelé ciment, est traité afin de récupérer les métaux contenus et en particulier le zinc.

La teneur finale de la solution est, en général, pour chacun des ions Cu²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺ et Co²⁺ inférieure à 0,5 mg/L. La solution de Zn²⁺, est ainsi purifiée des ions susceptibles de se déposer, par électrolyse, en même temps que Zn.

- Électrolyse : elle est réalisée, dans des cuves en ciment revêtue de [PVC](#), vers 30 à 40°C. La solution contient initialement de 125 à 170 g/L de Zn²⁺.

Les anodes sont en alliage de [plomb](#) contenant de 0,5 à 1 % de [Ag](#) inattaquable en milieu sulfate, les cathodes sont en [aluminium](#). L'intérêt de l'emploi de cathodes en aluminium réside dans le fait que celui-ci, au pH utilisé - vers 5, est recouvert par une couche d'alumine qui évite le contact direct du zinc déposé avec l'aluminium et ainsi la formation à l'interface d'un alliage qui empêcherait la récupération facile du zinc sans détérioration de la cathode.

La tension est comprise entre 3,2 et 3,7 V, avec une densité de courant de 400 à 700 A/m².
L'intensité atteint jusqu'à 115 000 A.

Le zinc se dépose sur la cathode d'où il est décollé toutes les 24, 48 ou 72 heures par pelage (ou stripping). La production, par cellules qui contiennent jusqu'à 86 cathodes de 1,6 m², peut atteindre 3 t/jour. La consommation d'énergie est de 3 000 à 3 500 kWh/t de Zn produit. Le zinc obtenu très pur (99,995 %) contient moins de 50 ppm d'impuretés, la principale étant le plomb. Il n'a pas besoin de subir un raffinage ultérieur. Les ions Mn²⁺ qui restent dans la solution s'oxydent en MnO₂ sur l'anode en plomb.

La solution, après épuisement partiel (au 2/3) des ions Zn²⁺ et régénération de l'acide à l'anode, avec dégagement de [dioxygène](#), est recyclée en amont des lixiviations neutre et acide.

[Diaporama sur l'hydrométallurgie](#)

Pyrométallurgie : concerne les minerais riches en plomb et en autres impuretés métalliques valorisables. La réduction a lieu dans des fours horizontaux ou verticaux par réduction avec le carbone ou selon le procédé Imperial Smelting par réduction avec le dioxyde de carbone (voir le chapitre consacré au [plomb](#)). Un raffinage du zinc d'œuvre (à 98,5 %) ainsi obtenu est nécessaire. La difficulté principale de la pyrométallurgie du zinc réside dans la température d'ébullition du zinc, 907°C, inférieure aux températures de réduction possibles thermodynamiquement avec le carbone ou le monoxyde de carbone. Le zinc, à l'état gazeux, peut ainsi être rapidement réoxydé par le monoxyde ou le dioxyde de carbone formé lors de son refroidissement. En conséquence, la vapeur doit être refroidie le plus rapidement possible (voir les diagrammes d'Ellingham dans le diaporama ci-dessous). La réduction par le carbone est cinétiquement facilitée par la formation de zinc gazeux mais le chauffage du four doit être réalisé par l'extérieur de ce dernier afin d'éviter que les produits de la combustion, en particulier le dioxyde de carbone, réoxydent le zinc.

- Le raffinage est réalisé par distillations fractionnées selon le procédé New Jersey. Le plomb est éliminé dans une première colonne, puis [le cadmium](#) dans une seconde (température d'ébullition de Cd : 767°C). On obtient du zinc à 99,99 % qui est coulé en lingots de 25 kg.

[Diaporama sur la pyrométallurgie](#)

PRODUCTIONS METALLURGIQUES : primaires et secondaires, en 2014, en milliers de t.
Monde : 13 200 (13 897 en 2015), Union européenne : 2 035.

Chine	5 610	Espagne	490
Corée du Sud	901	Australie	482
Inde	706	Pérou	336
Canada	649	Kazakhstan	325
Japon	583	Mexique	321

Source : USGS

Commerce international du zinc brut : en 2015.

- Exportations : en milliers de t. Total mondial : 5 273.

Corée du Sud	528	Inde	312
--------------	-----	------	-----

Canada	513	Kazakhstan	290
Australie	399	Finlande	261
Espagne	359	Pérou	259
Belgique	314	Pays Bas	206

Source : ITC

Les exportations de la Corée du Sud sont destinées pour 21 % à la Chine, 14 % l'Inde, 10 % le Viet Nam.

- Importations : en milliers de t. Total mondial : 5 180.

Etats-Unis	667	Turquie	248
Chine	652	Italie	203
Allemagne	427	Pays Bas	194
Belgique	366	France	147
Taiwan	256	Inde	135

Source : ITC

Les importations des Etats-Unis proviennent à 72 % du Canada, 16 % du Mexique, 7 % d'Australie, 5 % du Pérou.

Groupes industriels : principaux groupes mondiaux, production de 2015, en milliers de t.

Korea Zinc Group (Corée du Sud)	1 135	New Boliden (Suède)	468
Nyrstar (Belgique)	1 115	Shaanxi Non ferrous Metals (Chine)	422
Glencore (Suisse)	1 032	Minmetals (Chine)	385
Hindustan Zinc (Inde)	820	Yuguang Gold & Lead Company (Chine)	330
Votorantim Metals (Brésil)	601	Teck Resources (Canada)	295

Source : Nyrstar, Hindustan Zinc et rapports des sociétés

[Korea Zinc Group](#), produit en Corée du Sud, à Onsan, avec 580 000 t/an et à Sukpo, avec 360 000 t/an par sa filiale [Young Poong](#) et en Australie, par sa filiale [Sun Metals Company](#), à Townville, dans le Nord Queensland, avec 220 000 t/an.

En 2015, la production de [Nyrstar](#) a été de 1,115 million de t de zinc, 1,451 million de t d'acide sulfurique, 185 000 t de plomb, 4 000 t de cuivre, 41 t d'indium, 453 t d'argent, 2 400 kg d'or. La production de zinc est réalisée dans les usines de Balen (Belgique) avec 291 000 t, Hobart (Australie) avec 271 000 t, Budel (Pays-Bas) avec 291 000 t, Clarksville (Tennessee, Etats-Unis) avec 124 000 t, Aubry (France) avec 169 000 t. Par ailleurs, Nyrstar possède des participations dans des usines chinoises, en particulier à Kunming (Yunnan).

En 2015, [Glencore](#) a produit au Kazakhstan, à Ust Kamenogorsk et Ridder, 193 400 t de zinc, avec sa filiale [Kazzinc](#), en Europe, 788 800 t de zinc produites en Italie, en Sardaigne, à Portovesme, avec une capacité de 140 000 t/an, en Espagne, à San Juan de Nieva, avec 550 000 t/an, en Allemagne, à Nordenham, avec 133 000 t/an, en Argentine, à Santa Fé, avec 26 100 t de zinc, au Canada, province du Québec, à Salaberry-de-Valleyfield, avec 68 200 t, correspondant à la part de 25 % de Glencore dans la raffinerie CEZ.

Principales usines : en milliers de t de capacités annuelles de production.

Corée du Sud	Onsan (Korea Zinc) : 650	Corée du Sud	Sukpo (Korea Zinc) : 360
Inde	Chanderiya (Hindustan Zinc) : 525	Chine (Shaanxi)	Mian Xian (Shaanxi Non ferrous Metals) : 340
Espagne	San Juan de Nieva (Glencore) : 510	Pérou	Cajamarquilla (Votorantim) : 330
Chine (Hunan)	Zhuzhou (Minmetals) : 420	Finlande	Kokkola (New Boliden) : 315

Source : Hindustan Zinc et rapports des sociétés

En 2015, la production de la raffinerie de Korea Zinc, à Onnsan, en Corée du Sud a été de 580 000 t.

L'usine de Chanderiya, exploitée par Hindustan Zinc, possède une capacité de production de 420 000 t/an par hydrométallurgie et 105 000 t/an par pyrométallurgie. En 2015-16, la production a été de 488 470 t.

L'usine de San Juan de Nieva, en Espagne, exploitée par l'[Asturiana de Zinc](#), propriété du groupe Glencore, est l'usine de production de zinc la plus importante en Europe avec, en 2015, 516 041 t.

RECYCLAGE et métallurgie de seconde fusion (affinage) : le zinc obtenu est appelé secondaire.

Le zinc récupéré après usage ainsi que les chutes et déchets des usines métallurgiques sont soit réutilisés directement, soit réemployés après refusion (c'est le cas, par exemple, des alliages de fonderie) soit encore retraités en suivant le circuit de la métallurgie de 1^{ère} fusion (c'est le cas, en particulier, des oxydes de zinc).

Le zinc recyclé représente 40 % de la consommation mondiale. En 2015, aux Etats-Unis, la production de zinc secondaire est de 50 000 t, à côté d'une production primaire de 125 000 t. Dans ce pays, en 2015, le recyclage, avec 65 000 t, représente 37 % de la production. En Europe de l'ouest, le zinc utilisé comme couverture de toitures et pour recueillir les eaux pluviales est recyclé à 90 % ce qui représente 110 230 t/an.

Sources de zinc recyclé neuf et usagé : par secteur industriel, en 2003, dans le monde occidental, en %.

Industrie du laiton	42 %	Zinc laminé	6 %
Galvanisation	27 %	Poussières d'aciéries	6 %
Fonderie	16 %	Industrie chimique	2 %

Le zinc contenu dans les laitons (600 000 t de Zn/an) est recyclé par l'industrie du [cuivre](#).

Le zinc de galvanisation se retrouve dans les [ferrailles](#) recyclées par la sidérurgie et peut être récupéré par traitement des poussières des aciéries électriques dans lesquelles Zn est sous forme de ZnO. 1 t d'acier produit 20 kg de poussières contenant de 15 à 30 % de Zn.

- L'usine Recytech, détenue à 50 % par [Recylex](#), à Fouquières-lez-Lens (62) traite, dans un four tournant selon le procédé Waelz, des poussières d'aciéries électriques, de fonderies et d'autres résidus zincifères pour récupérer, principalement de l'oxyde brut, appelé oxyde Waelz, contenant de

50 à 60 % de ZnO. La réduction est effectuée à l'aide de carbone, vers 1200°C. Le zinc se volatilise puis se réoxyde lors de son refroidissement. Cet oxyde est destiné à alimenter les usines de production de zinc raffiné. Recylex recycle également des poussières d'aciéries électriques et des déchets zincifères à Goslar-Oker, en Allemagne. Le groupe, en 2015, a produit 65 969 t d'oxydes Waelz à partir de 164 300 t de poussières d'aciéries électriques et 22 941 t d'oxyde de zinc.

SITUATION FRANCAISE : en 2015.

- Production de zinc primaire raffiné : 169 000 t.
- Production de zinc recyclé (2007) : 75 000 t.
- Importations de Zn brut autres que déchets : 111 385 t des Pays Bas à 28 %, du Luxembourg à 22 %, de Belgique à 16 %, d'Allemagne à 14 %.
- Importations de déchets : 59 358 t à 96 % d'Allemagne.
- Exportations de Zn brut autres que déchets : 91 215 t vers la Belgique à 99 %.
- Exportation de déchets : 79 286 t vers la Belgique à 30 %, l'Italie à 23 %, les Pays Bas à 22 %, la Chine à 14 %.
- Usines :
 - Hydrométallurgie et grillage : Auby (59, Nyrstar). La production a été de 169 000 t de zinc, de 41 t d'indium et 193 000 t d'acide sulfurique.
 - Recyclage : Recytech (détenu 50/50 par Befesa Steel Service et Recylex) à Fouquières-lez-Lens (62) qui recycle les poussières d'aciéries électriques, de fonderies et d'autres résidus zincifères. En 2012, traitement de 140 000 t de poussières et résidus de zinc pour produire 45 000 t d'oxyde brut (oxyde Waelz).

UTILISATIONS :

Consommations mondiales : en 2014, en milliers de t de Zn. Monde : 13 809 (13 745 en 2015), Union européenne : 2 361.

Chine	6 421	Allemagne (2012)	467
Etats-Unis	963	Belgique (2012)	316
Inde	658	Brésil	269
Corée du Sud	608	Italie (2012)	255
Japon	506	Russie (2012)	226

Source : ILZSG et Wood Mackenzie pour 2012

Répartition de la consommation :

	Monde en 2014	Etats Unis en 2014	France en 2007		Monde en 2014	Etats Unis en 2014	France en 2007
<u>Galvanisation</u>	50 %	80 %	49 %	Demi produits	6 %	9 %	35 %
<u>Laiton</u> et bronzes	17 %	6 %	11 %	Usages chimiques	6 %		4 %

Autres alliages (Zamak...)	17 %	5 %	-	Autres produits	4 %		1 %
----------------------------	------	-----	---	-----------------	-----	--	-----

Source : USGS et ILZSG

En France, la production de demi-produits représente une part importante de la production, liée à l'utilisation importante des feuilles de zinc dans le bâtiment.

Dans le monde, en 2010, 51 % du zinc produit est employé dans la construction, 20 % les transports, 16 % les infrastructures, 7 % les équipements industriels, 6 % les biens de consommation.

Principales utilisations :

- Revêtements anticorrosion dans l'[acier zingué](#), voir ce chapitre. On estime que 10 % de la production mondiale d'acier est zinguée (80 % galvanisée, 20 % électrozinguée).
- Bâtiment : outre les utilisations dans l'[acier galvanisé](#) (avec parfois des revêtements à l'aide des alliages 55 % [Al](#), 43,5 % Zn, 1,5 % [Si](#) ou 95 % Zn, 5 % Al, utilisés pour les toitures de bâtiments industriels), le zinc est utilisé pur ou faiblement allié. Le zinc est protégé de la corrosion par une couche passive de carbonate-hydroxyde de zinc ($2ZnCO_3, 3Zn(OH)_2$). La vitesse moyenne annuelle de corrosion est de 1 micromètre en atmosphère rurale et de 10 micromètres en atmosphère industrielle. L'épaisseur moyenne du zinc laminé est de 0,7 mm. Des ajouts de [Cu](#) (0,1 % minimum) et [Ti](#) (0,05 % minimum) permettent de diminuer le coefficient de dilatation du zinc. [Paris couvre ses toits, depuis le baron Haussmann, de zinc laminé : 5 millions de m² de surface.](#)
- Laitons : alliages avec Cu : 5 à 40 % de Zn (voir le chapitre [cuivre](#)). Le cuivre contenu dans le laiton confère à celui-ci un pouvoir bactéricide.
- Fonderie : les alliages "Zamak" (ZA4G, ZA4U1G, ZA4U3G) contenant de 3,9 à 4,3 % de Al, ainsi que Cu jusqu'à 3,5 % et [Mg](#) jusqu'à 0,06 % représentent 90 % de la production d'alliages de zinc de fonderie. Autres alliages de fonderie : ZA 8, ZA 27, Ilzro 12, Kayem. Dans les automobiles les pompes à essence sont en Ilzro. Dans un véhicule automobile moyen, de type européen, entre 10,2 kg de zinc dont 4,9 kg d'alliages, 3,2 dans le zingage des tôles et 0,5 kg dans les pneus. En 2003, dans le monde, les secteurs d'utilisation de ces alliages sont les suivants :

Automobile	32 %	Vêtements	10 %
Construction	28 %	Jouets, sport	9 %
Télécom, électricité	18 %		

Autres applications :

- Anodes sacrificielles : 450 t/an en France pour protéger les coques de navires, les citernes enterrées...
- Poussière de zinc : pour la fabrication de l'aniline, la stabilisation de [matières plastiques](#), la [cémentation de métaux précieux](#), la purification ultime des solutions d'électrolyse (voir le paragraphe hydrométallurgie), comme agent réducteur dans la fabrication des hydrosulfites de sodium et de la [formaldéhyde](#), comme revêtement protecteur de l'[acier](#) dans les procédés dits de matoplastie et de shérardisation.

- Sel, poudre et zinc laminé : pour les anodes des piles salines et alcalines. Dans ces piles, le pôle positif est relié à un mélange de [dioxyde de manganèse](#) et de carbone (voir le chapitre consacré au [manganèse](#)). Les solutions d'électrolyte sont gélifiées (par de l'amidon) afin d'obtenir des piles sèches. Le pôle négatif est en zinc dont l'état dépend du type de pile.

Dans le cas des piles salines cylindriques, dans lesquelles l'électrolyte est soit du chlorure de zinc pur soit une solution fortement concentrée de $ZnCl_2$ et de NH_4Cl , le pôle négatif est constitué par un alliage de zinc (avec ajouts de [Pb](#) : 0,2 %) sous forme de godet. Le pôle positif est axial.

Dans le cas des piles alcalines, dans lesquelles l'électrolyte est [KOH](#), le pôle négatif, axial, est constitué par un crayon de zinc entouré d'un aggloméré de poudre de zinc et est en contact avec la partie inférieure de la pile. Le boîtier, en [acier](#), constitue le pôle positif.

- Au début des années 80, aux États-Unis, les pièces de 1 cent qui étaient traditionnellement en cuivre ont été remplacées, par soucis d'économies, par des pièces de zinc recouvertes de [Cu](#). La consommation de ces pièces est particulièrement importante, plusieurs milliers de t/an, du fait de la tradition de jeter ces pièces dans les fontaines.

- Agriculture : on estime que la moitié des sols agricoles ont un déficit en zinc. En 2015, la consommation mondiale de zinc est de 255 000 t dont 160 000 t en fertilisation, le reste dans l'alimentation animale. Dans ce secteur le sulfate de zinc représente 66 % de la consommation (77 % en fertilisation, 23 % en alimentation animale), l'oxyde de zinc représentant 34 % de la consommation (40 % en fertilisation, 60 % en alimentation animale). Les consommations en fertilisation en 2015, sont les suivantes, en tonnes de zinc :

Inde	60 000 t	Europe	12 500 t
Chine	52 400 t	Australie	12 400 t
Reste de l'Asie	49 500 t	Afrique	10 000 t
Amérique du nord	41 700 t	Europe de l'est et Asie centrale	3 000 t
Amérique latine	15 600 t		

Source : IZA

- Organisme humain : les besoins sont de 12 à 15 mg/j nécessaires à l'activité de plus de 300 enzymes. L'organisme d'un homme de 70 kg contient de 2 à 3 g de zinc. Sa déficience entraîne en particulier, le nanisme... 1/3 de la population mondiale est affectée par un déficit en zinc ce qui entraîne 800 000 morts/an dans le monde.

Oxyde de zinc : préparé, par oxydation de produits de récupération et de déchets de zinc après vaporisation du zinc (procédé français) ou par réduction de concentrés miniers et combustion du zinc formé (procédé américain) ou encore par précipitation puis calcination à partir de solutions. Il entre dans la fabrication des [caoutchoucs](#) et pneumatiques car il accélère la vulcanisation, dans l'agriculture et l'alimentation animale (oligo-élément), en pharmacie (élément cicatrisant, crèmes pour protection UV), dans les varistances, les émaux et céramiques, les parafoudres moyenne tension du réseau électrique de l'[EDF](#). En 2015, la production mondiale est de 1,6 million de t.

[Umicore](#) est un producteur important, avec 70 000 t/an, en Belgique, à Zolder, aux Pays Bas, à Eijsden, en Norvège, à Larvik, en Inde, à Goa.

- Secteurs d'utilisation de ZnO : dans le monde, en 2015.

Pneumatiques et caoutchoucs	56 %	Agriculture	7 %
Céramiques et verres	19 %	Peintures	3 %
Produits chimiques	8 %		

Source : IZA

[Diaporama sur les utilisations du zinc](#)