





# Le zinc : revue de l'offre mondiale en 2021

Rapport final

**BRGM/RP-69633-FR**  
Juillet 2022

Étude réalisée dans le cadre des projets  
d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM 2022

**P. Notom, J. Duron, M. Picault, M. Leguérinel et N. Charles**

**Vérificateur :**

Nom : Laurent Bailly  
Fonction : Métallogéniste senior  
Date : 27/07/2022

Signature :



**Approbateur :**

Nom : François Prognon  
Fonction : Directeur Adjoint Direction  
des GéoRessources  
Date : 04/08/2022

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](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : Zinc, Ressources, Réserves, Production, Prix, Marché, Approvisionnement, Matières premières minérales, Anodes, Cathodes, Gisements, Recyclage, Géopolitique, Raffinerie, Fonderie

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

**Notom P., Duron J., Picault M., Leguériel M., et Charles N. (2022)** – Le zinc : revue de l'offre mondiale en 2021. Rapport final. BRGM/RP-69633-FR, 91 p., 58 fig., 4 tabl.

© BRGM, 2022, 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 2022 n° 2103674907 relative aux ressources minérales, au littoral et aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique, signée le 16 juin 2022 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MTE) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Ce travail a été réalisé par le BRGM avec le soutien financier du MTE.

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

# Synthèse

## Géologie du zinc

Le zinc est un métal relativement présent dans la croûte terrestre, son abondance naturelle (Clarke) étant de 60-80 ppm (partie par million, soit 60-80 grammes par tonne). Il est très rare de le trouver à l'état natif mais il entre dans la composition de plusieurs espèces minérales dont les plus fréquentes sont les sulfures (sphalérite), puis les oxydes, les carbonates et hydrocarbonates. Les gisements de zinc sont très largement distribués sur le globe et sont de natures variées. Actuellement, ce sont les gisements liés au volcanisme sous-marin (VMS : amas sulfurés volcanogéniques et SEDEX : sédimentaire exhalatif) ainsi que les gisements sédimentaires de type MVT (Mississippi Valley-Type) qui assurent près de l'intégralité de la production mondiale de zinc (Australie, Chine, Pérou et Canada). Les teneurs moyennes en plomb-zinc (Pb-Zn) sont de 3 à 14 % pour les gisements de type VMS, de 9 à 20 % pour les gisements de type SEDEX, de 2 à 6 % pour les gisements de type MVT. Les gisements de type VMS et SEDEX ont des tonnages plus importants (supérieurs à 4 Mt de minerai) que ceux de type MVT (environ 1 Mt de minerai), bien que moins nombreux par district. Les gisements de type MVT sont souvent regroupés en district ou province et peuvent alors atteindre 10 Mt. Les gisements de type SEDEX et MVT représentent 75 % des réserves mondiales.

## Production minière mondiale

La production mondiale de zinc est restée relativement stable entre 1984 et 1994, oscillant entre 6,2 Mt et 7,2 Mt par an. Elle a ensuite doublé au cours des deux décennies qui ont suivies pour atteindre une production annuelle de l'ordre de 13,5 Mt. Sur la période plus récente, entre 2014 et 2020, la production mondiale s'est plutôt stabilisée, voire réduite pour atteindre une production annuelle de 12,3 Mt en 2020. C'est en particulier en Chine que la production minière a fortement augmenté, passant de quelques dizaines de milliers de tonnes dans les années 80 à plus de 4 Mt par an depuis 2012. Il faut cependant souligner que la pandémie de Covid-19 a impacté le secteur de la construction et de l'industrie dès la fin 2019, ce qui a entraîné une réduction de la demande et donc une baisse temporaire de la production en 2020. L'International Zinc Association estime que la production minière mondiale annuelle de zinc s'établira entre 17 Mt et 22 Mt en fonction de différents scénarios de consommation et de recyclage d'ici 2050.

Même si elle est dominée par certains pays comme la Chine, le Pérou et l'Australie, la production mondiale est finalement assez bien répartie sur les cinq continents. De nombreux pays sont producteurs de zinc. Les 20 plus grosses mines produisant du zinc représentent un tiers de la production mondiale et sont réparties dans 13 pays différents, dont 4 en Chine et 4 en Australie. En 2020, les dix plus grosses sociétés contrôlaient 30 % de la production minière mondiale de zinc, soit environ 4 Mt. La société suisse Glencore, produit environ 10 % de la production mondiale de zinc. Il existe de nombreuses entreprises productrices de zinc, aux nationalités variées. Cette répartition s'explique d'une part par le nombre de gisements dans le monde et par le fait que le zinc est produit en parallèle d'autres productions minières comme le plomb ou le cuivre (co-production/sous-production). Il n'est pas rare que ces producteurs miniers intègrent aussi des unités de transformation métallurgique pour produire du zinc métal.

Le zinc étant souvent un sous-produit ou co-produit d'extraction de gisements importants de cuivre ou de plomb, l'ouverture de nouvelles unités de production minière de zinc n'est pas simplement contrôlée par un marché de l'offre et de la demande, mais dépend aussi de la dynamique des marchés des autres substances.

## Production métallurgique mondiale

Le principal minerai de zinc est la sphalérite ou « blende » qui est un sulfure de zinc (ZnS). Actuellement, plus de 96 % de la production de zinc primaire sont issues des minerais sulfurés. Historiquement, les premiers minerais de zinc étaient des minerais oxydés ou « calamine » constitués de carbonate (smithsonite) et/ou de silicate (willemite, hémimorphite). Le choix du procédé utilisé pour valoriser les minerais dépend essentiellement de la qualité du concentré produit par la mine. En effet, en fonction du gisement, les procédés minéralurgiques seront plus ou moins complexes. Le type de gisement, son environnement géologique, sa composition minéralogique ainsi que son altération ont un impact important sur la qualité du concentré. Dans une grande majorité des cas, les gisements de zinc contiennent également d'autres substances valorisables, et sont donc qualifiés de polymétalliques. Les principaux métaux associés au zinc dans les gisements polymétalliques sont par ordre d'importance, le plomb, le cuivre et les métaux précieux (argent et or). Nayak et al. (2021) indiquent que la méthode de traitement la plus utilisée pour séparer les différents constituants minéralogiques de ces minerais est la flottation et plus accessoirement les procédés gravitaires.

La production métallurgique du zinc est basée sur deux méthodes différentes, la voie pyrométallurgique et la voie hydrométallurgique. La pyrométallurgie du zinc est centrée sur l'évaporation suivie de la purification du métal. L'hydrométallurgie consiste en l'extraction du zinc par voie aqueuse, et à la récupération du métal sous forme de cathode par le biais d'une électrolyse. Dans les deux cas, la première étape de la production consiste en un traitement thermique du minerai (grillage) permettant de convertir le sulfure de zinc initial en oxyde de zinc (ZnO ou calcine). C'est pour cette raison que la voie hydrométallurgique est parfois dénommée voie pyrohydrométallurgique.

Sur les 145 fonderies renseignées dans les bases de données de l'ILZSG (International Lead & Zinc Study Group) en 2020, 66 sont situées en Chine, 10 au Japon, 9 en Inde et 9 en Iran. Parmi les fonderies restantes, 27 sont localisées sur le continent européen et 12 en Amérique. La capacité de production de zinc primaire du continent asiatique est de loin la plus importante, soutenue essentiellement par la Chine. Cette production a triplé depuis les années 90 avec une capacité de seulement 2,5 Mt de zinc par an jusqu'à plus de 7,5 Mt à partir de 2010. Pendant ce même laps de temps, la production européenne s'est réduite en passant de 2,5 à 2 Mt par an. La participation des autres continents est nettement plus faible avec des changements moins prononcés. La position de la Chine dans le domaine de l'élaboration des slabs (feuilles ou plaques) de zinc est largement dominante avec la production de 46 % du volume mondial en 2020. En effet, plus de la moitié de la capacité mondiale de production est située dans ce pays avec une capacité totale de 7,75 Mt de zinc annuel.

De nombreux sous-produits sont, ou peuvent être, extraits du minerai de zinc lors des différentes étapes d'extraction et de purifications. Le caractère économique ou non de leurs récupérations dépend de plusieurs critères comme la concentration initiale dans le minerai, les coûts d'extraction, la présence d'une raffinerie adaptée sur site ou à proximité (importance des coûts de transport) ainsi que les débouchés en terme de marchés. C'est le cas de l'acide sulfurique, du mercure, du plomb, des métaux précieux (or et argent), du cuivre, du cadmium, du germanium, de l'indium etc.

## Réserves et ressources

Selon l'USGS, les ressources mondiales de zinc étaient estimées, en 2021, à 1,9 Gt. À titre de comparaison, les ressources de cuivre sont évaluées à 2 Gt, celles de fer à 110 Gt et celles de lithium à 89 Mt. Les ressources sont globalement réparties sur toute la surface du globe.

En 2021, les réserves mondiales de zinc ont été évaluées par l'USGS à 251 Mt dont 27 % rien qu'en Australie. Les principales autres réserves sont localisées en Chine, en Russie, au Mexique et au Pérou. Comme pour la production, le reste des réserves mondiales est assez largement réparti dans différents pays des cinq continents. On y retrouve des acteurs tels que l'Inde, les États-Unis, la Bolivie, le Canada ou le Kazakhstan. L'Europe est représentée par la Suède qui possède 1 % des réserves mondiales. Les réserves rapportées par l'USGS sont assez stables depuis 20 ans, oscillant entre 16 et 25 ans de production courante (réserves rapportées annuellement et divisées par la production annuelle). Cependant, les sociétés minières n'ont pas de véritable justification technique à vouloir certifier leurs réserves au-delà d'une vingtaine d'années, il est donc probable que les réserves mondiales soient plus importantes que celles effectivement évaluées aujourd'hui. La tendance observable sur les 25 dernières années est à l'augmentation des réserves de zinc même s'il peut y avoir certaines variations ou réévaluation entraînant des écarts d'une année à l'autre. En 1995, les réserves évaluées par l'USGS étaient de l'ordre de 140 Mt, bien en deçà des réserves actuelles.

## **Recyclage**

Il existe trois grandes catégories de déchets de zinc : les rebuts issus de la production des produits de première utilisation (représentent environ 40 % de l'origine du zinc recyclé), les rebuts issus de la production des biens finis (18 %) et les déchets correspondant aux produits en fin de vie, ou « old scraps » (42 %). Les deux premières catégories de déchets correspondent à des chutes de fabrication (« new scraps »). Les déchets générés lors de la fabrication des produits de première utilisation et des biens de consommation constituent la source la plus importante pour le recyclage. Pour donner un ordre de grandeur, cela représente environ 28 Mt de zinc recyclé entre 2010 et 2019. La grande diversité des usages du zinc (ferrures et raccords en laiton, pièces moulées sous pression en alliage de zinc, pièces en acier galvanisé provenant des automobiles, des appareils électroménagers, de composants électriques ou même de déconstruction d'infrastructures) rend son recyclage, d'un point de vue global, difficile. Néanmoins, le contexte actuel fait que le recyclage du zinc contenu dans les biens de consommation gagne de plus en plus d'importance.

Contrairement à de nombreux autres métaux, il n'existe pas de technologie unique de recyclage. Cependant, des technologies de recyclage sur mesure sont bien établies pour les utilisations les plus importantes du zinc. À titre d'exemple, plus de 95 % des déchets de tôles de zinc sont recyclés en Europe. La refonte du zinc ne nécessite que 5 % de l'énergie nécessaire à la production de zinc primaire à partir de minerais.

Le zinc peut être recyclé de manière économique et sans perte de ses propriétés physiques. Cette valeur intrinsèque contribue à assurer la collecte et la récupération. En moins de dix ans - de 2010 à 2018 - le recyclage du zinc a doublé, en partie en raison de l'augmentation des réglementations et des mesures d'application visant à promouvoir le recyclage des poussières des fours à arc électrique (FAE) en Europe, en Amérique du Nord et en Chine. En outre, environ 250 Mt de zinc sont actuellement retenues dans le stock utile et seront disponibles pour le recyclage à l'avenir. Aujourd'hui, environ 30 % de la production mondiale de zinc provient de zinc recyclé. La collecte et le recyclage du zinc contenu dans les équipements en fin de vie se sont améliorés puisque le taux de recyclage atteint aujourd'hui environ 34 %. Les taux de recyclage du zinc contenus dans les rebuts de fabrication sont de l'ordre de 80 %. Ces rebuts sont en général bien récupérés et recyclés par les industriels et fabricants.



## Perspectives

Le zinc est utilisé principalement pour la galvanisation de l'acier puisqu'il confère aux aciers un caractère inoxydable. Malheureusement, il n'y a pas de procédé majeur permettant de donner aux aciers une aussi bonne protection que la galvanisation, rendant ainsi le zinc peu substituable dans cet usage. La galvanisation représente près de la moitié des usages totaux et les perspectives de développement économique de nombreux pays vont tirer la demande vers le haut, en particulier pour les secteurs des infrastructures et des transports. Selon l'International Zinc Association, la consommation mondiale en zinc pourrait presque doubler d'ici 2050. Une part de cette nécessaire augmentation de production pourrait provenir des nouveaux projets miniers en phase de faisabilité, et l'autre part du recyclage. En effet, le stock utile de zinc est important et le potentiel d'amélioration est important, en particulier par la mise en place de meilleurs processus de collecte des déchets en fin de vie. Néanmoins, l'usage principal du zinc dans les infrastructures limite sa récupération pour le recyclage puisque la durée de vie de ces éléments peut aller de plusieurs dizaines à plusieurs centaines d'années. De nombreux projets sont en phase de faisabilité avancée ou de construction, encore une fois répartis dans différents pays dans le monde entier, tels que les projets Ozernoye en Russie, Dairi en Indonésie, Kvanefjeld au Groenland ou encore Aripuana au Brésil. Les dates de démarrage estimées sont comprises entre 2022 et 2025, ce qui permettra d'apporter quelques centaines de milliers de tonnes supplémentaires sur le marché. Même si les prix connaissent une relative stabilité, la tendance est à l'augmentation générale du cours du zinc. Cependant, une des difficultés dans l'estimation du prix futur réside dans la partie production, puisque le zinc est co-produit avec des substances telles que le cuivre ou le plomb. Une législation plus stricte, par exemple sur l'usage du plomb dans nos sociétés, pourrait limiter la rentabilité des gisements Pb-Zn, pouvant mener jusqu'à l'arrêt de leur exploitation, ce qui impacterait la disponibilité mondiale de concentré de zinc et donc son prix. Au-delà du développement des secteurs des infrastructures et des transports qui consomment du zinc pour la galvanisation, le développement de nouvelles technologies pour de nouvelles applications telles que les batteries ou les énergies offshores pourrait aussi entraîner une augmentation de la consommation en zinc.

# Sommaire

<b>I. Contexte de l'étude .....</b>	<b>18</b>
I.1. DÉFINITIONS.....	18
I.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE .....	19
I.3. SOURCES DES DONNÉES .....	19
<b>II. Introduction.....</b>	<b>22</b>
<b>III. Quelques fondamentaux sur les gisements de zinc.....</b>	<b>26</b>
III.1.    LE ZINC PROVIENT DE GISEMENTS ET MINÉRAIS VARIÉS .....	26
III.2.    GÎTES DU VOLCANISME SOUS-MARIN : VMS ET SEDEX .....	27
III.2.1.    Amas sulfurés volcanogéniques (VMS) .....	28
III.2.2.    SEDEX (SEDimentary EXhalative) .....	34
III.3.    GÎTES DIAGÉNÉTIQUES EN CONTEXTE DE PLATEFORME CARBONATÉE : TYPE MVT.....	38
III.4.    GÎTES PROFONDS EN CONTEXTE DUCTILE-CASSANT : LES FILONS À PLOMB-ZINC .....	40
III.5.    GÎTES DE ZINC NON SULFURÉS .....	41
III.5.1.    Gîtes et gisements supergènes.....	42
III.5.2.    Gîtes et gisements hypogènes.....	43
III.6.    GÎTES DU MÉTAMORPHISME DE CONTACT : SKARNS ET MANTOS	45
III.7.    GÎTES DU VOLCANISME AÉRIEN : ÉPITHERMAUX À AU-AG-U.....	47
III.8.    AUTRES TYPES DE GISEMENTS ZINCIFÈRES .....	48
<b>IV. la production minière mondiale stagne depuis 2011 .....</b>	<b>49</b>
IV.1.1.    Les 20 plus grosses mines produisent un tiers du zinc mondial .....	50
IV.1.2.    Les 10 plus grandes sociétés produisent près d'un tiers du zinc mondial 51	
IV.2.    UNE PRODUCTION MÉTALLURGIQUE MONDIALE EN MUTATION ...	52
IV.2.1.    Production métallurgique.....	53
IV.2.2.    Les smelters dans le monde .....	57
IV.2.3.    Économie des smelters .....	59
IV.2.4.    Les sous-produits de la métallurgie du zinc.....	60
IV.3.    ÉTAT DES RESERVES ET RESSOURCES .....	62
IV.3.1.    Définitions .....	62

IV.3.2.	Les ressources mondiales .....	63
IV.3.3.	Les réserves mondiales .....	63
IV.3.4.	Les principaux projets en cours de développement.....	65
IV.4.	RECYCLAGE .....	75
IV.4.1.	Origine et nature des déchets .....	76
IV.4.2.	Procédés de recyclage .....	78
IV.4.3.	Part du recyclage dans le cycle .....	79
IV.4.4.	Principaux recycleurs : pays + entreprises.....	80
IV.5.	COURS DU ZINC.....	82
<b>V.</b>	<b>Focus sur l'Union européenne et la France .....</b>	<b>84</b>
<b>VI.</b>	<b>Perspectives.....</b>	<b>85</b>
<b>VII.</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>87</b>

## Liste des figures

Figure 1 – Représentation approximative de la taille des marchés de certains métaux en 2021 en G\$ (source : données USGS, représentation produite par le BRGM).....	24
Figure 2 - Les principaux usages du zinc en 2020 (source ILZSG).....	24
Figure 3 : Principales applications du zinc dans le monde et de la galvanisation à chaud en France en 2020 (source données Teck, Galvazinc Association, représentation BRGM).25	
Figure 4 : Principaux gisements mondiaux de type VMS et SEDEX. Les VMS actuels que sont les fumeurs des zones de rifts ont également été reportés (source : Jébrak et Marcoux 2008).....	27
Figure 5 : Schéma de mise en place d'un gisement de type VMS. (a) Etapes 1 à 4 : naissance et évolution d'un site hydrothermal en amas sulfuré de type VMS à cuivre et zinc. (b) Coupe-type d'un fumeur noir (Source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Hékinian et Fouquet, 1985 ; Edmond et Von Damm, 1983).....	29
Figure 6 : Amas sulfuré de TAG (Trans-Atlantic-Geotraverse). A gauche : carte bathymétrique de la ride médio-atlantique montrant la localisation des différents sites hydrothermaux atlantiques connus dont TAG (Petersen et al., 2000). A droite : vue rapprochée du champ hydrothermal de TAG montrant l'emplacement (i) du monticule actif, (ii) d'autres monticules inactifs de sulfures massifs de fonds marins (texte blanc) et (iii) de zones néo-volcaniques (délimitées en magenta et désignées NV) (Murton et al., 2019).....	30
Figure 7 : A gauche : amas sulfuré actuel de TAG sur la ride médio-Atlantique (source : Jébrak et Marcoux, 2008, d'après Galley et Kosky, 1999). A droite : cheminée sulfurée éteinte hydrothermiquement et altérée de Shinkai Mound (environ 1 m-1,50 m de hauteur ; Murton et al., 2019).....	31
Figure 8 : Minéralisations des amas sulfurés. En haut : fragment de paroi de cheminée (New Mound 2) comprenant de la marcassite (mrc) intimement mêlée à de la sphalérite (sp) et de la pyrite (py). En bas, à gauche : photographie réalisée au microscope en lumière réfléchie (New Mound 2) : marcassite en agrégats radiaux ou collomorphes associée à de la sphalérite dendritique enduit d'une fine couche de silice (Si)	

amorphe ; à droite (Rona Mound) : pyrite framboïdale recouverte par des bandes de marcassite et de sphalérite colloïdales et entourée de sphalérite (Lehrmann et al., 2018).....31

- Figure 9 : Ceinture pyriteuse sud-ibérique (Espagne et Portugal) (en rose pâle) avec la localisation des gisements de type VMS (carrés rouges) dont Neves Corvo et Rio Tinto (Lundin Mining, 2017). .....33
- Figure 10 : Coupe idéalisée d'un amas sulfuré de type VMS et de son stockwerk d'alimentation (source : Jébrak et Marcoux, 2008).....33
- Figure 11 : Sites de genèse et morphologie des gîtes et gisements de type SEDEX. (a) Schéma illustrant la diversité de morphologie et de contexte de dépôt des gisements de type SEDEX. (b) Section idéalisée d'un gisement de type SEDEX montrant une zonalité minéralogique et chimique (source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Large et al., 2001a ; Lydon, 2004 ; Leach et al., 2005).....34
- Figure 12 : Minerai d'argent-plomb-zinc du gisement de Sullivan (Canada) observé au microscope optique polarisant (à gauche) et au microscope à lumière réfléchi (à droite). Les bandes plissées correspondent à la sphalérite et la « matrice » correspond à de la galène argentifère (Lydon, 2004). .....35
- Figure 13 : A gauche : mine à ciel ouvert de Red Dog en Alaska possédant les plus grandes réserves mondiales de zinc (50,9 Mt de minerai dont 12,9 % de Zn). A droite : mine souterraine de Rammelsberg en Allemagne où 30 Mt de minerai ont été extraites (©Stefan Sobotta). .....36
- Figure 14 : Modèle de genèse du type Navan (Irlande), comparé à ceux des gisements de type MVT et SEDEX (source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Kesler et Reich, 2006).36
- Figure 15 : Localisation des gisements de Navan-Tara et de Lisheen en Irlande (Yesares et al., 2019).....37
- Figure 16 : Principaux faciès de l'encaissant et des textures de minéralisation à Tara Deep (Yesares et al., 2019). (a) Sphalérite massive associée à de la galène, de la marcassite, de la barytine et de la calcite. (b) Veines de sphalérite, marcassite et barytine recoupant la micrite. (c) Micrite partiellement remplacée par une alternance de couches de sphalérite et de galène. (d) Conglomérat minéralisé à clastes de micrite où les espaces ouverts sont remplis de sphalérite, marcassite et pyrite. (e) Minéralisation de sphalérite bréchiq ue logée dans des conglomérats. Abréviations : sl : sphalérite ; gn : galène ; mar : marcassite ; ba : barytine ; cal : calcite ; py : pyrite. ....38
- Figure 17 : Images en électrons rétrodiffusés (BSE) réalisées au MEB (a et b) et au microscope optique polarisant (c) du gisement de Tara Deep (a) et de Lisheen (b et c). (a) Cristal de dolomite partiellement rempli et remplacé par de la sphalérite. (b) Sphalérite en remplacement et remplissage des interstices de la pyrite. (c) Sphalérite collomorphe (Yesares et al., 2019). Abréviations : dol : dolomite ; sl : sphalérite ; py : pyrite. ....38
- Figure 18 : Minéralisations associées à des gisements de type MVT. Haut : sphalérite brune (à gauche) et jaune (à droite) remplissant les espaces vides entre les éléments carbonatés de brèches (district de Central Tennessee à gauche et de East Tennessee à droite). En bas : échantillon macroscopique de sphalérite brune associée à de la sphalérite jaune (East Tennessee) (Bonnet, 2014). .....40
- Figure 19 : à gauche : mine de Skorpion en Namibie (Vendanta Zinc International) ; à droite : échantillon de tarbuttite (lamelles blanches) associée à de la smithsonite (couleur bleutée) prélevé dans cette mine (© Fabre Minerals 1996-2020). .....42
- Figure 20 : Gisements non-sulfurés à Zn dans le Haut-Atlas marocain (source : Choulet et al., 2014). .....43
- Figure 21 : Photographies au microscope optique polarisant (Lumière Polarisée Analysée) d'un échantillon de minerai de willémite dans la mine Vazante ; (a) hématite et willémite

remplissant les zones corrodées de la roche hôte altérée en dolomite ferrifère ; (b) willémitite associée à l'hématite (Olivo et al., 2018).....	44
Figure 22 : en haut : le tunnel arc-en-ciel de la mine de Sterling Hill. En bas : échantillon de la mine de Franklin constitué de willémitite, de calcite et de franklinite (noire). Sous une lumière ultraviolette, la calcite apparaît rouge et la willémitite est de couleur verte ; la franklinite n'est pas fluorescente (Minerals.net). ....	45
Figure 23 : Schéma présentant les différents stades de formation d'un skarn. (a) Métamorphisme prograde isochimique. (b) Métasomatisme. (c) Altération hydrothermale rétrograde (Gomes, 2016). ....	45
Figure 24 : Modèle de genèse des porphyres cuprifères, des skarns et des épithermaux (modifié d'après Jébrak et Marcoux, 2008). ....	47
Figure 25 : Répartition des zones riches en Pb-Zn et des zones riches en Au (gisements épithermaux) associées au porphyre cuprifère de Bolcana (Cardon, 2007). ....	48
Figure 26 : Evolution de la production minière de zinc depuis 1984.....	49
Figure 27 : Evolution de la répartition par pays de la production de zinc dans le monde entre 1990 et 2020 (source ILZSG).....	50
Figure 28 : Les 20 plus importantes mines de zinc en 2020 (source S&P Global 2022) .....	51
Figure 29 : Répartition de la production de zinc entre les 10 principales entreprises et leur part dans la production mondiale. ....	52
Figure 30: Schéma d'une étape de flottation d'un concentré suivant la triade « dégrossissage-épuisage-nettoyage ». (Modifié d'après : Sinclair, 2005) .....	53
Figure 31: Schéma simplifié de production de zinc et sous-produits par voie hydrométallurgique (modifié d'après: Deschamp et al., (2002) ; Sinclair (2005) et Hau (2010)) .....	55
Figure 32: Schéma simplifié de production de zinc par voie pyrométallurgique (source : Sinclair (2005)) .....	56
Figure 33 : Evolution de la production métallurgique de zinc depuis 1984 (source données AS3M et ILZSG) .....	57
Figure 34: Évolution de la production de zinc primaire (source : ILZSG 2021).....	58
Figure 35: Répartition de la production de zinc métallique par pays en 2020 (source: ILZSG 2021) .....	58
Figure 36: Capacité et localisation des dix plus grandes fonderies dans le monde (source : ILZSG 2021).....	59
Figure 37: Répartition des coûts de production directs entre les deux types de procédés métallurgiques (source : Sinclair (2005)).....	59
Figure 38: Répartition des revenus de la fonderie Noranda en 2020 (source : Noranda Income Fund (2021)) .....	60
Figure 39 - Définitions des notions de ressources et réserves selon l'approche CRIRSCO.....	63
Figure 40 : Répartition des réserves mondiale de zinc en 2021 par pays (source USGS, 2022).....	64
Figure 41 : Evolution de la production minière, des réserves et années d'épuisement des réserves de zinc (source des données : USGS, 2022). ....	64
Figure 42: Installation minière d'Ozernoye (source : China Nonferrous Metal) .....	66
Figure 43: Camp d'exploration de Dairi Prima Minerals à proximité du village de Sopokomil (source : China Nonferrous Metal) .....	67
Figure 44: Camp d'exploration à Kvanefjeld (source : Greenland Minerals).....	68
Figure 45: Installation de la mine Aripuanã (source : Nexa Resources).....	69

Figure 46: Mine de cuivre à ciel ouvert de Cananea lors de la construction d'une nouvelle unité de concassage (source : Grupo México).....	70
Figure 47: Aperçu des installations minières historiques de Prairie Creek (source : NorZinc) ...	71
Figure 48: Panorama de l'extension nord du gisement de Corani (source: Bear Creek Mining)	72
Figure 49: Futur site de construction des installations de la mine Horne 5 (source : miningweekly.com).....	73
Figure 50: Aperçu des installations minières de Jabali (source : Mondillo et al., 2011).....	74
Figure 51: Usine de traitement des anciennes mines de fer de Varès (source : Adriatic Metals)	75
Figure 52: Schéma représentant le cycle de vie du zinc comprenant sa production, sa transformation, son utilisation, son recyclage et ses pertes (L. Rostek et al., 2022) .....	76
Figure 53: Diagramme de Sankey présentant les flux globaux de zinc entre 2010 et 2019 en kt (L. Rostek et al., 2022) .....	79
Figure 54: Graphique présentant la production secondaire de zinc raffiné par continent et par année entre 2010 et 2021 (source : ILZSG, 2022).....	80
Figure 55: Proportion de la production mondiale de zinc raffiné secondaire par continent (source ILZSG).....	81
Figure 56: Diagramme présentant la part de la production secondaire de zinc raffiné dans le monde par pays en 2021 et tableau correspondant indiquant la quantité de zinc secondaire produite (en kt) par pays en 2021 (source ILZSG). .....	82
Figure 57 - Evolution des stocks et du cours du zinc entre 1960 et 2021.....	83
Figure 58 : Cours du zinc en US\$ par tonne entre 2004 et 2022, moyenne mobile sur 7 jours (source LME).....	83

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Historique de la production minière de zinc en France.....	23
Tableau 2 : Les principaux minéraux du zinc. ....	26
Tableau 3 - Les dix plus gros projets miniers de zinc en phase avancée dans le monde .....	65
Tableau 4 - Les dix plus gros projets miniers de zinc dans le monde .....	65







# **I. Contexte de l'étude**

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2022 n° 2103674907 relative aux ressources minérales, au littoral et aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique, signée le 16 juin 2022 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MTE) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Ce travail a été réalisé par le BRGM avec le soutien financier du MTE.

L'étude envisagée vise à développer la compréhension du marché du zinc, de manière à mieux appréhender sa chaîne d'approvisionnement, en particulier de l'exploration minière à la fabrication de cathodes de zinc, 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 zinc.

## **I.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 très différentes selon les sources.

- **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.).

## **I.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 zinc est relativement complexe et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non.

## **I.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, en particulier l'*International Lead and Zinc Study Group (ILZSG)* et l'*International Zinc Association (IZA)* ;
- la base de données sur les mines et les gisements de S&P Global ;
- les études spécialisées sur le zinc 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 au zinc ;
- 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 zinc.





## II. Introduction

Bien que le zinc soit probablement connu depuis l'Antiquité, le fait qu'il s'oxyde rapidement et qu'il soit relativement cassant explique qu'il n'a pas été utilisé très tôt pour lui-même, à contrario du cuivre par exemple. Même si les archéologues ont retrouvé certains objets contenant des teneurs en zinc élevées, ce n'est réellement qu'au XIII<sup>ème</sup> siècle et avec l'engouement pour le laiton (alliage de cuivre et de zinc), mais également les bronzes (nom générique donné à l'époque à tous les alliages de cuivre, aujourd'hui restreint à l'alliage cuivre-étain) et qui contenaient parfois plus de zinc que d'étain, que le marché du zinc s'est réellement développé. Au XIII<sup>ème</sup> siècle, les fondeurs ne connaissaient pas le zinc sous forme métallique, ils utilisaient un minerai de carbonate de zinc, la calamine. Du XIII<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la demande pour les objets en laiton et en bronze explose, comme le montre le développement des ateliers de fabrication partout en Europe, et notamment en Meuse et en Belgique (D. Bourgarit et N. Thomas, 2012), pour leur couleur ressemblant à celle de l'or (chaudrons, vaisselles, chaudières etc.). Au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les premières véritables fonderies de zinc voient le jour en Europe et utilisent la réduction d'oxyde de zinc à l'abri de l'air, toujours pour la fabrication du laiton.

Après diverses découvertes et inventions techniques (alliages sous pression, composés organométalliques, chauffage à reflux etc.), le zinc est utilisé dans les premières piles voltaïques au début des années 1800 ou comme caractères d'imprimerie (résistance accrue). Mais l'usage qui va vraiment lancer l'industrie du zinc est son utilisation pour la galvanisation ou zincage du fer (électrolyse ou bain liquide). En effet, le fer est très vite corrodé et sa protection par le zinc va permettre son essor à travers de nombreux monuments et ouvrages (halles centrales de Paris, divers théâtres et gares de chemin de fer) au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle. Cet usage représentait toujours en 2020 la moitié de la demande mondiale en zinc.

L'origine du mot zinc est encore incertaine mais pourrait provenir du nom latin « zincum », définit par Paracelse, lui-même inspiré des mots germaniques Zinke ou Zinken, signifiant dent ou pointe acérée, dent et structure fourchée, probablement en référence à l'apparence de la matière fondue après refroidissement, formant des dendrites.

Exploité probablement d'abord en Babylonie, Assyrie ou Palestine, ce n'est véritablement qu'en Inde (XII<sup>ème</sup> siècle) puis en Chine (XVI<sup>ème</sup> siècle) que l'extraction du zinc à partir de sphalérite (sulfure de zinc, ZnS) ou de smithsonite (carbonate de zinc, ZnCO<sub>3</sub>) a commencé. La première exploitation en Amérique du Nord n'a débuté qu'en 1850. Au tout début du XX<sup>ème</sup> siècle, la production était d'environ 740 kt, dont un tiers provenait des États-Unis, un tiers d'Allemagne et 20 % de la Belgique.

La France a été le troisième producteur européen après la Suède et l'Espagne jusqu'à la fermeture en 1991 du gisement de classe mondiale des Malines (Gard, production de Zn supérieure à 1 Mt durant sa durée de vie), exploité par SMMP puis Metaleurop, et ensuite en 1993 de celle du gisement de Noailhac-Saint-Salvy (Tarn, Tableau 1). Trente-cinq mines ont des productions recensées supérieures à 1 000 t métal, incluant une vingtaine de gisements ayant produit plus de 10 000 t métal. Les autres exploitations, dont la production a été de plus de 100 000 t Zn, sont : Saint-Salvy (81) 350 000 t Zn ; Pierrefitte (65) 180 000 t Zn et Les Bormettes (83) 162 000 t Zn.

Gîte	Département	District	Production (t Zn)	Période d'activité
Les Malines	30	Les Malines	1 000 000	2 <sup>ème</sup> s. - 5 <sup>ème</sup> s. ; 11 <sup>ème</sup> s. - 15 <sup>ème</sup> s. ; 1885-1991
Saint-Salvy	81	Montagne Noire	350 000	1975-1993
Pierrefitte	65	Pierrefitte	180 000	1880-1914 ; 1940-1969
Les Bormettes	83	La-Londe-les-Maures - Les Bormettes	162 000	Époque romaine ; 1890-1908
La Croix de Pallières	30	-	80 000	1911-1971
Bentaillou (Sentein)	09	Bosost	75 000	1850-1905 ; 1914-1927 ; 1943-1954
Largentière	07	-	69 000	9 <sup>ème</sup> s. - 15 <sup>ème</sup> s. ; 1856-1885 ; 1943-1954
Figeac	46	Quercy	60 000	1884-1924 ; 1958-1968
La Baume	12	Villefranche de Rouergue	52 000	Moyen-Âge ; 1901
La Rabasse	34	Montagne Noire	48 000	1837-1954
Autres	-	-	329 850	-

Tableau 1 - Historique de la production minière de zinc en France.

Aujourd'hui, le marché du zinc figure parmi les plus gros marchés des métaux, puisqu'il est évalué à environ 36 milliards de dollars, et est donc placé entre le marché de l'argent (9 G\$<sup>1</sup>) et celui du nickel (46 G\$), mais très loin des plus gros marchés que sont le fer (396 G\$), le cuivre (192 G\$), l'or (175 G\$), et l'aluminium (161 G\$) tel que schématisés en Figure 1.

<sup>1</sup> Le terme G\$ (Giga dollar) utilisé dans le rapport signifie milliard de dollars des États-Unis

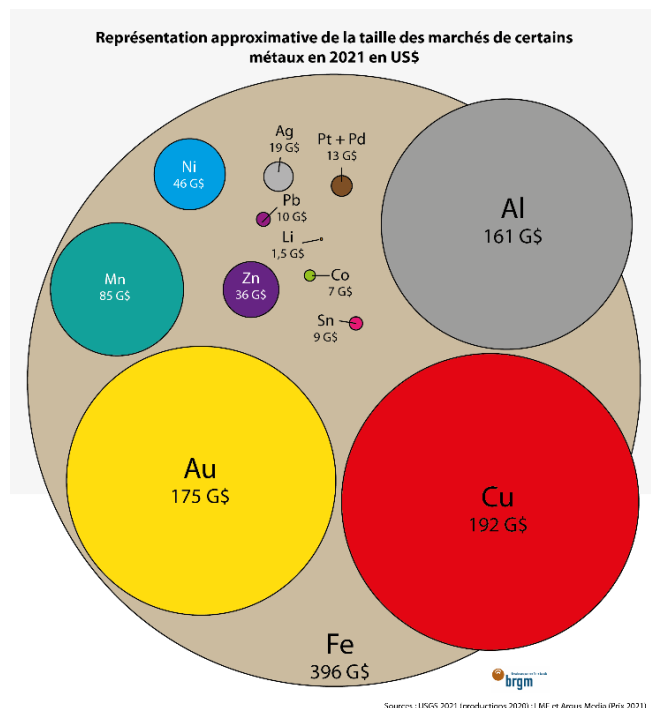


Figure 1 – Représentation approximative de la taille des marchés de certains métaux en 2021 en G\$ (source : données USGS, représentation produite par le BRGM).

Le zinc est au cœur de nos sociétés puisqu'il intervient dans la plupart des secteurs de l'économie mondiale tels que la construction (bâtiments, infrastructures), le transport (pièces automobiles, batteries, alliages), l'industrie et même l'agriculture en tant qu'oligo-élément (Figure 2).

### Les principaux usages du zinc en 2020

(source : ILZSG, 2022)

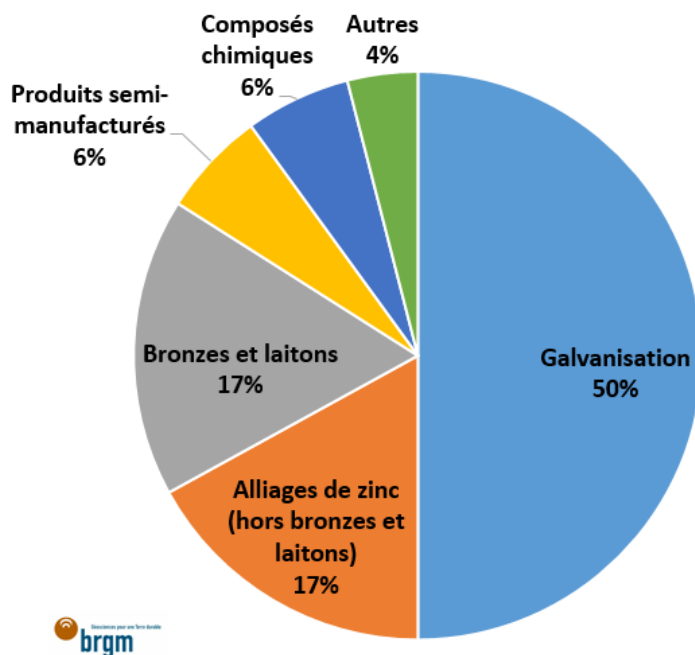
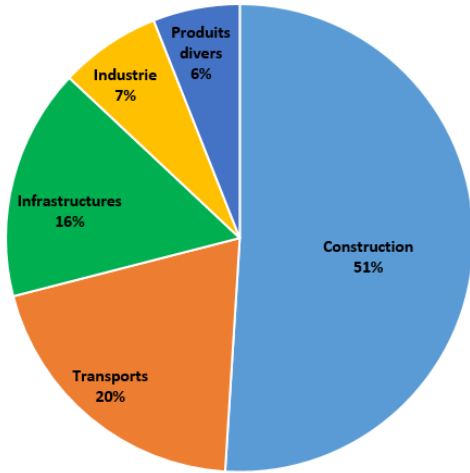


Figure 2 - Les principaux usages du zinc en 2020 (source ILZSG).

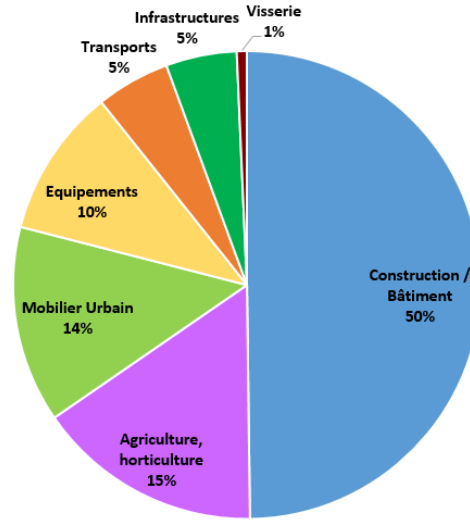


La plupart des analystes prévoient que la demande en zinc va continuer de croître pour tenter de satisfaire à l'évolution démographique. Une hausse de la population mondiale couplée à une hausse des niveaux de vie, en particulier dans les pays émergents, va nécessiter la construction de nouvelles infrastructures, la fabrication de nouveaux équipements, le développement des moyens de transports (Figure 3) etc.

Secteurs d'utilisation du zinc dans le monde en 2020



Secteurs d'utilisation de la galvanisation à chaud en France en 2020



Sources des données : Teck, Galvazinc Association, 2020

Figure 3 : Principales applications du zinc dans le monde et de la galvanisation à chaud en France en 2020 (source données Teck, Galvazinc Association, représentation BRGM).

### III. Quelques fondamentaux sur les gisements de zinc

#### III.1. Le zinc provient de gisements et minerais variés

Le zinc est un métal relativement présent dans la croûte terrestre, son abondance naturelle (Clarke) étant de 60-80 ppm (partie par million, soit 60-80 grammes par tonne). Il est très rare de le trouver à l'état natif mais entre dans la composition de plusieurs espèces minérales dont les plus fréquentes sont les sulfures (sphalérite, anciennement appelée blende : ZnS), puis les oxydes (zincite : ZnO), les carbonates (smithsonite : ZnCO<sub>3</sub>, et autres contenant en outre Cd, As, Fe) et hydrocarbonates, quelques rares silicates (hémimorphite et willémite), phosphates, et smectites (Tableau 2). A noter que la sphalérite, principal minerai du zinc, présente une teneur théorique en zinc de 87 % et représente 95 % de la production minière de zinc.

Familles	Minéraux	Formules chimiques
Zinc natif	Zinc natif	Zn
Sulfures	Sphalérite	ZnS
	Wurtzite	ZnS <sub>1-x</sub>
	Polhemusite	(Zn, Hg)S
Oxyde	Zincite	ZnO
Carbonate	Smithsonite	ZnCO <sub>3</sub>
Hydrocarbonate	Hydrozincite (zinconise)	Zn <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Silicates	Hémimorphite	Zn <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O)
	Willémite	Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Phosphates	Tarbuttite	Zn <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> )(OH)
	Scholzite	CaZn <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 2(H <sub>2</sub> O)
Smectite zincifère	Sauconite	Na <sub>0,3</sub> Zn <sub>3</sub> (SiAl) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O
Autres	Herbertsmithite	ZnCu <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>
	Franklinite	(Zn, Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> )(Fe <sup>3+</sup> , Mn <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

Tableau 2 : Les principaux minéraux du zinc.

Les gisements de zinc sont très largement distribués sur le globe et sont de natures variées. Actuellement, ce sont les gisements liés au volcanisme sous-marin (VMS : amas sulfurés volcanogéniques et SEDEX : sédimentaire exhalatif) ainsi que les gisements sédimentaires de type MVT (Mississippi Valley-Type) qui assurent près de l'intégralité de la production mondiale de zinc (Australie, Chine, Pérou et Canada). Les teneurs moyennes en Pb-Zn varient de 3 à 14 % pour les gisements de type VMS, de 9 à 20% pour les gisements de type SEDEX, de 2 à 6% pour les gisements de type MVT. Les gisements de type VMS et SEDEX ont des tonnages plus importants (supérieures à 4 Mt de minerai) que ceux de type MVT (environ 1 Mt de minerai), bien que moins nombreux par district (Stolojan et Viland, 1991) ; les gisements de type MVT sont souvent regroupés en district ou province et peuvent alors atteindre 10 Mt. Les gisements de type SEDEX et MVT représentent 75% des réserves mondiales (Kyle et Li, 2002).

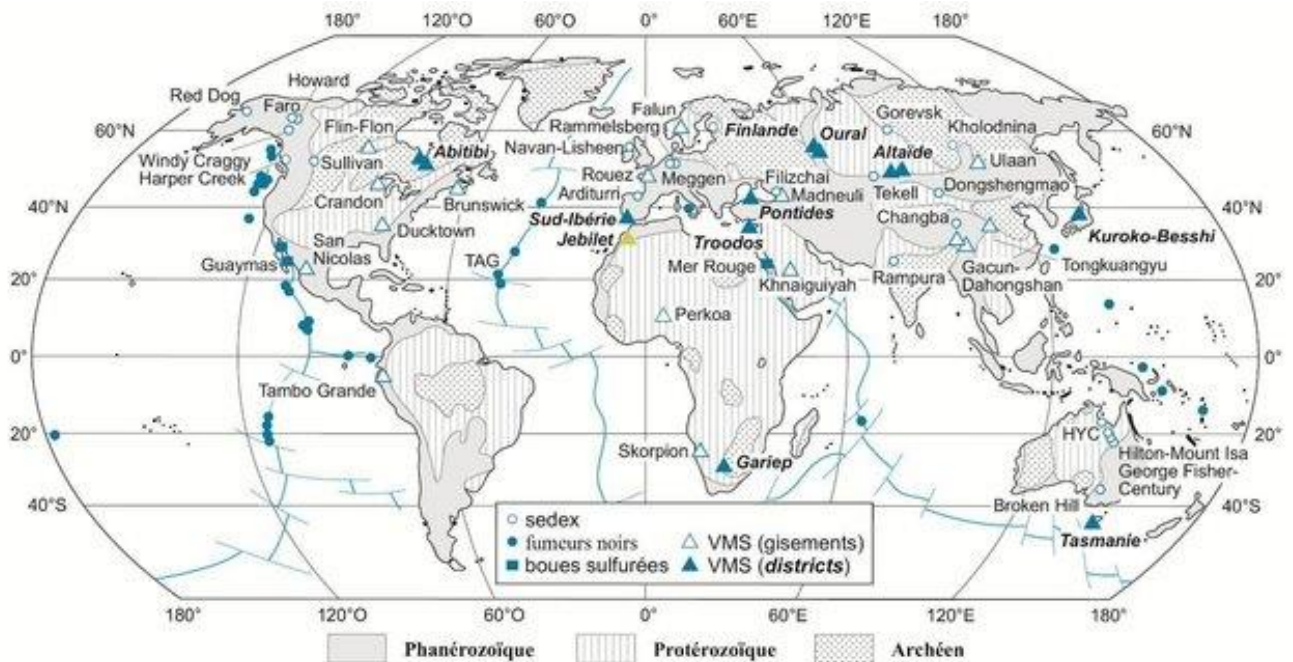
### III.2. Gîtes du volcanisme sous-marin : VMS et SEDEX

Les gîtes liés au volcanisme sous-marin, correspondant à des amas sulfurés exhalatifs<sup>2</sup> polymétalliques, sont les produits de l'hydrothermalisme subaquatique. Ils comportent de nombreux gisements à Cu-Zn, à Zn-Cu-(Pb), à Zn-Pb-Cu, à Pb-Zn, parfois à barytine, tungstène, étain et à métaux précieux (Ag-Au) encaissés dans des roches variées et dans des contextes géodynamiques divers.

Deux grands types de gîtes peuvent être distingués :

- Type volcanosédimentaire associé au volcanisme sous-marin avec les gîtes de **type VMS** (*Volcanic Massive Sulphide*, ou VHMS : *Volcanic-Hosted Massive Sulphide*) connus en français sous le nom d'amas sulfurés volcanogéniques.
- Type exhalatif sédimentaire associé à des roches sédimentaires variées, affectées par des exhalaisons d'origine volcanique avec les gîtes de **type SEDEX** (SEdimentary EXhalative) (Klaue et Large, 1980 ; Leach et al., 2005).

Ces gîtes et gisements se répartissent sur tout le globe (Figure 4) et sont rencontrés de l'Archéen au Miocène. Par exemple, les gisements de Noranda et Sullivan au Canada sont datés de l'Archéen et du Protérozoïque, respectivement. Les gisements de la ceinture sud-ibérique (ex. Neves Corvo au Portugal) sont datés du Paléozoïque alors que celui de Kuroko au Japon, est d'âge Miocène. Cependant, la majorité du stock métal est contenue dans des gisements d'âge antérieur au Carbonifère.



<sup>2</sup> Exhalatif : terme qui s'applique aux gîtes minéraux formés par dépôt des éléments contenus dans les émanations (ou exhalaisons) hydrothermales en contexte sédimentaire. Ces exhalaisons, fréquemment liées à des phénomènes volcaniques, peuvent être à l'origine de concentrations notables en métaux de base.

Les gîtes et gisements de type VMS et SEDEX sont le résultat de manifestations hydrothermales et/ou exhalatives sous-marines contemporaines de la sédimentation, ce qui se traduit par deux géométries de minéralisations :

- Les minéralisations concordantes, les plus fréquentes et les plus importantes économiquement, qui constituent les amas proprement dits. Elles sont généralement stratiformes, rubanées et massives, avec des figures d'instabilité sédimentaire (slumps, brèches).

C'est une morphologie courante dans les gîtes et gisements de type SEDEX. Les minéralisations des gisements de type VMS sont généralement moins étendues et occupent des creux topographiques au pied des appareils volcaniques ou dans les calderas.

- Les minéralisations sécantes, situées au mur des amas (griffons hydrothermaux, stockwerks<sup>3</sup>, disséminations, pipes).

Elles sont souvent assez nettes dans les gîtes et gisements de type VMS alors qu'elles restent diffuses ou mal exprimées dans les gîtes et gisements de type SEDEX.

Ces deux types de minéralisations sont souvent associés au sein d'un même gîte/gisement.

### **III.2.1. Amas sulfurés volcanogéniques (VMS)**

Les amas sulfurés volcanogéniques (VMS) se forment en lien avec le volcanisme sous-marin, le long d'une dorsale océanique ou sur les flancs de celle-ci (de quelques km à 1 000 km). Ils résultent de la convection hydrothermale induite par le magmatisme (Figure 5). De manière générale, ces gisements sont composés d'un corps stratiforme sulfuré et d'un réseau de veines sulfurées (stockwerk). Le dépôt des sulfures correspond à une période d'arrêt ou de ralentissement de l'activité volcanique. En plus du zinc, les VMS fournissent du cuivre, du plomb et des métaux précieux comme l'or ou l'argent et parfois de l'étain ou du tungstène (Dill, 2010).

---

<sup>3</sup> Stockwerk : réseau dense de filonnets s'entrecroisant dans toutes les directions et constituant le chemin d'accès des fluides hydrothermaux. Bien que ce mot ne porte aucune signification minéralogique ou pétrologique, les stockwerks sont généralement composés de filonnets de quartz à sulfures, avec de la tourmaline et/ou des carbonates (Jébrak et Marcoux, 2008).

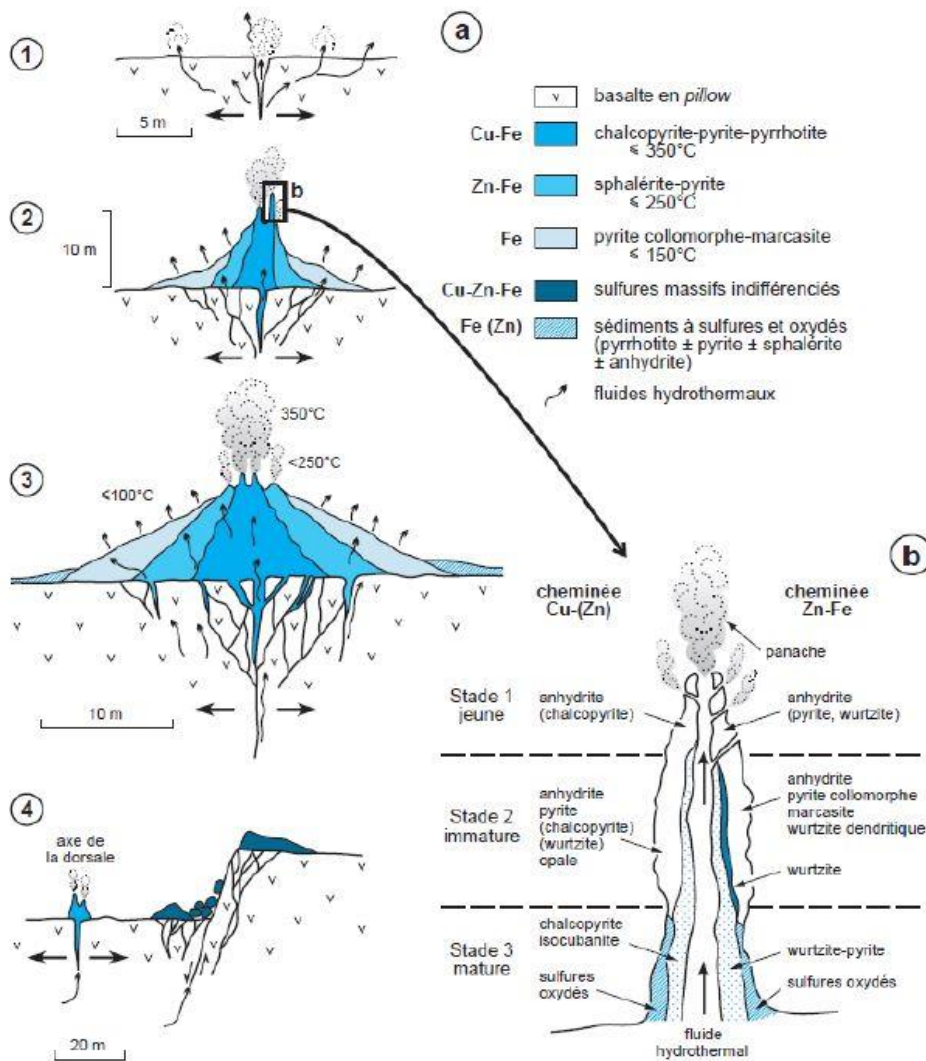


Figure 5 : Schéma de mise en place d'un gisement de type VMS. (a) Etapes 1 à 4 : naissance et évolution d'un site hydrothermal en amas sulfuré de type VMS à cuivre et zinc. (b) Coupe-type d'un fumeur noir (Source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Hékinian et Fouquet, 1985 ; Edmond et Von Damm, 1983).

Les VMS se sont formés tout au long des temps géologiques, de l'Archéen à l'époque moderne. Ils sont situés dans le monde entier et leur taille est variable (de négligeable à géante). Au regard de la composition de la série volcanique et du contexte géodynamique, trois types de VMS peuvent être distingués.

#### a) Amas sulfurés à cuivre-zinc (volcanisme mafique)

Les gisements associés à un volcanisme mafique sont situés au niveau de zones d'accrétion de rifts ou d'arrière-arcs intra-océaniques primitifs, fossiles (ophiolites) ou actuels. Il s'agit de petits gisements à cuivre et zinc dominants, mis en place sous une tranche d'eau profonde et formés sur la croûte océanique. Le tonnage moyen des amas est assez modeste, de l'ordre de 2 Mt. Ces gisements sont reconnus presque exclusivement au Phanérozoïque. Il s'agit de gisements de type Chypre, appellation donnée en raison du complexe ophiolitique du Troodos sur l'île de Chypre. 25 des 200 séquences ophiolitiques connues dans le monde contiennent des amas

d'ordre économique. Les amas apparaissent au sommet des séquences ophiolitiques mais sont recouverts par d'autres coulées volcaniques ou par des sédiments (Galley et Koski, 1999).

Le plus important gisement de type VMS, lié à un volcanisme mafique, est l'amas sulfuré actuel de TAG (Trans-Atlantic-Geotraverse), situé sur la ride médio-Atlantique nord (Figure 6), à 3600 m de profondeur. Galley et Kosky (1999) ont estimé un tonnage de 30 Mt de sulfures @ 4,9% Cu et 6,5% Zn.

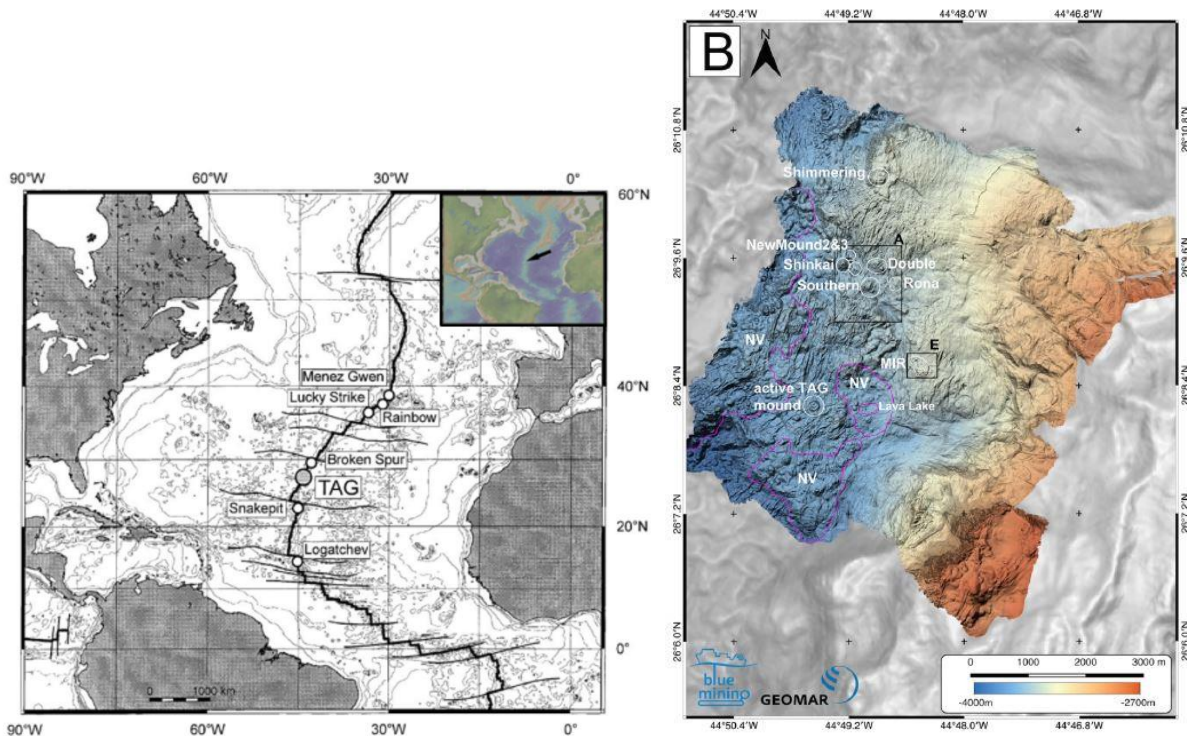


Figure 6 : Amas sulfuré de TAG (Trans-Atlantic-Geotraverse). A gauche : carte bathymétrique de la ride médio-atlantique montrant la localisation des différents sites hydrothermaux atlantiques connus dont TAG (Petersen et al., 2000). A droite : vue rapprochée du champ hydrothermal de TAG montrant l'emplacement (i) du monticule actif, (ii) d'autres monticules inactifs de sulfures massifs de fonds marins (texte blanc) et (iii) de zones néo-volcaniques (délimitées en magenta et désignées NV) (Murton et al., 2019).

Les gîtes et gisements actuels montrent de spectaculaires cheminées hydrothermales (Figure 7) :

- Les fumeurs noirs expulsent des particules sulfurées qui vont chuter, s'accumuler et être reprises par des fluides hydrothermaux avant d'aboutir à la formation d'amas sulfurés (pyrite, marcassite, wurtzite, sphalérite, chalcopryrite et bornite) et d'anhydrite.
- Les fumeurs blancs rejettent des sulfates (barytine) et des silicates (opale).

Les gîtes et gisements anciens montrent de petites cheminées (Figure 7), mais surtout une allure de cuvette avec des minerais massifs à la base et des minerais collomorphes et bréchiques au sommet. Ces minerais sont notamment composés par l'association pyrite-chalcopryrite-sphalérite ( $\pm$  magnétite) (Figure 8). Ces gîtes et gisements ne présentent pas de dépôt d'anhydrite mais des niveaux de chert rouge hématitisé (Galley et Koski, 1999).

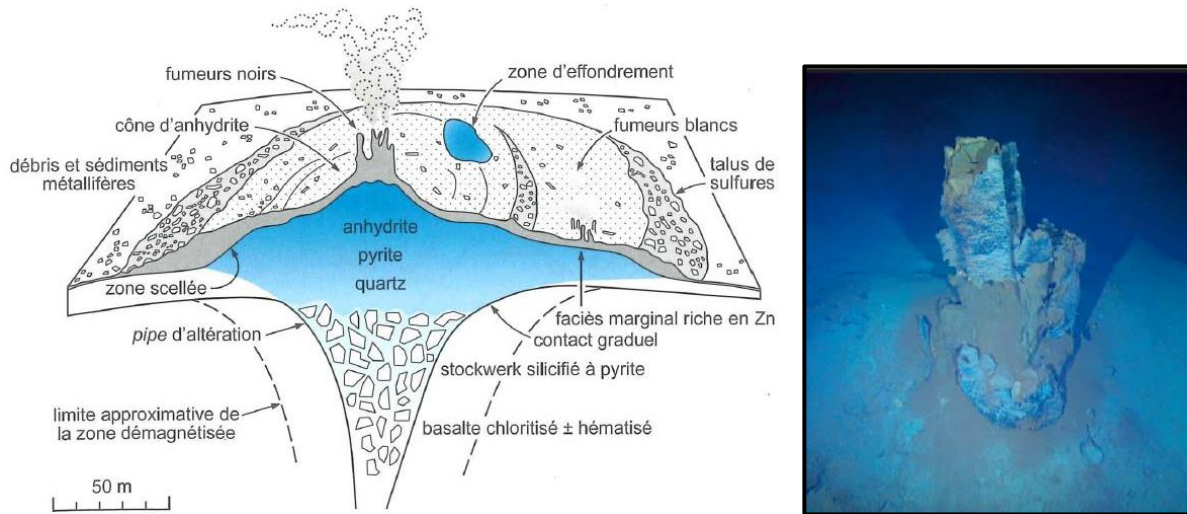


Figure 7 : A gauche : amas sulfuré actuel de TAG sur la ride médio-Atlantique (source : Jébrak et Marcoux, 2008, d'après Galley et Kosky, 1999). A droite : cheminée sulfurée éteinte hydrothermiquement et altérée de Shinkai Mound (environ 1 m-1,50 m de hauteur ; Murton et al., 2019).

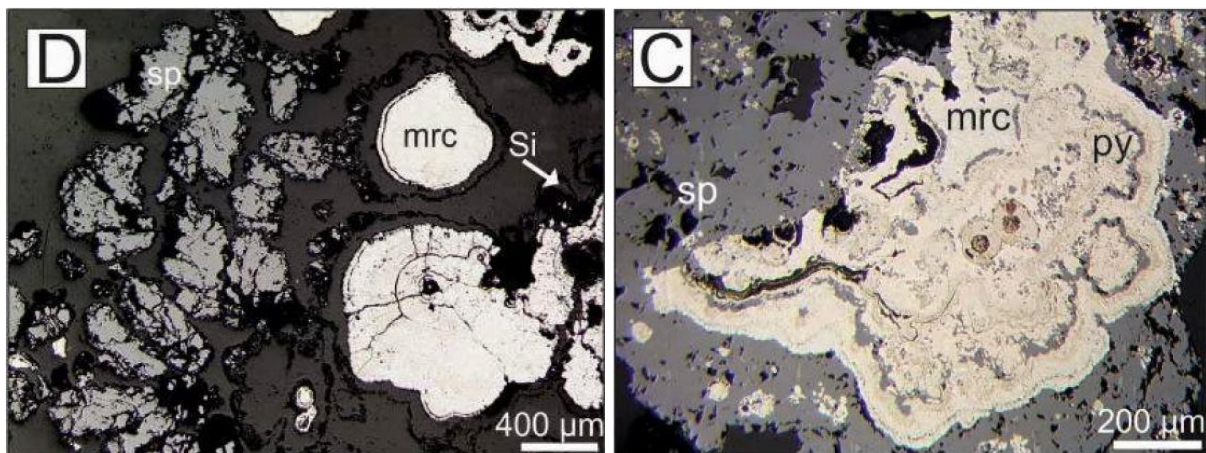
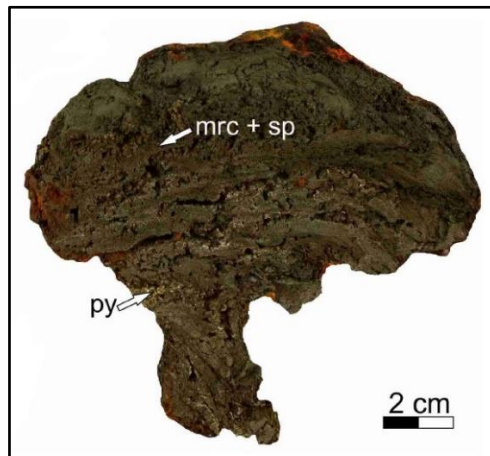


Figure 8 : Minéralisations des amas sulfurés. En haut : fragment de paroi de cheminée (New Mound 2) comprenant de la marcassite (mrc) intimement mêlée à de la sphalérite (sp) et de la pyrite (py). En bas, à gauche : photographie réalisée au microscope en lumière réfléchi (New Mound 2) : marcassite en

*agrégats radiaux ou collomorphes associée à de la sphalérite dendritique enduit d'une fine couche de silice (Si) amorphe ; à droite (Rona Mound) : pyrite framboïdale recouverte par des bandes de marcassite et de sphalérite colloïdales et entourée de sphalérite (Lehrmann et al., 2018).*

### **b) Amas sulfurés à zinc-cuivre-(plomb) (volcanisme bimodal et felsique)**

Les gîtes et gisements associés au volcanisme bimodal et felsique sont parmi les plus importantes concentrations de sulfures massifs dans le monde. Ils sont reconnus depuis l'Archéen jusqu'à l'époque actuelle.

Ces gîtes et gisements apparaissent dans tous les contextes de volcanisme sous-marin, en particulier les arcs insulaires et plus généralement, les arcs de marge active ou les bassins d'arrière-arc. Leur profondeur de mise en place est très variable. Suivant la nature des roches volcaniques sous-jacentes, deux grands types de gîtes et gisements peuvent être distingués :

- **Les gîtes et gisements à cuivre et zinc associés à un volcanisme bimodal**, qui marquent un contexte d'arc insulaire primitif ou d'arrière-arc océan-continent. Deux sous-types se distinguent :
  - Celui associé à un volcanisme mafique dominant (basalte) mis en place à assez grande profondeur (plus de 500 m), dans des grabens, à l'intersection avec des failles synvolcaniques. Il s'agit du type Noranda à Cu-Zn. Noranda est un district archéen situé en Abitibi (Canada) qui comprend plus d'une dizaine d'amas sulfurés et près de 200 mines qui ont produit et produisent encore du cuivre et de l'or mais également du zinc, de l'argent, du fer, du molybdène, du nickel, de l'étain, du bismuth, du lithium, etc.
  - Celui associé à un volcanisme felsique dominant (rhyolite) associé à des dômes felsiques mis en place au voisinage de la surface. Il s'agit du type Kuroko à Zn-Cu-(Pb) (Franklin et al., 2005). A titre d'exemple, la mine souterraine et active de Neves Corvo au sud du Portugal correspond à un des gisements les plus importants (environ 220 Mt et 1,41 % Zn) de la ceinture pyriteuse sud-ibérique (Espagne et Portugal) (Figure 9), cette dernière étant la plus importante province mondiale d'amas sulfurés (plus de 1,8 Gt de sulfures).
- **Les gisements associés à un volcanisme felsique** et à une abondante sédimentation riche en silicates, se rencontrent dans les arrière-arcs océan-continent, ou en position intra-arc. Il s'agit du type Rio Tinto à Zn-Pb-Cu. L'ancienne mine à ciel ouvert de Rio Tinto, en Espagne (Figure 9), correspond également à un des gisements les plus importants (335 Mt et 0,34 % Zn) de la ceinture pyriteuse sud-ibérique.



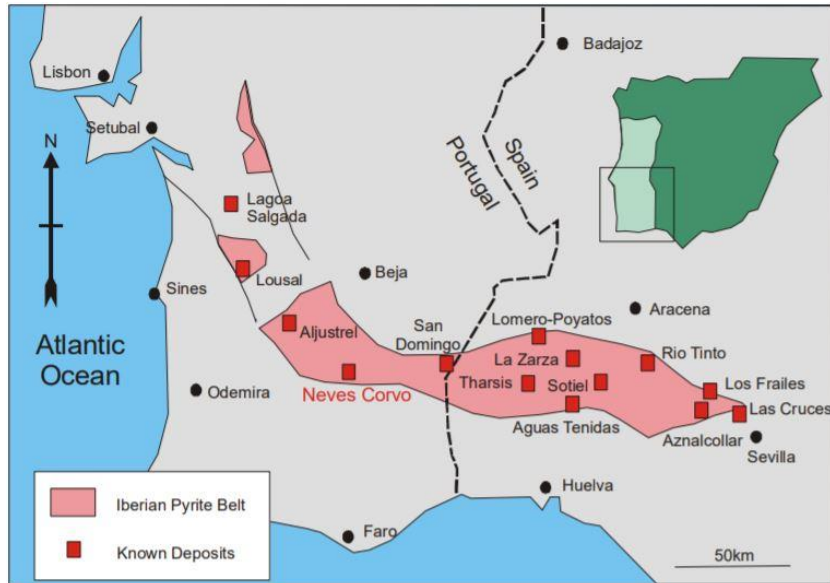


Figure 9 : Ceinture pyriteuse sud-ibérique (Espagne et Portugal) (en rose pâle) avec la localisation des gisements de type VMS (carrés rouges) dont Neves Corvo et Rio Tinto (Lundin Mining, 2017).

L'amas sulfuré enraciné sur son stockwerk est concordant et de forme lenticulaire. Il forme une galette, parfois un champignon en relief, pouvant atteindre un diamètre de quelques centaines de mètres, sur la surface des volcanites (Figure 10). Le minerai massif montre fréquemment une zonalité avec de la chalcopryrite et de la pyrite ou de la pyrrhotite à la base, et un minerai plus lité à pyrite, sphalérite et galène au sommet, passant à des sédiments parfois graphiteux.

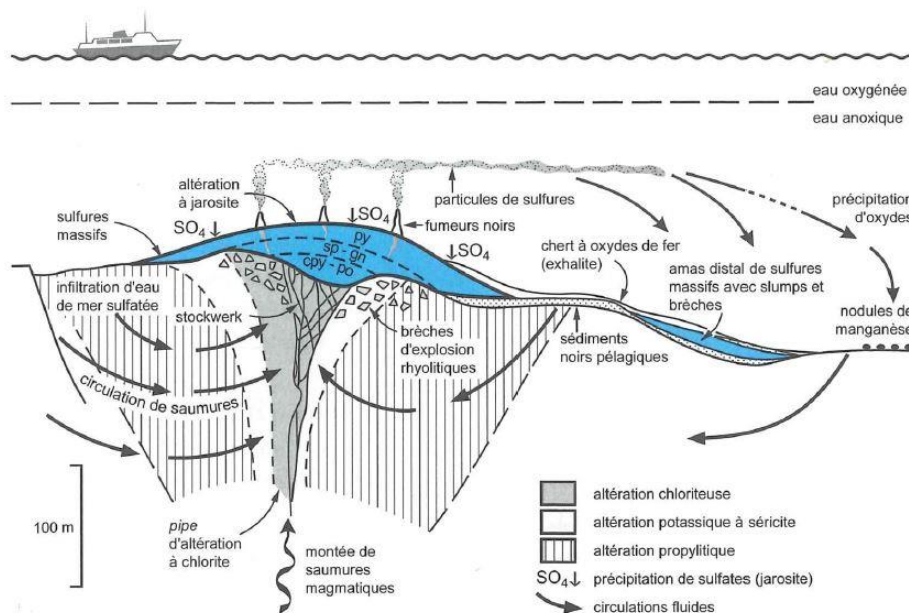


Figure 10 : Coupe idéalisée d'un amas sulfuré de type VMS et de son stockwerk d'alimentation (source : Jébrak et Marcoux, 2008)

La pyrite est de loin le sulfure le plus abondant (de 50 à 98% des sulfures), suivie par la sphalérite, la chalcopryrite, et la galène. Ces quatre sulfures composent la quasi-totalité des sulfures des

amas. La gangue est présente en quantité variable selon les amas et se compose généralement de quartz, fréquemment de sulfates (barytine, gypse), de chlorite et de carbonates.

### III.2.2. SEDEX (SEDimentary EXhalative)

Comme les gîtes et gisements de type VMS, ceux de type SEDEX (« SEDimentary EXhalative ») se forment à proximité d'édifices volcaniques sous-marins. La genèse se fait par précipitation, dans l'eau de mer, des métaux contenus dans les fluides hydrothermaux, puis leur sédimentation sous la forme de minéraux métalliques sur le plancher océanique. Ces minéraux sont associés à des sédiments clastiques ou carbonatés, des évaporites, des grès, ou des argiles noires (ces dernières sont les plus répandues) qui vont constituer leur encaissant (avec parfois aussi des roches volcaniques mafiques ; Stoiljan et Viland, 1991). Le volcanisme y est toujours discret, parfois absent. Les figures d'instabilité synsédimentaires (brèches d'écoulement, slumps) sont fréquentes.

Les gîtes et gisements de type SEDEX sont généralement situés dans des grands bassins sédimentaires d'une puissance allant de 3 à 7 km (Figure 11), au niveau de marges continentales instables (se rapprochant du domaine des gîtes et gisements de type VMS) ou le plus souvent au niveau de bassins intracontinentaux en extension (se rapprochant du domaine des gîtes et gisements de type MVT ; Stoiljan et Viland, 1991). Ils sont le plus souvent associés à des systèmes de failles normales syngénétiques et synsédimentaires (Large et al., 2001a ; Leach et al., 2005 ; Jébrak et Marcoux, 2008).

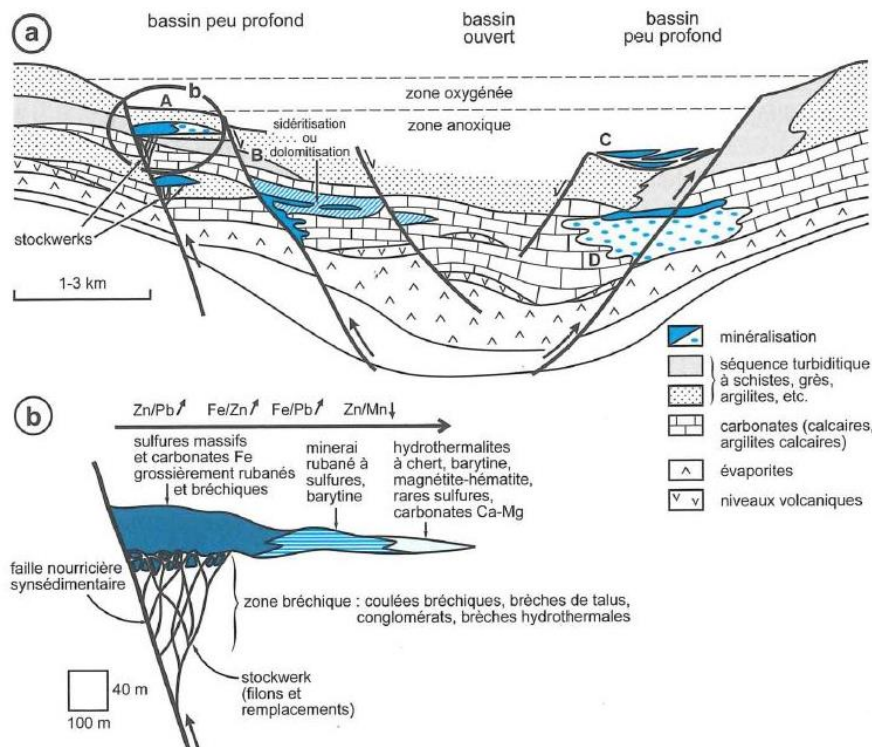


Figure 11 : Sites de genèse et morphologie des gîtes et gisements de type SEDEX. (a) Schéma illustrant la diversité de morphologie et de contexte de dépôt des gisements de type SEDEX. (b) Section idéalisée d'un gisement de type SEDEX montrant une zonalité minéralogique et chimique (source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Large et al., 2001a ; Lydon, 2004 ; Leach et al., 2005).

Les gîtes et gisements de type SEDEX sont reconnus à toutes les époques géologiques et dans tous les faciès métamorphiques, mais ils sont plus particulièrement rencontrés au Protérozoïque et au Paléozoïque (Dévonien) et disparaissent quasiment après le Carbonifère. L'apparition des gisements de type SEDEX coïncide avec l'augmentation de la concentration en soufre de l'océan à la fin du Paléoproterozoïque (Sangster, 1990 ; Lyons et *al.*, 2006).

L'association minéralogique classique des gisements de type SEDEX comprend des sulfures, des carbonates (calcite, sidérite, dolomite, ankérite), de la barytine, et du quartz en proportions très variables. Les sulfures constituant la minéralisation sont représentés par la pyrite ( $\text{FeS}_2$ , rare à dominante), la sphalérite ( $\text{ZnS}$ ) habituellement dominante sur la galène ( $\text{PbS}$ ) (Figure 12), la pyrrhotite ( $\text{FeS}$ , surtout dans les amas protérozoïques), la tétraédrite ( $(\text{Cu, Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ), les sulfures et sulfosels d'argent, et parfois la chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et l'arsénopyrite ( $\text{FeAsS}$ ) (Leach et *al.*, 2005). Ces minéraux, présents au sein de petits amas sulfurés stratiformes (rubanés et massifs), montrent un litage marqué et dessinent une zonation Cu-Pb-Zn-(Ba) à partir de la zone de stockwerk.

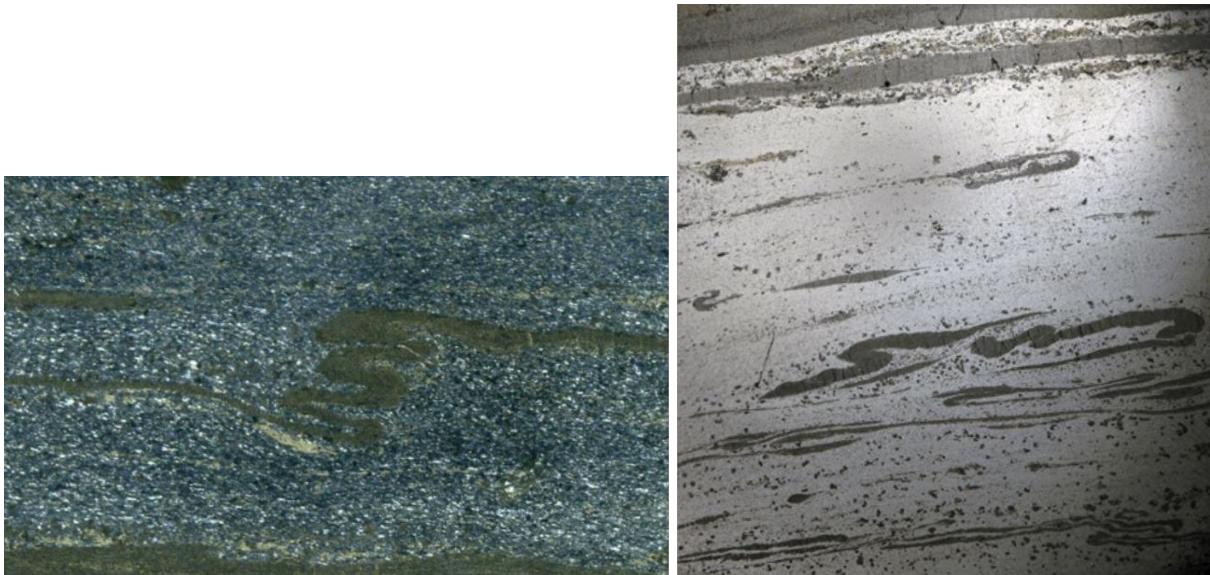


Figure 12 : Minerai d'argent-plomb-zinc du gisement de Sullivan (Canada) observé au microscope optique polarisant (à gauche) et au microscope à lumière réfléchie (à droite). Les bandes plissées correspondent à la sphalérite et la « matrice » correspond à de la galène argentifère (Lydon, 2004).

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 que, parfois, pour l'or, le cadmium, le cobalt, et l'antimoine en tant que sous-produits) (Leach et *al.*, 2005). Du germanium en quantité notable est également présent dans ce type de gisement ; c'est le cas du gisement géant de Red Dog en Alaska (voir les références dans Christmann et *al.*, 2011). Les tonnages métal sont élevés allant de quelques millions à plusieurs dizaines de millions de tonnes (Christmann et *al.*, 2011).

Quelques exemples types de ces gisements sont : Broken Hill et Mount Isa en Australie, Sullivan au Canada, Red Dog en Alaska et Rammelsberg en Allemagne (Figure 13) ; ils contiennent entre 10 et 50 Mt de Pb-Zn.



Figure 13 : A gauche : mine à ciel ouvert de Red Dog en Alaska possédant les plus grandes réserves mondiales de zinc (50,9 Mt de minerai dont 12,9 % de Zn). A droite : mine souterraine de Rammelsberg en Allemagne où 30 Mt de minerai ont été extraites (©Stefan Sobotta).

Les SEDEX peuvent présenter des gisements de plomb-zinc de classe mondiale, recelant parfois plus de 150 Mt de minerai comme Mount Isa (Australie) (Goodfellow et al., 1993 ; McGoldrick et al., 1998). En France, des occurrences de type SEDEX dans l'Ordovicien et le Dévonien des Pyrénées (Pierrefitte) sont connues (Stolojan et Viland, 1991).

### Variantes de SEDEX

Il existe de nombreuses variantes de ces gisements, suivant la nature de la minéralisation et de l'encaissant. Parmi les plus importantes, figurent les gisements de Pb-Zn-Ag-Ba de type irlandais, pouvant être considérés comme des intermédiaires entre les SEDEX typiques et les gisements de type MVT (Figure 14).

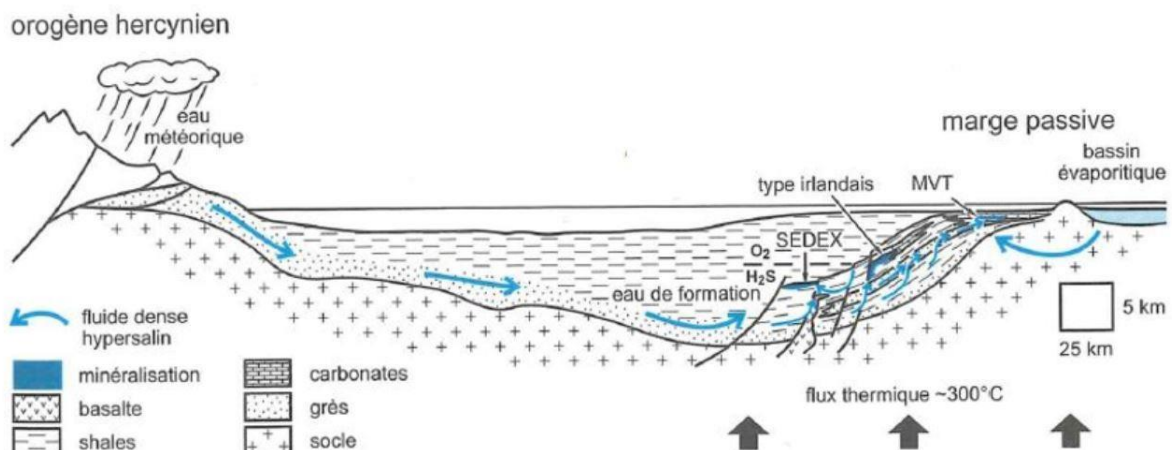


Figure 14 : Modèle de genèse du type Navan (Irlande), comparé à ceux des gisements de type MVT et SEDEX (source : Jébrak et Marcoux, 2008 ; d'après Kesler et Reich, 2006).

Les gisements irlandais constituent l'une des provinces minières majeures en Europe, avec plusieurs gisements importants (Navan-Tara, Galmoy, Lisheen, Tynagh ; Figure 15). Navan-Tara est le plus important gisement de plomb-zinc en milieu carbonaté du monde (Leach et al., 2005) et correspond à la plus importante mine de zinc en Europe avec 70 Mt de minerai @ 10,1% Zn et 2,6% Pb (www.boliden.com). Les minéralisations sont encaissées dans les carbonates

constituant une large plateforme et se sont mises en place vers 150 m de profondeur sous le fond marin. Elles sont concordantes avec la stratification, bien qu'elles soient associées à des failles normales qui basculent les blocs et auraient servi de drains. Des brèches se développent au droit de ces failles et renferment le minerai.

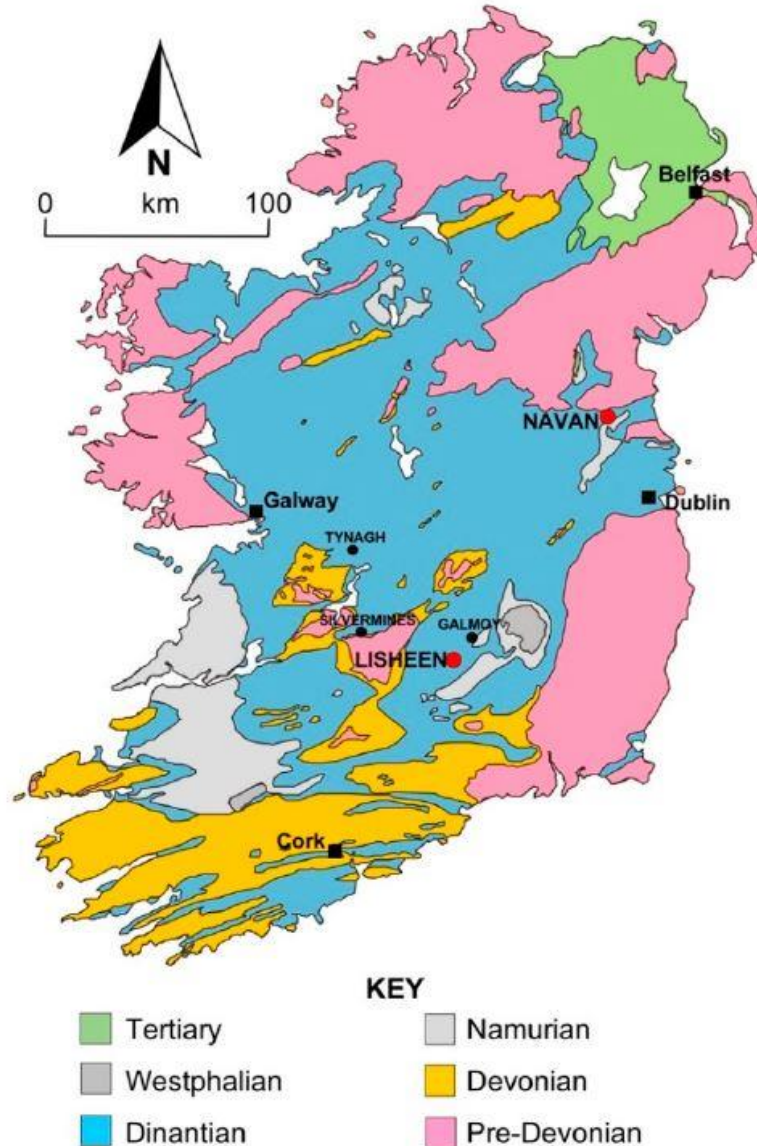


Figure 15 : Localisation des gisements de Navan-Tara et de Lisheen en Irlande (Yesares et al., 2019).

La sphalérite, porteuse du zinc, est le sulfure dominant dans ces gisements (avant la galène et la pyrite). Elle est présente en remplissage d'interstices, en remplacement (de pyrite et de dolomite notamment) et dans des veinules. Elle se présente soit sous forme d'agrégats, soit sous forme collomorphe (Figure 16a à 16c et Figure 17) et est souvent associée à de la dolomite. Une seconde génération de sphalérite est également identifiée en remplissage tardif, dans des brèches et des conglomérats minéralisés (Figure 16d et 16e).

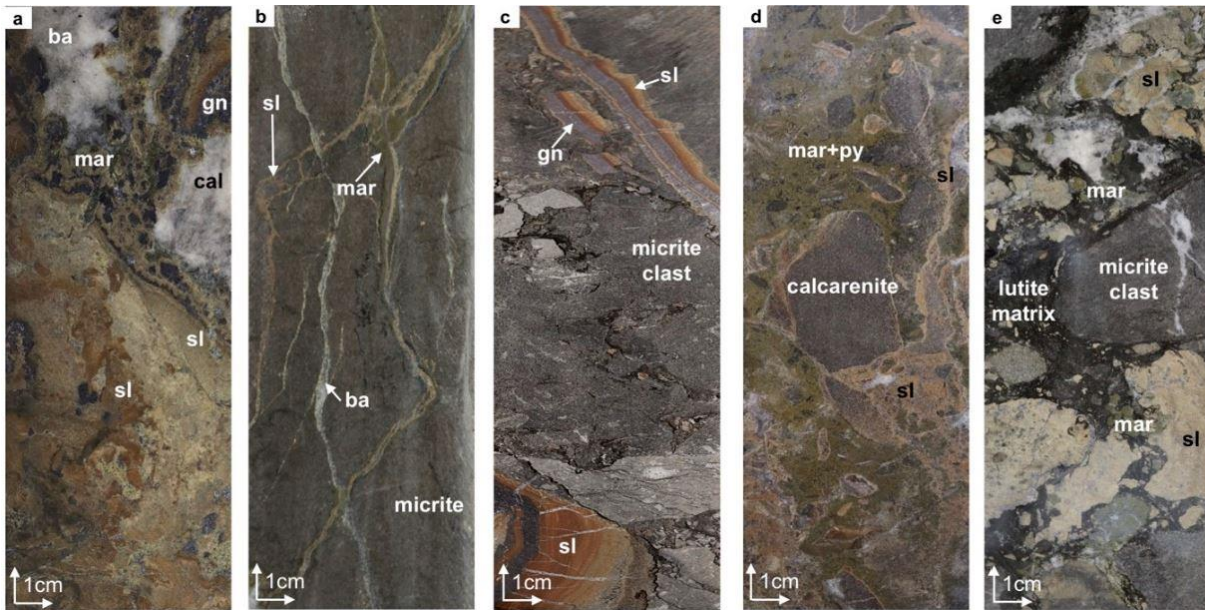


Figure 16 : Principaux faciès de l'encaissant et des textures de minéralisation à Tara Deep (Yesares et al., 2019). (a) Sphalérite massive associée à de la galène, de la marcassite, de la barytine et de la calcite. (b) Veines de sphalérite, marcassite et barytine recoupant la micrite. (c) Micrite partiellement remplacée par une alternance de couches de sphalérite et de galène. (d) Conglomérat minéralisé à clastes de micrite où les espaces ouverts sont remplis de sphalérite, marcassite et pyrite. (e) Minéralisation de sphalérite bréchique logée dans des conglomérats. Abréviations : sl : sphalérite ; gn : galène ; mar : marcassite ; ba : barytine ; cal : calcite ; py : pyrite.

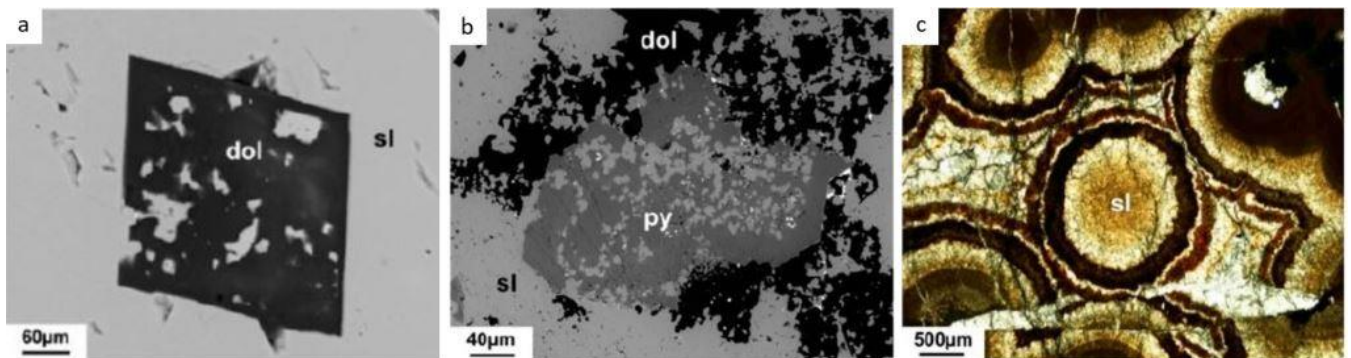


Figure 17 : Images en électrons rétrodiffusés (BSE) réalisées au MEB (a et b) et au microscope optique polarisant (c) du gisement de Tara Deep (a) et de Lisheen (b et c). (a) Cristal de dolomite partiellement rempli et remplacé par de la sphalérite. (b) Sphalérite en remplacement et remplissage des interstices de la pyrite. (c) Sphalérite collomorphe (Yesares et al., 2019). Abréviations : dol : dolomite ; sl : sphalérite ; py : pyrite.

### III.3. Gîtes diagénétiques en contexte de plateforme carbonatée : type MVT

Les gîtes et gisements de type MVT (Mississippi Valley-Type) sont proches des gisements de type SEDEX en termes de minéralogie, de tonnage, de genèse et de modalités de dépôt. Ils se forment tous les deux à des températures plus basses que les gîtes et gisements de type VMS qui sont directement liés à l'activité volcanique (Leach et al., 2005). La différence essentielle entre ces deux types de gisement semble être le milieu de dépôt correspondant à une plateforme continentale carbonatée (stable même si les bordures peuvent être relativement instables) pour les gisements de type MVT, avec un encaissant strictement sédimentaire et correspondant

généralement à des dolomies. La distinction entre les gisements de type MVT et ceux de type SEDEX est parfois très délicate et certains gisements, comme ceux d'Irlande, présentent des caractères hybrides (Jébrak et Marcoux, 2008).

Les gisements de type MVT correspondent à des gisements épigénétiques<sup>4</sup> de sulfures massifs en contexte strictement sédimentaire, essentiellement carbonaté et/ou dolomitique (voire détritique - grès), sans liaison avec des manifestations magmatiques. Ce type de gisement est particulièrement bien représenté dans la vallée du Mississippi, d'où son nom *Mississippi Valley-Type*.

Les principaux gîtes et gisements sont connus depuis le Protérozoïque, mais ils apparaissent souvent au Paléozoïque inférieur.

La paragenèse des gisements de type MVT est la suivante : sphalérite (souvent collomorphe), galène, pyrite, marcassite ( $\pm$  chalcopyrite) mais également dolomite, calcite, accessoirement quartz, fluorine, barytine (ces cinq derniers minéraux constituant la gangue). On rencontre également la pyrrhotite, la célestite ( $\text{SrSO}_4$ ), l'anhydrite, le gypse, le soufre et le bitume plutôt tardifs. L'argent est peu abondant, mais des métaux (cadmium, indium, gallium, germanium) sont parfois concentrés dans la sphalérite (Paradis et *al.*, 2007 ; Bonnet, 2014).

Ces gisements produisent une part importante de plomb et de zinc. Le type MVT représente près de 30 % des ressources mondiales de Pb-Zn. Les gisements ont des tonnages modestes, autour de 1 Mt métal en moyenne. Or, les districts regroupent plusieurs gisements et peuvent atteindre les 10 Mt métal. Les teneurs moyennes des principaux gisements varient entre 2 et 6 % Zn (max. 16 %) et entre 1 et 3% Pb. Le zinc est généralement plus abondant que le plomb, exception faite pour les gîtes et gisements en milieu détritique (Stolojan et Viland, 1991).

Les gisements de type MVT du centre et de l'est du Tennessee (à l'est de la vallée du Mississippi, Etats-Unis) renferment des réserves importantes de zinc sous forme de sphalérite massive ou présente au sein de brèches (Figure 18).

---

<sup>4</sup> Epigénétique : désigne un gîte ou un gisement plus récent que la formation qui le porte.

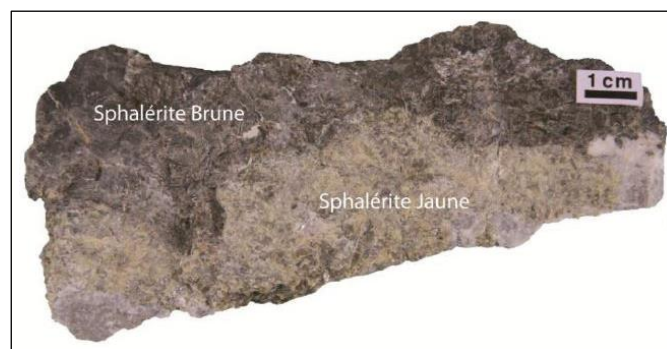
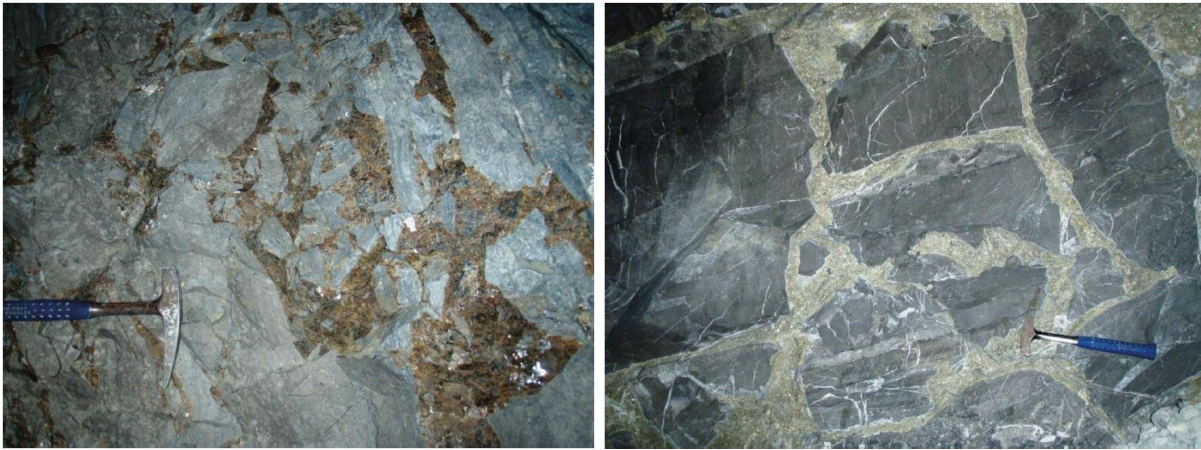


Figure 18 : Minéralisations associées à des gisements de type MVT. Haut : sphalérite brune (à gauche) et jaune (à droite) remplissant les espaces vides entre les éléments carbonatés de brèches (district de Central Tennessee à gauche et de East Tennessee à droite). En bas : échantillon macroscopique de sphalérite brune associée à de la sphalérite jaune (East Tennessee) (Bonnet, 2014).

En France, des occurrences de type MVT sont reconnues sur la plateforme carbonatée cambrienne au sud du Massif central (Montagne Noire, Cévennes). Il s'agit du gisement de Largentière associé à des dépôts détritiques (Stolojan et Viland, 1991).

### III.4. Gîtes profonds en contexte ductile-cassant : les filons à plomb-zinc

Les structures ductiles et fragiles renferment de nombreuses minéralisations formées à des profondeurs variant entre 5 et 20 km. Ce type de structure filonienne apparaît dans des ceintures orogéniques, notamment dans les zones externes peu métamorphiques. Ces filons sont associés à de grandes zones de cisaillement, et plus rarement, à des structures en extension. Ils correspondent à des structures sécantes souvent associées à des amas parfois sub-concordants : amas de substitution (ex. : « mantos » du Mexique). L'encaissant est de nature clastique, à shales et grès, plus rarement carbonaté (Jébrak et Marcoux, 2008). Les gisements filoniens sont liés de près ou de loin à des intrusions felsiques et mafiques. Pour les filons à Pb-Zn, les températures de dépôt sont estimées entre 200 et 325°C.

Ces gisements se forment à des périodes géologiques correspondant à l'âge des ceintures orogéniques où ils se trouvent. Suivant l'âge de ces ceintures, le niveau d'érosion sera différent : les gisements les mieux représentés sont ceux des chaînes récentes (andines et alpines) car moins érodées, puis ceux de la chaîne varisque, et plus rarement, ceux des chaînes précambriennes, car plus largement érodées (Stolojan et Viland, 1991).



Deux types d'association minéralogique sont observés. La première association, d'assez haute température, comprend pyrrhotite, arsénopyrite, sphalérite et galène (parfois magnétite) dans une gangue de quartz. La seconde comprend principalement sphalérite, galène, chalcopryrite (accessoire), minéraux d'argent, dans une gangue de quartz, sidérite, et autres carbonates ; la barytine est tardive. L'argent est presque toujours un élément valorisant et parfois majeur dans ce type de gisement (ex. : Pérou, Bolivie).

Les gisements de filons à Pb-Zn sont beaucoup plus nombreux mais souvent plus petits que ceux de type VMS, SEDEX et MVT. Ils n'atteignent en effet que très rarement 1 Mt métal (Pb-Zn) et de très nombreuses mines n'ont produit que quelques dizaines de milliers de tonnes métal. Les districts qui regroupent un grand nombre de filons peuvent atteindre 5 à 6 Mt métal (ex. : district varisque de Freiberg, en Allemagne). En France, a été identifiée dans le socle varisque plus d'une trentaine de gisements notables de ce type, dont Saint-Salvy, le plus important, qui contenait environ 500 kt Zn-Pb (Stolojan et Viland, 1991) et a constitué l'un des plus importants gisements de germanium au niveau mondial.

Productions passées et réserves confondues, les gisements de ce type représentent environ 20% du tonnage Pb-Zn connu à l'échelle mondiale. Cependant, la conjugaison de nombreux facteurs (petite taille des gisements, coûts de production élevés, etc.) fait que les réserves économiques correspondant à ce type de gîte accusent, en pourcentage, une baisse très nette (Stolojan et Viland, 1991).

### III.5. Gîtes de zinc non sulfurés

Les gîtes et gisements de zinc non sulfurés (également appelés « calamines »), ont été les principales sources mondiales de zinc utilisant la calcination jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Boni et Large, 2003). Ce procédé était très gourmand en énergie, tandis que le développement des techniques de traitement des minéraux, comme la flottation, a contribué à extraire efficacement le zinc des matières premières sulfurées. En conséquence, la plupart des minerais non sulfurés de zinc a été abandonnée (Hitzman et *al.*, 2003). Cependant, les récentes améliorations apportées aux techniques hydrométallurgiques de lixiviation à l'acide, d'extraction par solvant et d'électro-amorçage (Large, 2001 ; Cole et Sole, 2002 ; Hitzman et *al.*, 2003 ; Gnoinski, 2007 ; Hosseini, 2008) ouvrent la voie à un regain d'intérêt pour les minerais non sulfurés (Choulet et *al.*, 2014).

Les gîtes et gisements de zinc non sulfurés comprennent généralement des carbonates (smithsonite), des carbonates hydratés (hydrozincite), des silicates (willémitte) et des silicates hydratés (hémimorphite, argiles de Zn comme la sauconite) (Choulet et *al.*, 2014). Le zinc est également incorporé dans diverses phases complexes mineures (énumérées dans Hitzman et *al.*, 2003).

Ces gisements à haute teneur ont un impact environnemental limité (sans drainage acide) du fait de la quasi absence de sulfures (Jébrak et Marcoux, 2008) et représenteraient de l'ordre de 15% des réserves mondiales de zinc. Toutefois, pour compenser le manque à gagner de sous-produits (Pb, Ag) que les gisements de sulfures produisent généralement et les dépenses d'investissement élevées pour ce type de gisement, il faut que la teneur du zinc de ces gisements soit relativement élevée (> 12% Zn) (Hitzman et *al.*, 2003).

Les caractéristiques minéralogiques permettent de séparer ces gisements en deux grands types: supergène et hypogène (Heyl et Bozion, 1962 ; Hitzman et *al.*, 2003). Le type supergène peut être subdivisé en trois groupes : (a) les gisements de remplacement direct, (b) les gisements de

remplacement de la roche mère et (c) les gisements résiduels et karstiques (Hitzman et *al.*, 2003). Cette nomenclature est plus ou moins contestée (Borg, 2005), car plusieurs processus comme le remplacement direct ou le remplacement de la roche mère sont généralement impliqués dans la formation de tous les gisements supergènes de zinc (Choulet et *al.*, 2014).

### III.5.1. Gîtes et gisements supergènes

Les gîtes et gisements de type « supergène » sont les plus courants et sont répartis dans le monde entier. La grande majorité se trouve dans des roches hôtes carbonatées qui réagissent fortement avec les fluides acides, oxydés et riches en zinc issus de la destruction par oxydation des corps sulfurés primaires contenant de la sphalérite (Hitzman et *al.*, 2003).

Les gîtes et gisements supergènes sont principalement constitués de smithsonite, d'hémimorphite, d'hydrozincite et de sauconite. A 25°C et à pH neutre, conditions typiques d'un environnement d'altération, la smithsonite est le moins soluble de ces minéraux (Takahashi, 1960). Ce fait explique que la smithsonite soit le minéral dominant dans la plupart des gisements supergènes.

#### a) Gîtes et gisements de remplacement direct et/ou de remplacement de la roche mère

Ces gisements se forment principalement à partir de l'altération des minéralisations à zinc de type Mississippi Valley (MVT) (oxydation et remplacement des sulfures primaires) ou par le remplacement à haute température de carbonates encaissants (Boni et Large, 2003).

La mine à ciel ouvert de Skorpion au sud de la Namibie est un gisement supergène de remplacement de la roche mère formé à partir d'un gisement de sulfures massifs volcanogéniques à pyrite (Rozendaal et Stadler, 2000). La mine exploite un important gisement de minerai non sulfuré (24,6 Mt @ 10,6 % Zn) et demeure l'une des rares au monde à extraire des oxydes de zinc tels que, principalement, des hydrosilicates de zinc (hémimorphite), des smectites zincifères (sauconite) et des carbonates de zinc (smithsonite) (Hitzman et *al.*, 2003). Sont présents également, l'hydrozincite, la tarbuttite, la willémite et la schlozite (Borg et *al.*, 2003 ; mindat.org) (Figure 19).



Figure 19 : à gauche : mine de Skorpion en Namibie (Vendanta Zinc International) ; à droite : échantillon de tarbuttite (lamelles blanches) associée à de la smithsonite (couleur bleutée) prélevé dans cette mine (© Fabre Minerals 1996-2020).

### b) Gîtes et gisements résiduels et karstiques

Ces gisements se forment par des accumulations de minéraux de zinc transportés mécaniquement et/ou chimiquement (à partir d'un enrichissement supergène) dans des dépressions karstiques ou dans des systèmes de grottes. Ces gisements sont de petite à moyenne taille et ont une géométrie irrégulière, ils ne conviennent pas pour une exploitation à grande échelle. Les mines de Cho Dien au Vietnam et Padaeng en Thaïlande en sont des exemples.

D'autres gisements de zinc non sulfurés supergènes sont présents dans le Haut-Atlas marocain (Figure 20 : Gisements non-sulfurés à Zn dans le Haut-Atlas marocain (source : Choulet et al., 2014).), ainsi qu'en Sardaigne (Boni et Large, 2003) et en Iran. Au Maroc, la tectonique et la paléogéographie semblent avoir contrôlé la formation des gisements non sulfurés. Ainsi, les principales mines se localisent le long de charnières anticlinales faillées. Les strates très redressées ont favorisé l'infiltration des eaux météoriques et donc l'altération de gisements primaires sulfurés à Pb-Zn principalement encaissés dans des calcaires récifaux et para-récifaux. Les zones les plus riches et aux tonnages les plus élevés se localisent à l'intersection de diaclases agrandies par dissolution où des poches karstiques se sont formées. Il apparaît qu'à l'échelle de l'Atlas, les gisements non-sulfurés se soient formés à différentes périodes du Cénozoïque et du Quaternaire, peut-être en lien avec les différents taux de surrection à l'échelle de la chaîne (Choulet et al., 2014 ; Charles et al., 2016).

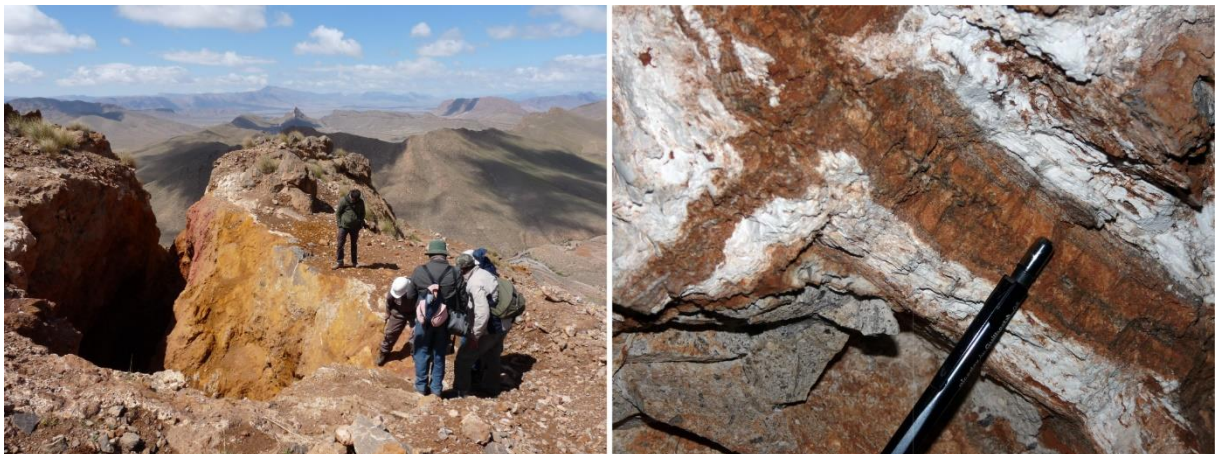


Figure 20 : Gisements non-sulfurés à Zn dans le Haut-Atlas marocain (source : Choulet et al., 2014).

### III.5.2. Gîtes et gisements hypogènes

Les gîtes et gisements de type « hypogène » sont peu courants. Ils sont situés dans des bassins sédimentaires du Protérozoïque tardif au Cambrien précoce (Boni et Large, 2003) et sont encaissés dans des carbonates, fortement cisailés dans des écailles tectoniques à la transition fragile-ductile. Les accumulations de minéraux non sulfurés de zinc (silicates et oxydes de zinc) de ces gisements ne semblent pas être directement dérivées de corps sulfurés ; elles semblent s'être formées en raison du mélange d'un fluide réduit, à température basse à modérée (80°-200°C), riche en zinc et pauvre en soufre, avec un fluide oxydé, pauvre en soufre. Ces gisements contiennent principalement de la willémite ou un assemblage à willémite-franklinite-zincite. La smithsonite, l'hémimorphite, l'hydrozincite et la sauconite sont rares, sauf en cas d'exposition

proche de la surface. Deux grands sous-types sont reconnus : les corps de remplacement à structure contrôlée et les corps stratiformes riches en manganèse (Hitzman et al., 2003).

#### **a) Corps de remplacement à structure contrôlée**

Ces gisements, généralement associés à une dolomitisation hydrothermale, sont constitués de veines et de filons irréguliers de willémite ( $\pm$  sphalérite, hématite et minéraux riches en manganèse).

Le gisement de Vazante (et les mines au nord) au Brésil, entouré de zones de dolomitisation hydrothermale, est le plus grand gisement mondial de silicate de zinc hypogène (ressources estimées à 30,59 Mt @ 21% Zn et 6,48 Mt @ 18,35% Zn). Sa minéralisation est composée de willémite (Figure 21), dolomite, sidérite, quartz, hématite, chlorite riche en zinc (jusqu'à 20%), barytine, franklinite et zincite et de rare smithsonite.

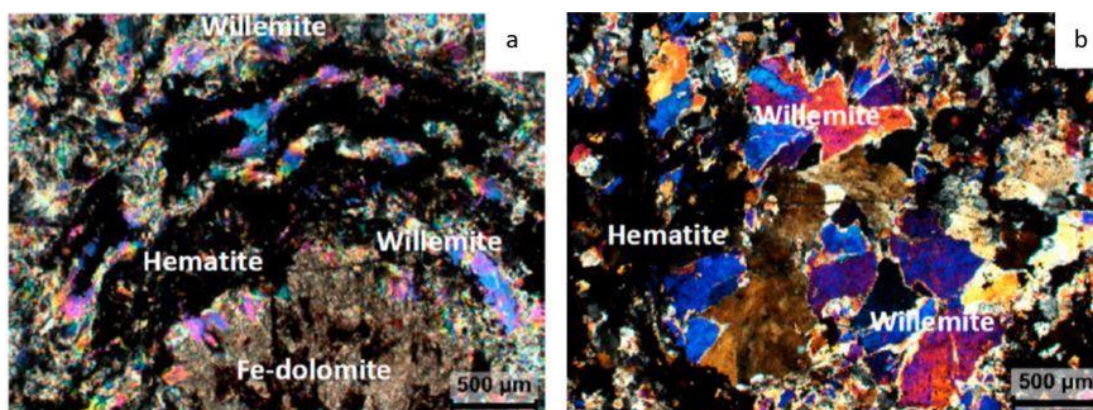


Figure 21 : Photographies au microscope optique polarisant (Lumière Polarisée Analysée) d'un échantillon de minerai de willémite dans la mine Vazante ; (a) hématite et willémite remplissant les zones corrodées de la roche hôte altérée en dolomite ; (b) willémite associée à l'hématite (Olivo et al., 2018).

#### **b) Corps stratiformes riches en manganèse et éventuellement exhalatifs**

Ces gisements, qui peuvent être métamorphisés, sont réputés pour leur variété minéralogique. Ils sont constitués de lentilles communément manganésifères à franklinite, willémite, zincite  $\pm$  gahnite (Hitzman et al., 2003). Ces gisements présentent beaucoup de similarités avec les gisements de type SEDEX fortement métamorphisés (Jébrak et Marcoux, 2008).

Les anciennes mines de fer et de zinc de Franklin et Sterling Hill situées dans le comté de Sussex, dans le New Jersey aux Etats-Unis, en sont un exemple (Johnson et Skinner, 2003). Elles ont produit environ 20 Mt @ 20% Zn (Gauthier et Chartrand, 2005). Les principaux minerais sont la calcite, la franklinite (oxyde de fer, de zinc et de manganèse) et la willémite (silicate de zinc) (Figure 22) et, dans une moindre mesure, la zincite (oxyde de zinc de couleur rouge) et l'hémimorphite (silicate de zinc). Le fer est le produit principal, en termes de tonnage, tandis que le zinc et le manganèse sont assez importants. Ces anciennes mines sont connues pour la variété de leurs minéraux (au nombre de 366), en particulier, leurs variétés fluorescentes (notamment la willémite et la calcite). Un musée est d'ailleurs présent sur le site ([franklinmineralmuseum.com](http://franklinmineralmuseum.com) ; [sterlinghillminingmuseum.org](http://sterlinghillminingmuseum.org) ; [mininghistoryassociation.org](http://mininghistoryassociation.org)).



Figure 22 : en haut : le tunnel arc-en-ciel de la mine de Sterling Hill. En bas : échantillon de la mine de Franklin constitué de willémite, de calcite et de franklinite (noire). Sous une lumière ultraviolette, la calcite apparaît rouge et la willémite est de couleur verte ; la franklinite n'est pas fluorescente (Minerals.net).

### III.6. Gîtes du métamorphisme de contact : Skarns et Mantos

Le métamorphisme de contact s'accompagne de processus métagénétiques ou de remplacement au voisinage d'une intrusion, appartenant à deux principaux types : skarn et mantos. Les skarns sont au voisinage immédiat de l'intrusion, tandis que les mantos (mot espagnol signifiant couverture, allusion à l'allure fréquemment stratiforme) peuvent se situer jusqu'à plusieurs kilomètres de l'intrusion (Jébrak et Marcoux, 2008).

Les skarns sont des gisements très répandus dans le monde et fournissent une part importante du tungstène, du cuivre, de l'or, du plomb, du zinc, ou encore de l'étain mondial. La plupart des skarns se développe au contact ou à proximité d'une intrusion au sein de niveaux carbonatés (Einaudi et al., 1981 ; Meinert et al., 2005). Le type de skarn va dépendre de la nature chimique du pluton et de celle de l'encaissant. Ces gisements se mettent en place selon trois grandes étapes : (a) la mise en place de l'intrusion où les calcaires encaissants se métamorphosent en marbre, (b) le métagénétisme prograde qui permet la formation d'endoskarns et (c) l'altération hydrothermale rétrograde qui va permettre le dépôt des sulfures (Figure 23).

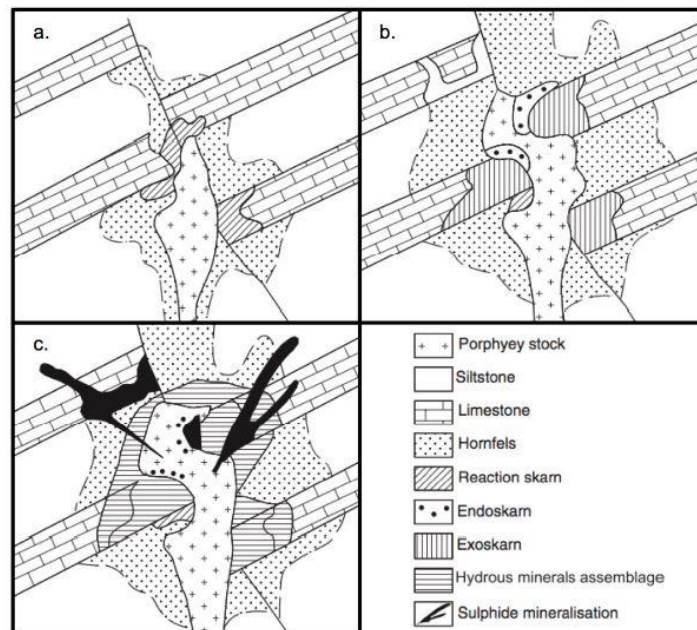


Figure 23 : Schéma présentant les différents stades de formation d'un skarn. (a) Métamorphisme prograde isochimique. (b) Métagénétisme. (c) Altération hydrothermale rétrograde (Gomes, 2016).

Les skarns zincifères se situent dans un contexte de subduction ou de rifting en domaine continental. La nature de l'intrusion est granitique siliceuse à dioritique (Dill, 2010). Il s'agit de skarns « réduits » où le zinc est associé à du plomb, de l'argent, du cuivre, du fer et du manganèse. Les principaux minéraux de ces gisements sont la sphalérite et la galène mais aussi la chalcopyrite et les sulfosels d'argent. Ces skarns apparaissent en position distale par rapport à l'intrusion, sous forme de filons, de cheminées ou de couches périphériques (mantos) riches en sulfures. Les teneurs sont fortes, de 10 à 20 % Zn + Pb et > 100 ppm Ag (Jébrak et Marcoux, 2008). Les mines de Santa Eulalia, de Conception del Oro, de Zimapan (Mexique), de Tintic (Utah, Etats-Unis) et de Kamioka (Japon), en sont des exemples.

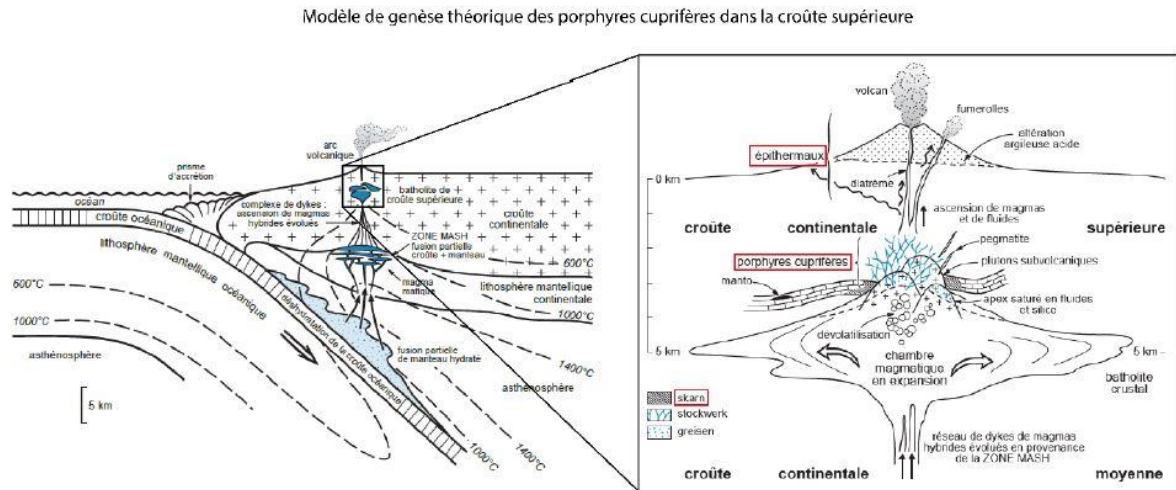
Du zinc peut également être présent dans des skarns (« réduits », parfois « oxydés ») à tungstène ou (« réduits ») à molybdène.

Du zinc peut également être observé dans des skarns « oxydés » où il est associé à du cuivre (élément principal), du molybdène, de l'or, du bismuth, de l'argent et du plomb (éléments secondaires). Ces skarns se situent au niveau d'arcs magmatiques en zone de subduction. La minéralisation se présente sous forme de stockwerk et de brèches. Le skarn d'Antamina en est un exemple. Situé dans les Andes au nord du Pérou à une altitude de 4300 m, il est le troisième producteur mondial de concentrés de cuivre et le septième de zinc (500 Mt @ 1,2% Cu, 1,0% Zn, 0,03% Mo et 12 g/t Ag pour une ressource globale de 1 500 Mt). C'est l'un des plus grands gisements de type skarn au monde.

Les skarns et les mantos sont couramment associés aux gisements porphyriques.

### III.7. Gîtes du volcanisme aérien : épithermaux à Au-Ag-U

Les épithermaux sont des gisements liés au volcanisme aérien. Ils se forment à faible profondeur (0-2 km) et sont encaissés dans des roches volcaniques et volcano-sédimentaires. Ce type de gisement se rencontre surtout dans les arcs volcano-plutoniques, les arcs insulaires et les arcs de cordillère associés aux zones de subduction (Heald et al., 1987), et se localisent généralement à l'aplomb des porphyres et/ou des skarns (Figure 24).



Source : modifié d'après Jébrak et Marcoux, 2008

Figure 24 : Modèle de genèse des porphyres cuprifères, des skarns et des épithermaux (modifié d'après Jébrak et Marcoux, 2008).

Il existe classiquement deux catégories d'épithermaux :

- Les épithermaux acides à Au-Cu (non décrits ici) ;
- Les épithermaux neutres à Au-Ag-Pb-Zn.

Les épithermaux neutres sont formés dans des conditions de pH neutre peu de temps après des éruptions volcaniques majeures et les minéralisations occupent des filons tardifs à l'intérieur, sur la bordure ou à proximité de caldeiras. Bien qu'ils soient surtout exploités pour l'or et l'argent, la sphalérite et la galène peuvent être très abondantes dans ces filons.

La mine de Troita est un exemple de gisement épithermal neutre. Cette mine est située dans la région des monts Apuseni, au pied de la chaîne des Carpates, en Roumanie. Cette région comporte de nombreux gisements de type porphyre (Cu-Au), dont le porphyre cuprifère de Bolcana, bordé par un ensemble de filons épithermaux neutres minéralisés à Pb-Zn (mine de Troita) et à Au (mine de Magura) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

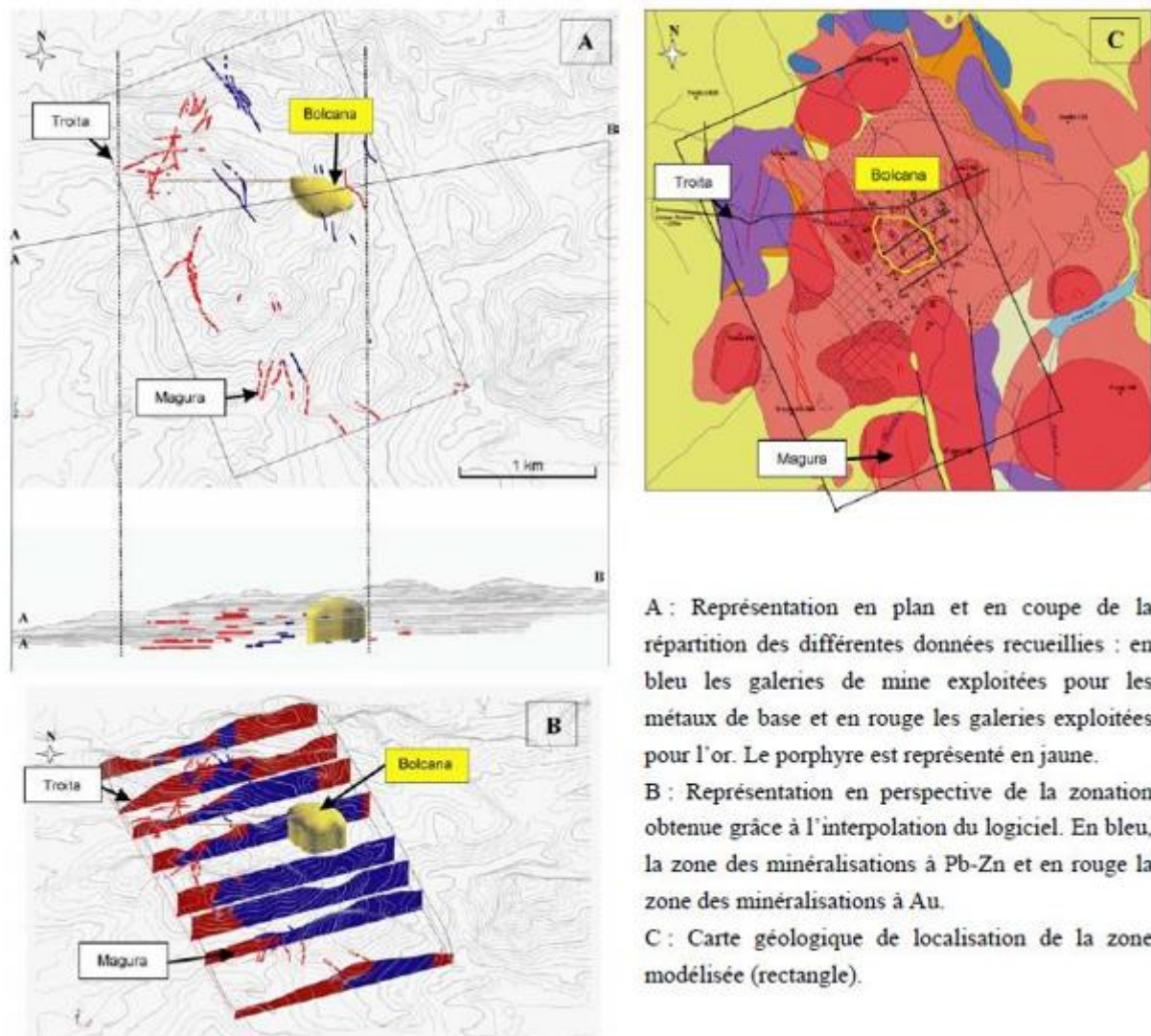


Figure 25 : Répartition des zones riches en Pb-Zn et des zones riches en Au (gisements épithermaux) associées au porphyre cuprifère de Bolcana (Cardon, 2007).

### III.8. Autres types de gisements zincifères

Il existe d'autres familles de gisements dont la production ou les ressources estimées en zinc sont anecdotiques ou non calculées. Ces familles ne sont pas décrites dans le présent rapport. Il s'agit entre autres des gisements de type porphyre à W et Mo (Mudd et al., 2017), d'IOCG (Iron Oxides Copper Gold) (Corriveau, 2007) et des gisements à Pb-Zn associés à des récifs et à des diapirs (Jébrak et Marcoux, 2008).



## IV. la production minière mondiale stagne depuis 2011

La production mondiale de zinc est restée relativement stable entre 1984 et 1994, oscillant entre 6,2 Mt et 7,2 Mt par an (Figure 26). Celle-ci a ensuite fortement augmenté au cours des deux décennies qui ont suivies puisqu'elle a doublé sur cette période pour atteindre une production annuelle de l'ordre de 13,5 Mt. Plus récemment, entre 2014 et 2020, la production mondiale s'est plutôt stabilisée, voire réduite pour atteindre environ 12,3 Mt en 2020 (ILZSG). C'est en Chine que la production minière a fortement augmenté, passant de quelques dizaines de milliers de tonnes dans les années 80 à plus de 4 Mt par an depuis 2012.

Il faut cependant souligner que la pandémie de Covid-19 a impacté le secteur de la construction et celui de l'industrie dès la fin 2019, ce qui a entraîné une réduction de la demande et donc une baisse temporaire de la production en 2020.

Le Taux de Croissance Annuel Moyen (TCAM) entre 1984 et 2020 est de 2,3%. L'international Zinc Association estime que la production minière mondiale de zinc devrait s'établir entre 17 et 22 Mt annuellement en fonction de différents scénarios de consommation et de recyclage en 2050.

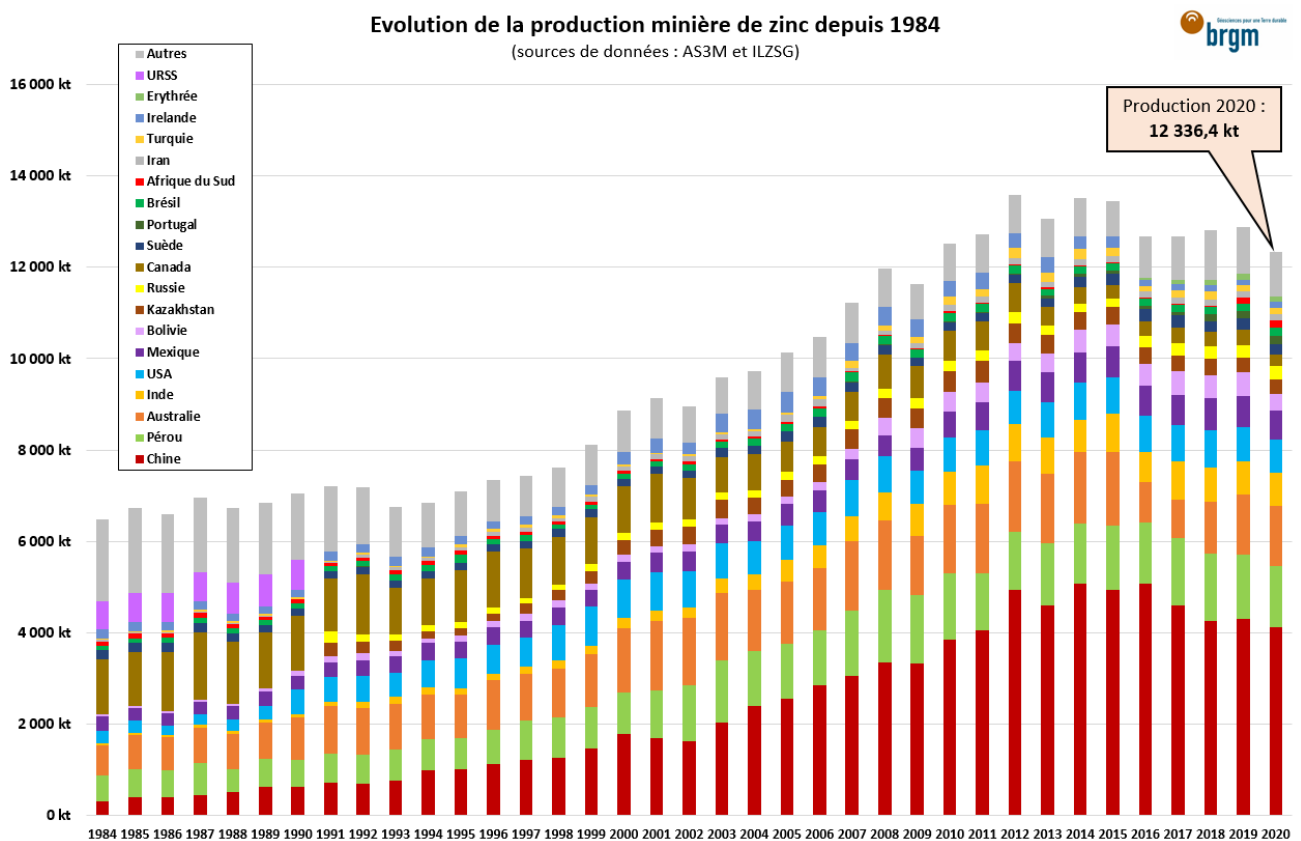


Figure 26 : Evolution de la production minière de zinc depuis 1984

En un peu plus de 30 ans, la répartition de la production mondiale a notablement évolué. Cette évolution est représentée par trois diagrammes de répartition de la production mondiale en 1990, 2005 et 2020 présentés en Figure 27. En 1990, la production minière était dominée par le Canada, l'Australie, l'URSS, la Chine et le Pérou, qui représentaient à eux cinq environ 57 % de

la production mondiale. En 2020, 55 % de la production mondiale est assurée par 3 pays que sont la Chine, le Pérou et l'Australie. L'Inde et la Bolivie sont apparus plus récemment sur la scène internationale, et représentent en 2020 respectivement 6 % et 3 % de la production mondiale.

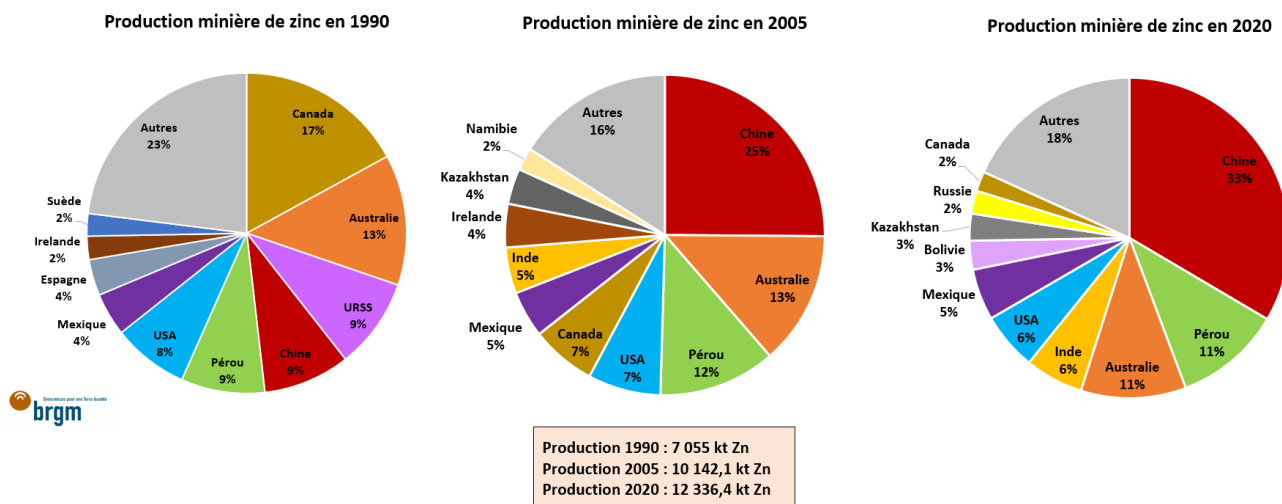


Figure 27 : Evolution de la répartition par pays de la production de zinc dans le monde entre 1990 et 2020 (source ILZSG)

Le zinc étant souvent un sous-produit ou co-produit d'extraction de gisements de cuivre ou de plomb, l'ouverture de nouvelles unités de production minière de zinc n'est pas simplement contrôlée par l'offre et de la demande du métal, mais dépend aussi des fondamentaux du marché des autres substances.

#### IV.1.1. Les 20 plus grosses mines produisent un tiers du zinc mondial

Même si elle est assez largement dominée par certains pays comme la Chine, le Pérou et l'Australie, la production mondiale est finalement assez bien répartie sur les cinq continents puisque de nombreux autres pays produisent du zinc. Les 20 plus grosses mines actives produisant du zinc représentent plus d'un tiers de la production mondiale (Figure 28). Ces 20 plus grosses mines sont réparties dans 13 pays différents, dont 4 en Chine et 4 en Australie. Ces 20 mines produisent toutes plus de 100 kt annuellement, le record de production étant détenu par la mine de Hanfeng en Chine avec une production annuelle de presque 550 kt.

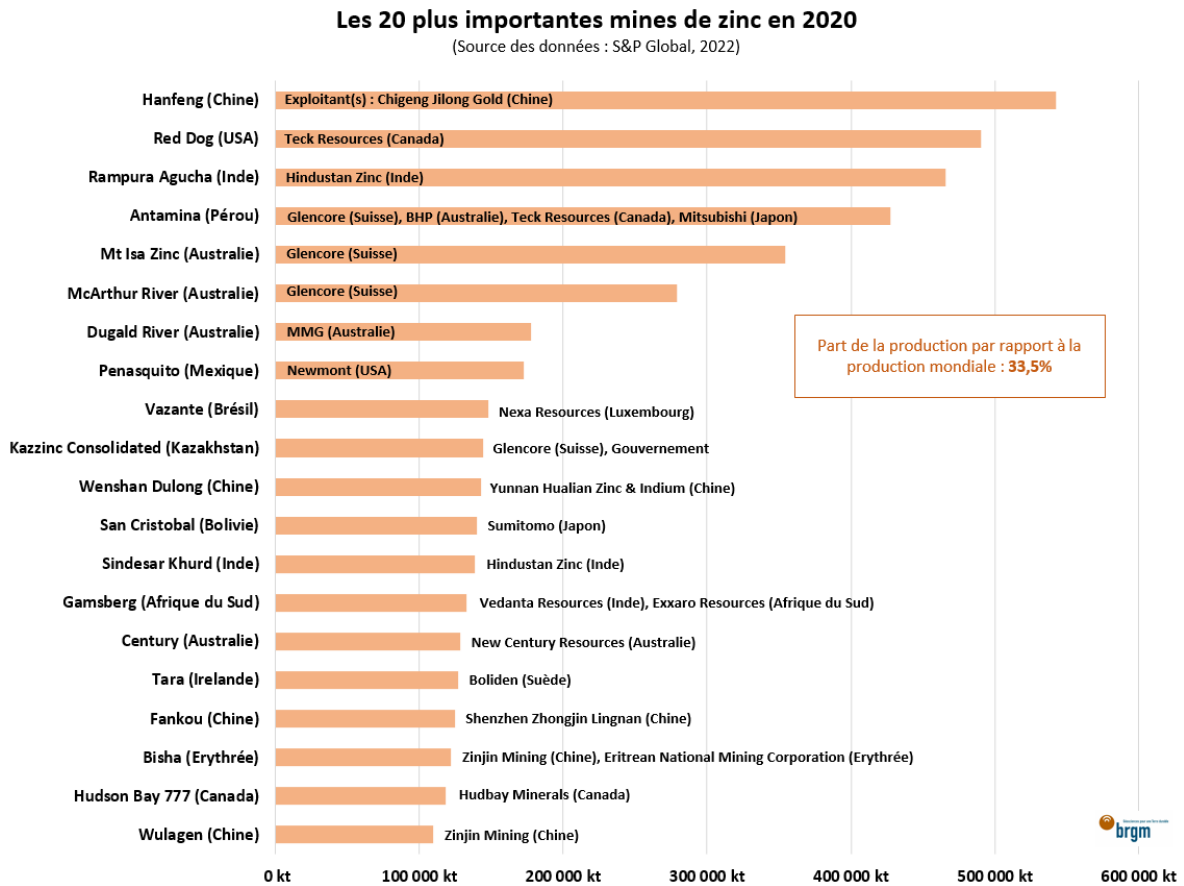


Figure 28 : Les 20 plus importantes mines de zinc en 2020 (source S&P Global 2022)

#### IV.1.2. Les 10 plus grandes sociétés produisent près d'un tiers du zinc mondial

En 2020, les dix plus grosses sociétés contrôlaient 30 % de la production minière mondiale de zinc, soit environ 4 Mt (Figure 29). La société suisse Glencore, produit environ 10 % de la production mondiale de zinc. De nombreuses compagnies autour du globe produisent du zinc. Cette répartition s'explique d'une part par le nombre de gisements dans le monde et par le fait que le zinc est produit en parallèle d'autres productions minières comme le plomb ou le cuivre. Il n'est pas rare que ces producteurs miniers intègrent aussi des unités de transformation métallurgique pour produire du zinc raffiné.

**Parts de la production mondiale de zinc des 10 plus grosses sociétés en 2020**  
(Source des données : S&P Global, 2022)

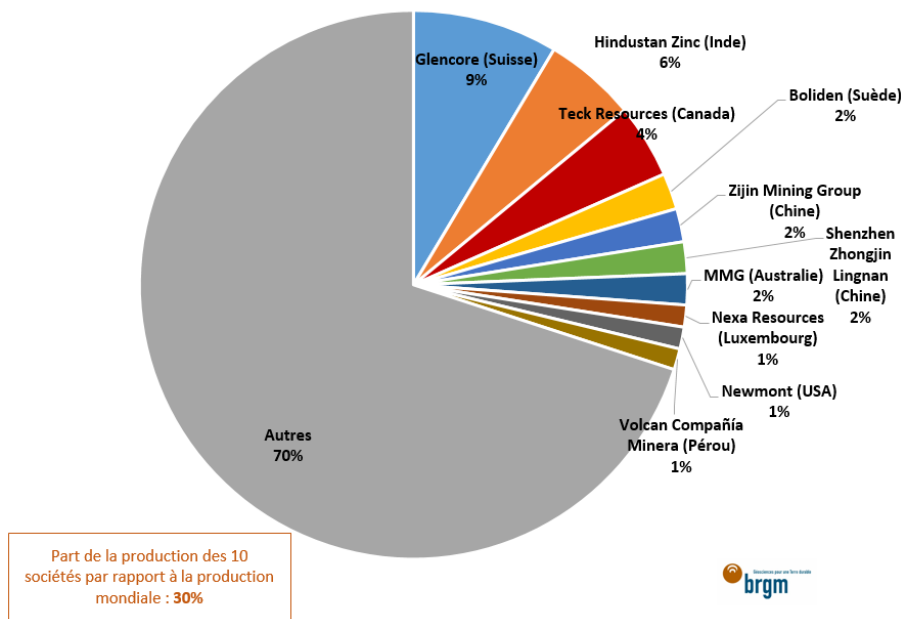


Figure 29 : Répartition de la production de zinc entre les 10 principales entreprises et leur part dans la production mondiale.

## IV.2. Une production métallurgique mondiale en mutation

Le principal minerai de zinc est la sphalérite ou « blende » qui est un sulfure de zinc (ZnS). Actuellement, plus de 96 % de la production de zinc primaire est issue des minerais sulfurés. Historiquement, les premiers minerais de zinc étaient des minerais oxydés ou « calamine » constitués de carbonate (smithsonite) et/ou de silicate (willémite, hémimorphite).

Le choix du procédé utilisé pour valoriser les minerais dépend essentiellement de la qualité du concentré produit par la mine. En effet, en fonction du gisement, les procédés minéralurgiques seront plus ou moins complexes. Le type de gisement, son environnement géologique, sa composition minéralogique ainsi que son altération ont un impact important sur la qualité du concentré. Dans une grande majorité des cas, les gisements de zinc contiennent également d'autres substances valorisables, et sont donc qualifiés de polymétalliques. Les principaux métaux associés au zinc dans les gisements polymétalliques sont par ordre d'importance, le plomb, le cuivre et les métaux précieux (argent et or).

Nayak et al. (2021) indiquent que la méthode de traitement la plus utilisée pour séparer les différents constituants minéralogiques de ces minerais est la flottation et plus accessoirement les procédés gravitaires. Après les étapes de comminution (concassage et le broyage), une fois la maille de libération atteinte, la flottation s'opère usuellement selon un schéma de type « dégrossissage-épuisage-nettoyage » (Figure 30). Ce schéma peut être répété plusieurs fois en fonction du nombre d'étapes de récupération (le déchet d'une étape alimentant l'étape suivante, etc.).

Bulatovic (2007) reconnaît trois grands modèles de flottation en fonction des métaux présents : Cu-Zn, Pb-Zn et Cu-Pb-Zn. Dans le cas particulièrement idéal, les différents métaux sont récupérés de manière séquentielle dans cet ordre précis. Néanmoins de nombreux facteurs

peuvent venir compliquer cette séparation minérale. Par exemple, la présence de certains minéraux de gangue comme les argiles ou le talc, ou encore la réactivité des pyrites et des pyrrhotites. L'existence de minéraux secondaires et l'activation de la surface de certains minéraux par des ions peuvent également complexifier la tâche du minéralurgiste. Le taux de récupération des métaux précieux peut parfois jouer un rôle important sur le choix de la méthode à employer. Dans ces cas complexes, le choix des réactifs utilisés (collecteur, moussant, dépressant, etc.), le pH ou même le séquençage exact des opérations joueront un rôle majeur sur la sélectivité. Cette complexité mènera éventuellement à la production de concentré de basses teneurs ou de qualité moindre lorsque la séparation est imparfaite.

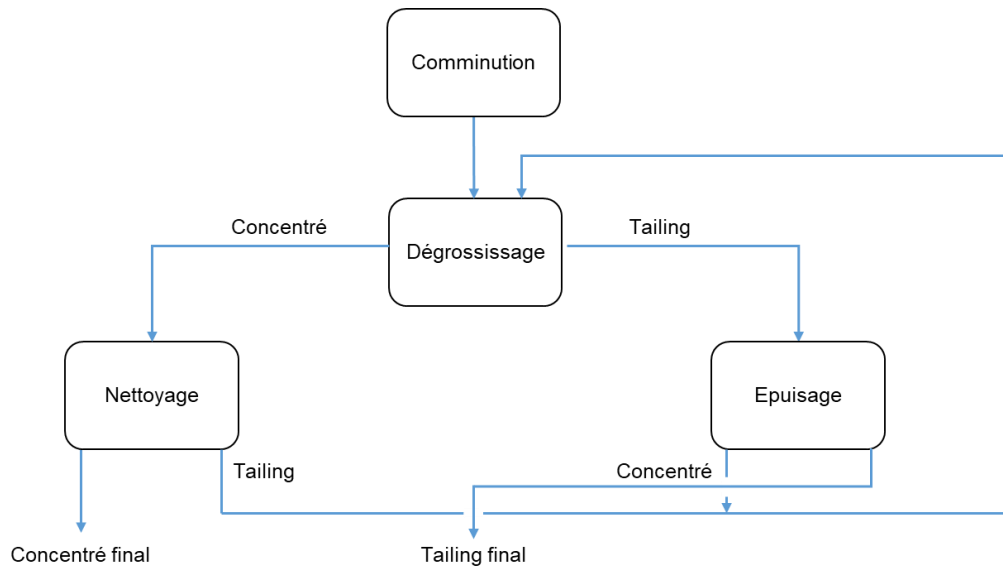


Figure 30: Schéma d'une étape de flottation d'un concentré suivant la triade « dégrossissage-épuisage-nettoyage ». (Modifié d'après : Sinclair, 2005)

Ainsi dans certains cas, les concentrés contiendront d'importantes quantités d'impuretés particulièrement délétères dans le cas d'un procédé hydrométallurgique. Ces concentrés impurs et donc de moindre valeur sont particulièrement utilisés dans le procédé ISF (voir ci-dessous) car il est capable de tolérer des niveaux d'impuretés nettement plus élevés. De plus, les coûts de production étant plus importants pour le procédé ISF, l'utilisation de matière première peu onéreuse accroît significativement la rentabilité de l'usine. Dans cette optique, les usines basées sur le procédé ISF utilisent également des matériaux secondaires ou des résidus « pauvres » en zinc.

#### IV.2.1. Production métallurgique

La production métallurgique du zinc est basée sur deux méthodes différentes, la voie pyrométallurgique et la voie hydrométallurgique. Les installations permettant d'effectuer ces deux voies métallurgiques sont généralement regroupées sous le terme anglo-saxon ambigu de « smelter » ou « fonderie » en français.

La pyrométallurgie du zinc est centrée sur l'évaporation suivie de la purification du métal. L'hydrométallurgie consiste en l'extraction du zinc par voie aqueuse, et à la récupération du métal sous forme de cathode par le biais d'une électrolyse. Dans les deux cas, la première étape de la production consiste en un traitement thermique du minerai permettant de convertir le sulfure de zinc initial en oxyde de zinc. C'est pour cette raison que la voie hydrométallurgique est parfois dénommée voie pyrohydrométallurgique.

En termes de procédé, la voie hydrométallurgique est généralement nommée procédé électrolytique ou « roast-leach-electrowinning ». Le principal procédé pyrométallurgique est le « Imperial Smelting Process » ou ISF correspondant à une réduction carbothermique dans un four de type haut-fourneau. D'autres procédés thermiques « historiques » existent et consistent généralement en une distillation par le biais de cornues (horizontale, verticale ou électrothermique) mais ceux-ci sont plus marginaux en termes de volume de production.

Les procédés métallurgiques étant très complexes et diverses, les descriptions ci-après correspondront à une usine « type » synthétisant les cas les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie.

**Le procédé hydrométallurgique** (Figure 31) démarre avec la mise en solution sous forme de sulfate de zinc ( $ZnSO_4$ ) du zinc présent dans la calcine obtenue par grillage de la sphalérite. Deux étapes de lixiviation sont nécessaires pour récupérer la majorité du zinc. La première étape est la solubilisation par l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à pH « neutre » de l'oxyde de zinc ( $ZnO$ ). La seconde étape, particulièrement importante lorsque les minerais sont riches en fer, est une deuxième attaque par l'acide sulfurique à chaud et à pH fortement acide. Elle permet de récupérer dans la solution le zinc contenu dans les ferrites/spinelles de zinc ( $ZnFe_2O_4$ ) et les silicates de zinc ( $Zn_2SiO_4$ ). Le résidu ultime de cette étape est principalement composé de plomb-argent-(or). Le lixiviat obtenu est par la suite épuré de son contenu en fer (et autres métaux proches) au travers de différentes méthodes permettant de convertir le fer ferreux soluble ( $Fe^{2+}$ ) en fer ferrique insoluble ( $Fe^{3+}$ ). Ce fer est séquestré sous forme de différentes phases minérales en fonction des procédés : goethite, hématite ou jarosite . Par la suite, la solution est purifiée par deux étapes de cémentation sur poudre de zinc pour éliminer certains métaux cuivre-cadmium et cobalt-nickel. Après élimination du gypse, le zinc est récupéré par électrolyse sous forme de cathode.

**Le procédé pyrométallurgique** (Figure 32) est constitué d'une première étape de frittage/grillage du concentré ou celui-ci est associé à des fondants et autres adjuvants. Ceci permet par combustion de convertir le sulfure de zinc en oxyde de zinc et la formation d'un matériau poreux et cohérent nécessaire à l'étape suivante. Le sulfure d'hydrogène produit lors de cette étape est converti en acide sulfurique. L'oxyde de zinc obtenu est réduit et vaporisé en zinc métal dans un haut-fourneau en présence de coke et de gaz. Le zinc gazeux est séparé et condensé dans un bain de plomb liquide pour empêcher sa réoxydation. Le zinc impur ainsi obtenu nécessite par la suite une dernière étape de purification (par liquation ou distillation) avant la production de lingots de zinc commercialisables de diverses qualités.

En fonction des auteurs, le procédé électrolytique représente actuellement 89 % de la production mondiale de zinc alors que le procédé ISF représente seulement 10 %.

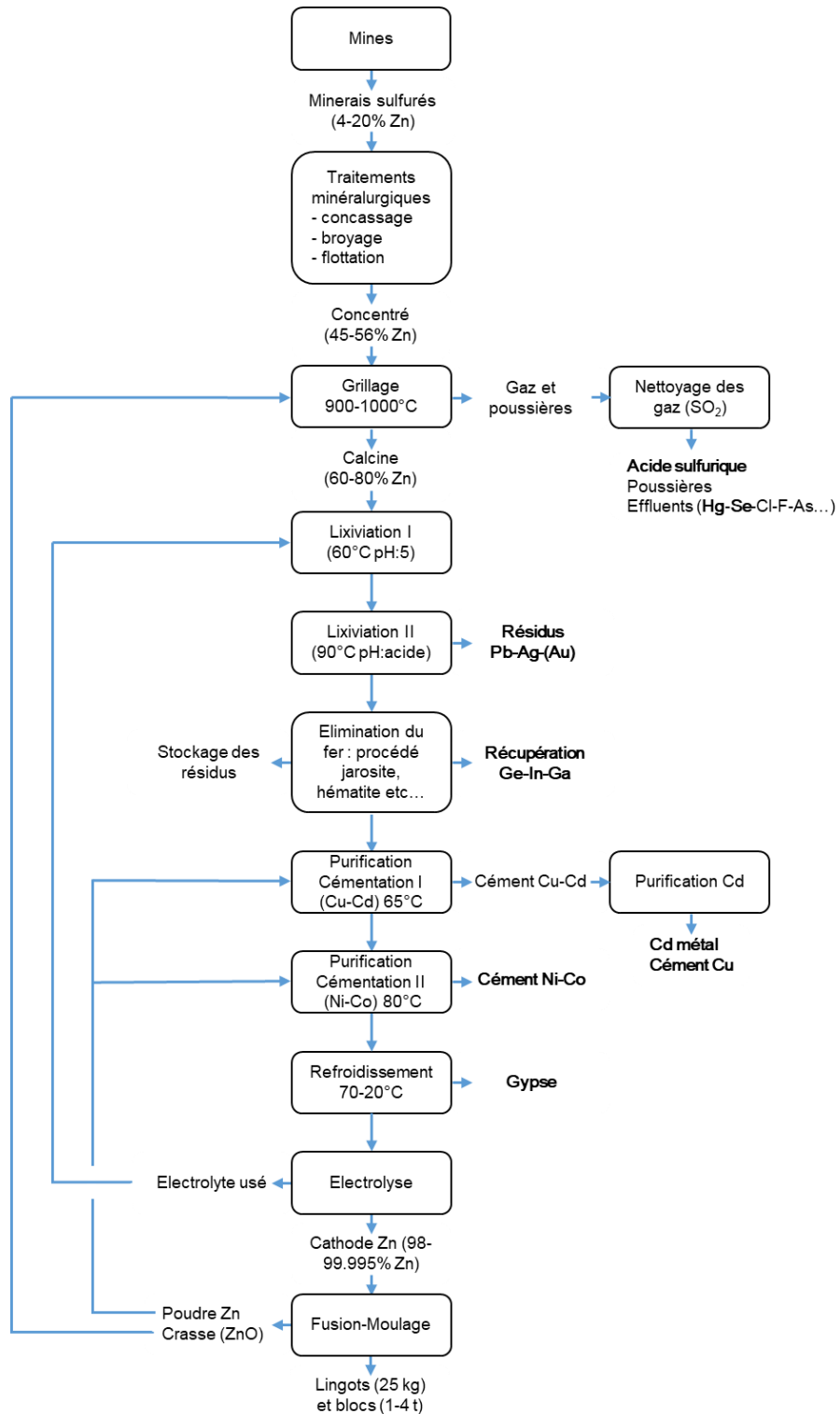


Figure 31: Schéma simplifié de production de zinc et sous-produits par voie hydrométallurgique (modifié d'après: Deschamp et al., (2002) ; Sinclair (2005) et Hau (2010))

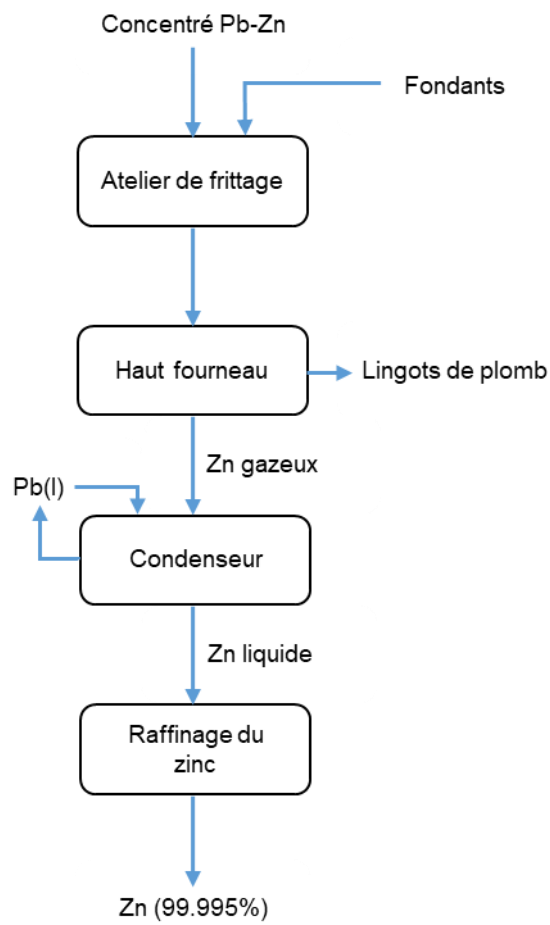


Figure 32: Schéma simplifié de production de zinc par voie pyrométallurgique (source : Sinclair (2005))



## IV.2.2. Les smelters dans le monde

Sur les 145 fonderies renseignées dans les bases de données de l'ILZSG en 2020, 66 sont situées en Chine, 10 au Japon, 9 en Inde et 9 en Iran. Parmi les fonderies restantes, 27 sont localisées sur le continent européen et 12 en Amérique. Sur l'ensemble de ces fonderies, seules trente ont vocation à traiter uniquement des matériaux secondaires.

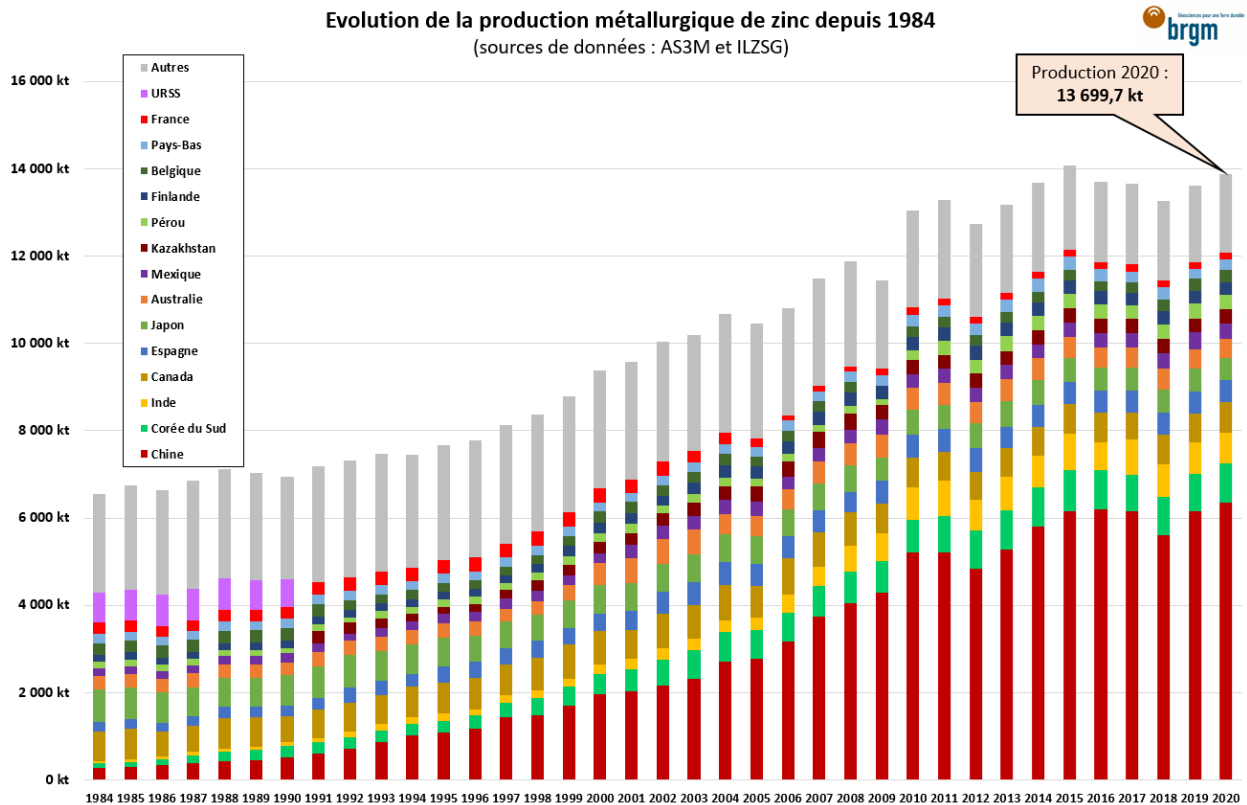


Figure 33 : Evolution de la production métallurgique de zinc depuis 1984 (source données AS3M et ILZSG)

La capacité de production de zinc primaire du continent asiatique est de loin la plus importante, soutenue essentiellement par la Chine (Figure 33). Cette production a triplé depuis les années 90, passant d'une capacité de seulement 2,5 Mt de zinc par an jusqu'à plus de 7,5 Mt à partir de 2010 (Figure 34). Pendant ce même laps de temps, la production européenne s'est réduite en passant de 2,5 à 2 Mt par an. La participation des autres continents est nettement plus faible avec des changements moins prononcés. La production africaine est restée stable malgré une augmentation marginale entre 2000 et 2015. Dans le cas de l'Océanie et des Amériques, l'activité a crû légèrement.

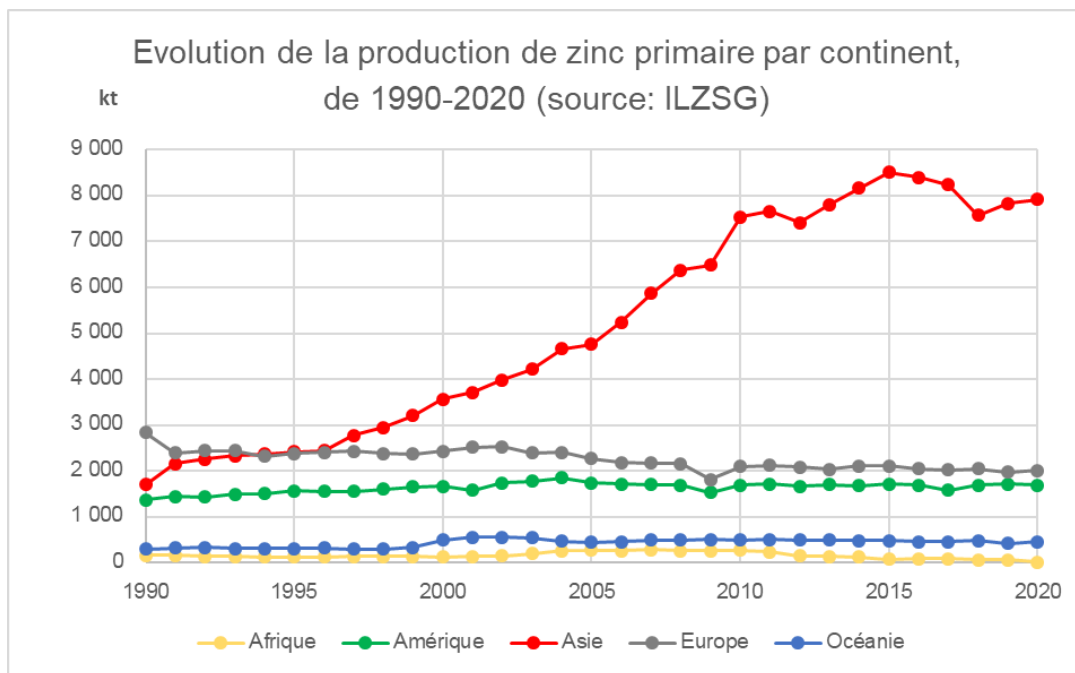


Figure 34: Évolution de la production de zinc primaire (source : ILZSG 2021)

La position de la Chine dans le domaine de l'élaboration des slabs (feuilles ou plaques) de zinc est largement dominante avec la production de 46 % du volume mondial en 2020 (Figure 35). En effet, plus de la moitié de la capacité de production est située dans ce pays, avec une capacité totale de 7,75 Mt de zinc annuellement.

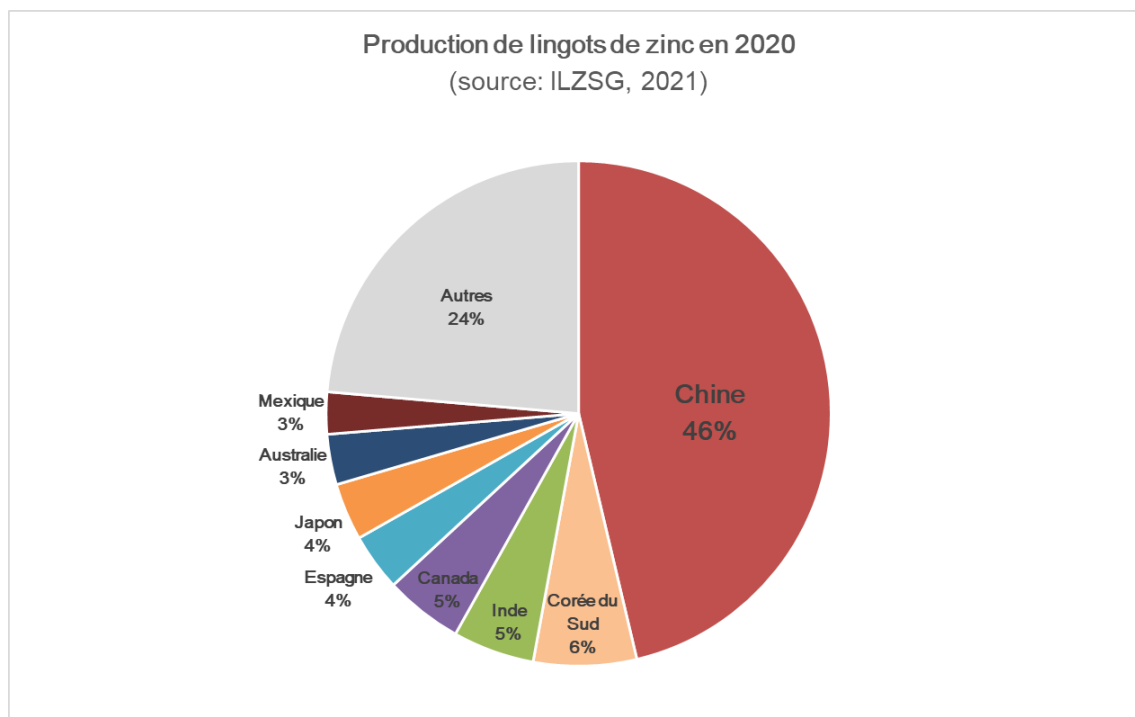


Figure 35: Répartition de la production de zinc métallique par pays en 2020 (source: ILZSG 2021)

La Chine possède certaines des fonderies plus importantes au monde (Figure 36). Cependant, sa capacité de production est essentiellement liée aux nombres importants d'usines. En effet, ce

sont les installations de faible et moyenne capacités (produisant moins 200 kt de Zn par an) qui ont produit les deux tiers du volume total du pays.

Nom	Pays	Compagnie	Capacité (kt)
Shangluo	Chine	Shaanxi Non-ferrous Metal	300 000
Shuikoushan	Chine	Zhuzhou Smelter Group	300 000
Trail	Canada	Teck Resources Limited	310 000
Kokkola	Finlande	Boliden Kokkola	315 000
Cajamarquilla	Pérou	Nexa Resources	350 000
Shaanxi	Chine	Hanzhong Zinc Industry	360 000
Guangxi	Chine	Nanfang Non-ferrous Metal	370 000
Seokpo	Corée du Sud	Young Poong	400 000
San Juan de Nieva	Espagne	Asturiana de Zinc (Glencore)	510 000
Onsan	Corée du Sud	Korea Zinc	660 000

Figure 36: Capacité et localisation des dix plus grandes fonderies dans le monde (source : ILZSG 2021)

### IV.2.3. Économie des smelters

L'économie des smelters est complexe et repose sur un équilibre entre les échanges, les mines et les fonderies basées entre autres sur la valeur boursière du zinc et les coûts de production.

Généralement, 30 à 40 % des dépenses des fonderies concernent la main-d'œuvre, 35 % l'énergie (électricité et carburant) tandis que le restant est réparti entre l'entretien des installations et les consommables (Figure 37). Ce coût est réparti de manière proche entre les deux types de procédé. En revanche, le coût total de production d'une tonne de zinc par procédé pyrométallurgique est 30 % plus élevé que celui par procédé hydrométallurgique. Les recettes se réalisent sur quatre composantes : les charges de traitement « TC », le métal libre ou « free metal », les premiums et les éventuels sous-produits.

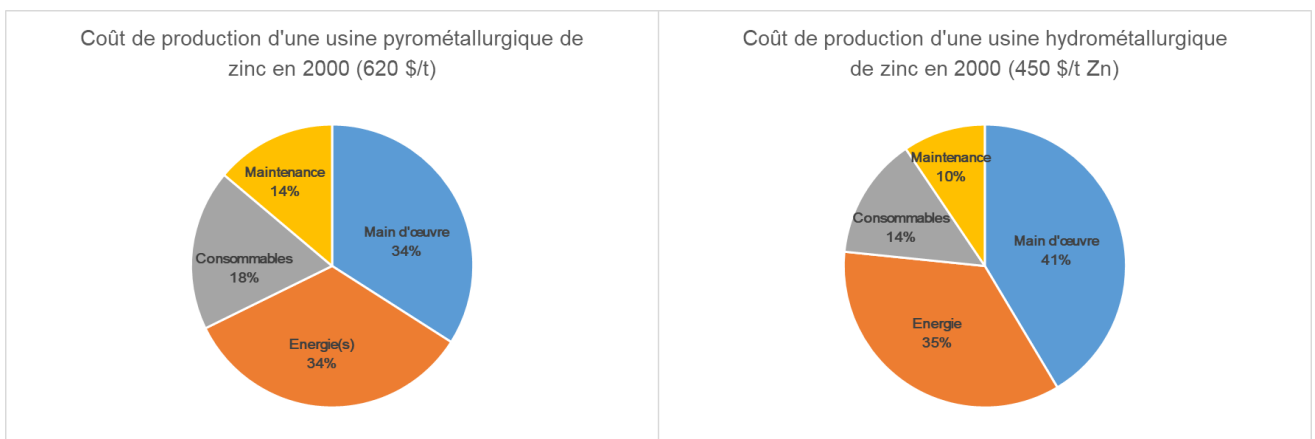


Figure 37: Répartition des coûts de production directs entre les deux types de procédés métallurgiques (source : Sinclair (2005))

Habituellement, les fonderies paient pour 85 % du zinc contenu dans les concentrés (avec une décote relative à la teneur du concentré), le prix du zinc étant basé sur la cotation du LME. Ces concentrés titrent usuellement autour de 45-55 % Zn lorsqu'ils sont destinés à la voie hydrométallurgique (souvent moins pour les usines pyrométallurgiques). À ce prix du métal est

ajouté un supplément en fonction des éléments valorisants lorsque ceux-ci dépassent un certain seuil dans le concentré comme pour les métaux précieux. À l'inverse, des pénalités peuvent être appliquées en présence d'éléments pénalisants lorsque leur concentration dépasse un seuil de tolérance (Fe, Hg, As etc.). À ce prix est également déduite une charge de traitement par tonne de concentré (TC).

Les revenus d'une fonderie sont donc répartis en fonction de quatre paramètres (Figure 38):

- **Les charges de traitement ou « TC »** qui correspondent à une charge fixe par tonne de concentré.
- **Le métal libre ou « free metal »** correspondant à la différence entre la quantité de zinc payé aux clients et à la quantité de zinc réellement récupérée par le fondeur. Il est fonction, de la teneur initiale du concentré et du taux de récupération effectif.

$$\text{Free metal} = \text{Prix LME} \times \text{Teneur en Zn} \times (\text{Taux de récupération} - \text{Prix du concentré})$$

- **Les premiums** correspondant à un supplément facturé au client relatif à la conjoncture offre-demande. Lorsque la quantité de concentré de zinc disponible sur le marché diminue, les premiums baissent pour favoriser le producteur. À l'inverse, lorsque le marché est saturé, les premiums augmentent pour favoriser l'acheteur.
- **Les sous-produits** et tout particulièrement l'acide sulfurique produit lors du grillage. Des métaux peuvent également être récupérés lors des différentes étapes de lixiviation ou purification comme le cuivre, le plomb, le cadmium ou les métaux précieux. Dans certains cas, des métaux rares comme l'indium ou le germanium sont également récupérés.

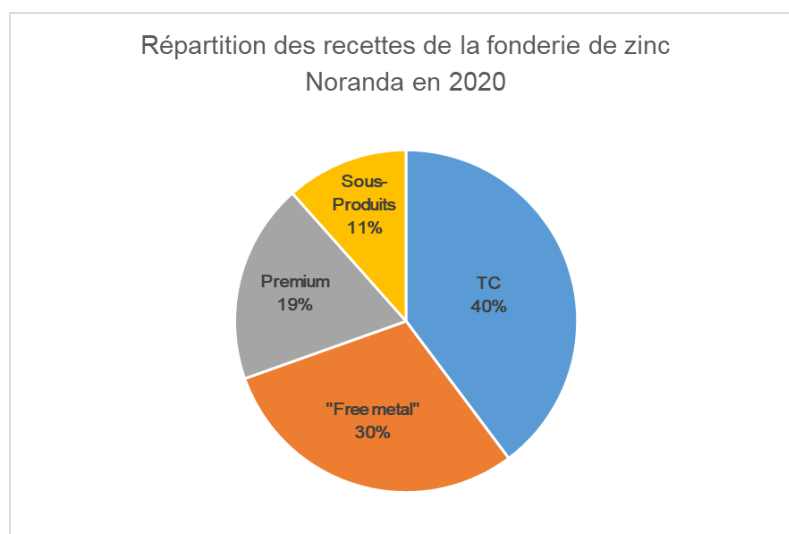


Figure 38: Répartition des revenus de la fonderie Noranda en 2020 (source : Noranda Income Fund (2021))

#### IV.2.4. Les sous-produits de la métallurgie du zinc

De nombreux sous-produits sont ou peuvent être extraits du minerai de zinc lors des différentes étapes d'extraction et de purifications. Le caractère économique ou non de leurs récupérations dépend de plusieurs critères comme la concentration initiale dans le minerai, les coûts d'extraction, la présence d'une raffinerie adaptée sur site ou à proximité (importance des coûts de transport) ainsi que les débouchés en terme de marchés. Dans certains cas, les sous-produits

sont extraits avec un coût de revient négatif dans le seul but de les séparer des différents résidus destinés à être entreposés.

**L'acide sulfurique** est le principal sous-produit de la métallurgie du zinc. Il est produit lors de la transformation du sulfure de zinc en oxyde de zinc lors de l'étape de grillage. Cette combustion génère du dioxyde de soufre, qui après purification, permet de produire l'acide sulfurique. Le grillage d'une tonne de sulfure de zinc permet de créer 1,75 t d'acide sulfurique. Une partie de cet acide servira pour la suite du procédé lorsque celui-ci a lieu par voie hydrométallurgique (0,2 t consommée par tonne de zinc produite).

**Le mercure**, comme l'acide sulfurique, est récupéré après le grillage des concentrés. Celui-ci se retrouve dans les effluents liquides issus du nettoyage des gaz destinés à la production d'acide sulfurique. Il est précipité sous forme de calomel (chlorure mercurieux  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) par action de chlorure mercurique ( $\text{HgCl}_2$ ) sur le mercure métal, et n'est plus vraiment valorisé aujourd'hui du fait de sa toxicité.

Le résidu à **plomb et métaux précieux** est produit après la seconde phase de lixiviation de la calcine. Le plomb étant présent sous la forme de sulfate, sa valeur marchande est faible. Il est possible d'augmenter sensiblement la valeur marchande du produit après une phase d'enrichissement en métaux précieux (argent et or) au détriment de la récupération du plomb.

La récupération du **cuivre et du cadmium** est en lien avec les premières étapes de purification du lixiviat. Le cuivre est généralement précipité concomitamment avec le cadmium par cémentation à basse température (65°C). Le ciment à cuivre-cadmium obtenu est ensuite relavé à l'acide sulfurique pour extraire le cadmium qui sera ensuite purifié. Le ciment de cuivre restant pourra être vendu à une fonderie de cuivre.

La récupération d'un **cément à nickel et cobalt** est réalisée par cémentation via le même principe que le cuivre-cadmium mais à plus haute température (80°C) en présence d'activateurs spécifiques. Ces activateurs étant l'oxyde d'arsenic ou l'oxyde d'antimoine, ils vont avoir un impact négatif important sur la valeur du ciment.

**Le gypse** est un sous-produit lié à la concentration en calcium du concentré (présent sous forme de carbonate dans la gangue). Il est extrait du lixiviat lors d'une étape spécifique de cristallisation par refroidissement après la purification à haute température. Son élimination est essentielle au bon fonctionnement de l'usine car sa saturation dans le liquide entraîne de nombreux problèmes d'obstructions et de dépôts lors du refroidissement de la solution.

Dans de rares cas, d'autres **métaux rares** contenus dans le concentré peuvent être récupérés économiquement. En règle générale, ceux-ci sont éliminés lors de la suppression du fer ou plus rarement vaporisés lors du grillage. La mise en place d'étapes de traitement supplémentaires est envisageable lorsque leurs concentrations sont importantes. Celles-ci requièrent, en fonction des procédés, des étapes de cémentation, de précipitation, d'extraction par solvants ou même de vaporisation dans un four spécifique (four Waelz).

Le cas du **germanium** est particulier notamment pour les procédés hydrométallurgique. En effet, cet élément en trace étant extrêmement impactant lors de l'étape d'électrolyse, il est quasi systématiquement considéré comme un élément pénalisant. De ce fait, il est soigneusement éliminé lors des étapes de purification du lixiviat. A l'échelle mondiale, seuls 3 % du germanium contenu dans les concentrés de zinc seraient récupérés (González Ruiz et al., 2018). D'après la « Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le Germanium » (2015), 75 % de la production mondiale est coproduite avec le zinc.

**L'indium et le gallium**, tout comme le germanium, sont éliminés conjointement avec le fer. Leurs récupérations nécessitent également la mise en place d'opérations supplémentaires souvent onéreuses. L'indium est par exemple récupéré et purifié par la société Trafigura à la fonderie d'Auby (59) par le biais de différentes étapes de cémentation et purification (Constant, 2012). 95 % de la production d'indium est issue de la métallurgie du zinc et seulement 5 % de la production de gallium (Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – l'Indium, 2017 et Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – le Gallium, 2016).

### **IV.3. État des réserves et ressources**

#### **IV.3.1. Définitions**

La notion de ressources 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 primant). 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 primant). (Figure 39).

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.

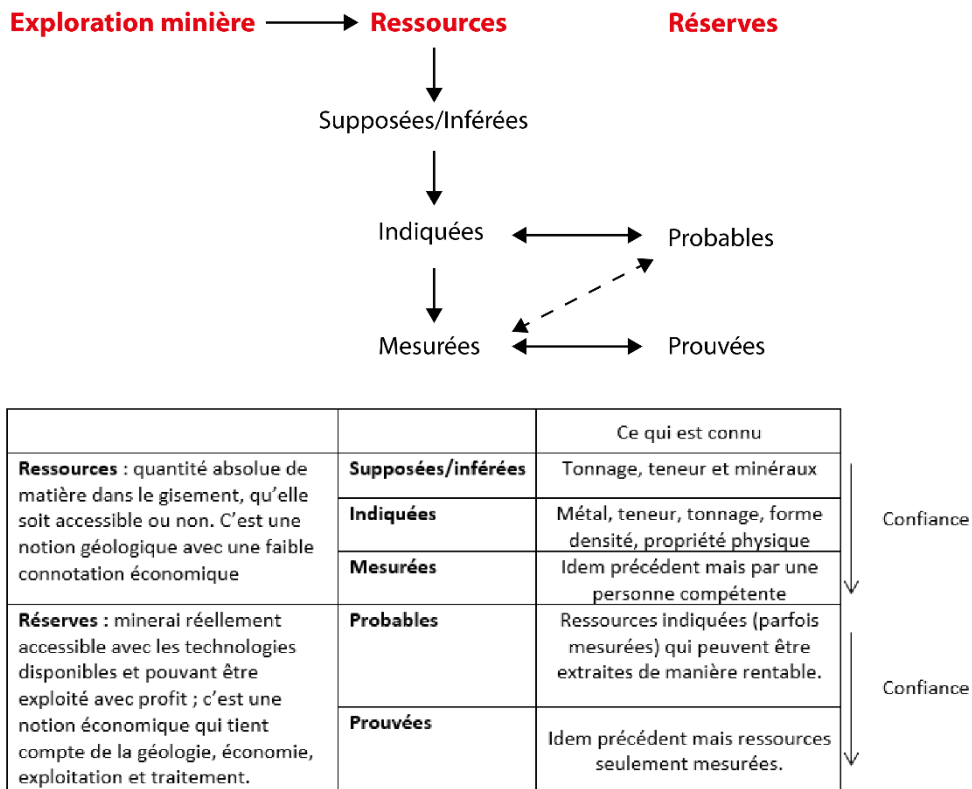


Figure 39 - Définitions des notions de ressources et réserves selon l'approche CRIRSCO

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).

### IV.3.2. Les ressources mondiales

Selon l'USGS, les ressources mondiales de zinc étaient estimées en 2021 à 1,9 Gt. A titre de comparaison, les ressources de cuivre sont évaluées à 2 Gt, celles de fer à 110 Gt et celle de lithium à 89 Mt. Les ressources sont globalement bien réparties sur toute la surface du globe.

### IV.3.3. Les réserves mondiales

En 2021, les réserves mondiales de zinc ont été évaluées par l'USGS à 251 Mt dont 27 % rien qu'en Australie. Les principales autres réserves sont localisées en Chine, en Russie, au Mexique et au Pérou. De la même façon que pour la production, le reste des réserves mondiales est assez largement réparti dans différents pays des cinq continents (Figure 40). On y retrouve des acteurs tels que l'Inde, les États-Unis, la Bolivie, le Canada ou le Kazakhstan. L'Europe est représentée par la Suède et ses 1 % des réserves mondiales.

## Réserves mondiales de zinc en 2021

(Source: USGS, 2022)

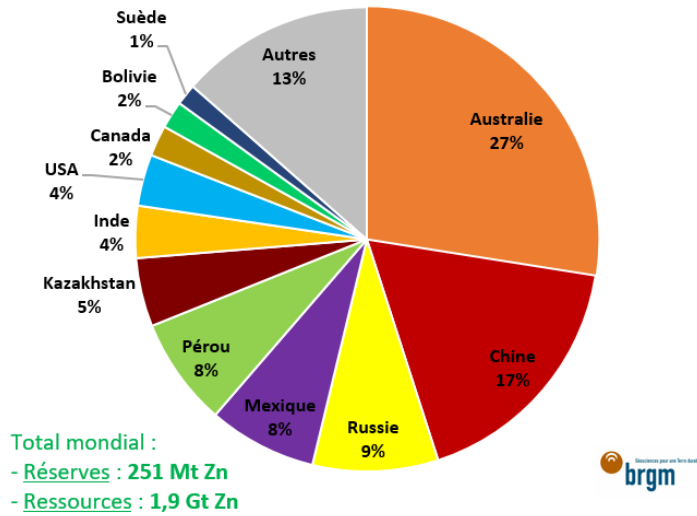


Figure 40 : Répartition des réserves mondiale de zinc en 2021 par pays (source USGS, 2022)

Les réserves rapportées par l'USGS sont assez stables depuis 20 ans (Figure 41), oscillant entre 16 et 25 ans de production minière (réserves rapportées annuellement et divisées par la production annuelle). Cependant, les entreprises minières n'ont pas de véritable justification technique à vouloir certifier leurs réserves au-delà d'une vingtaine d'années, il est donc probable que les réserves mondiales soient plus importantes que celles effectivement évaluées aujourd'hui.

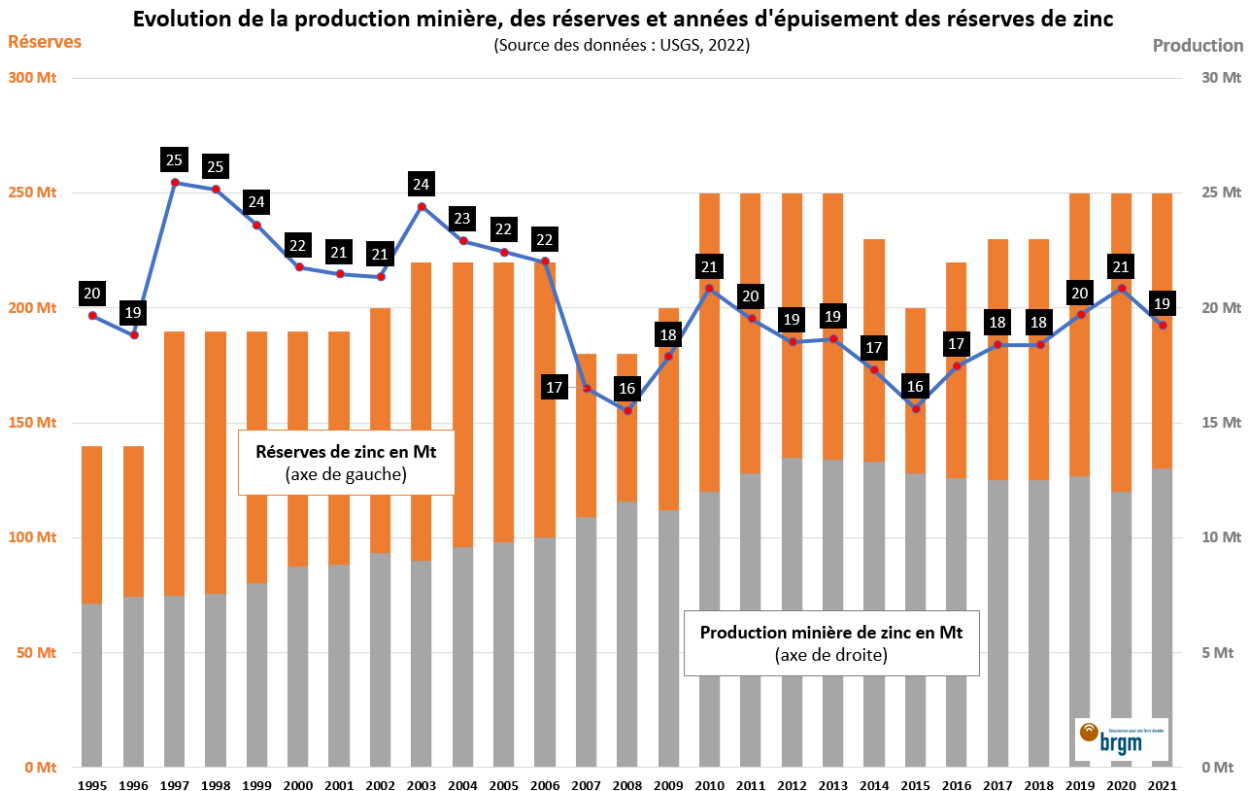


Figure 41 : Evolution de la production minière, des réserves et années d'épuisement des réserves de zinc (source des données : USGS, 2022).



La tendance observable sur les 25 dernières années est à l'augmentation des réserves de zinc même s'il peut y avoir certaines variations ou réévaluation entraînant des écarts d'une année à l'autre. En 1995, les réserves évaluées par l'USGS étaient de l'ordre de 140 Mt, tandis qu'aujourd'hui, les réserves évaluées atteignent 250 Mt.

#### IV.3.4. Les principaux projets en cours de développement

La partie ci-dessous présente les principaux projets miniers en terme de zinc contenu. Comme pour d'autres métaux, le développement d'une mine de zinc 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, les problèmes géopolitiques, etc. En particulier, le zinc étant associé à d'autres métaux dans les gisements, la mise en production d'une mine peut dépendre de facteurs liés à ces autres métaux associés.

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

Projet	Compagnie	Pays	Etapes	Statut	Tonnage (Mt)	Teneur (%)	Zn contenu (Mt)	Date de démarrage	Co-produits associés
Ozernoye	MBC Resources, China Nonferrous Metal	Russie	Construction débutée	Actif	135,0	6,1	8,3	2023	Pb, Ag
Dairi	China Nonferrous Metal	Indonésie	Construction débutée	Actif	25,1	11,5	2,9	2022?	Pb, Ag
Kvanebjerg	Greenland Minerals	Groenland	Faisabilité	Actif	1 010,3	0,2	2,4	?	TR, U
Aripuana	Nexa Resources	Brésil	Construction débutée	Actif	71,1	3,3	2,3	2022	Pb, Ag, Au, Cu
Buenavista	Southern Copper	Mexique	Préproduction	Actif	102,6	1,9	1,9	2023	Cu, Ag
Prairie Creek	NorZinc	Canada	Construction débutée	Actif	16,2	11,0	1,8	2024	Pb, Ag
Corani	Bear Creek Mining	Pérou	Construction prévue	Actif	376,5	0,3	1,3	2024	Ag, Pb
Horne 5	Falco Resources	Canada	Construction débutée	Actif	129,9	0,8	1,0	2025	Au, Cu, Ag
Jabali	Ansar Wikfs	Yemen	Préproduction	Inactif	10,5	9,4	1,0	?	Pb, Ag
Vares	Adriatic Metals	Bosnie-Herzégovine	Construction débutée	Actif	19,4	3,1	0,6	2023	Ag, Pb, Au

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

Tableau 3 - Les dix plus gros projets miniers de zinc en phase avancée dans le monde

Parmi ces projets miniers (Tableau 3), certains sont dans une phase très avancée (construction, pré-production etc.) et d'autres sont encore en développement (faisabilité ou préfaisabilité) (Tableau 4). On retrouve les pays déjà producteurs tels que la Russie, le Canada ou le Pérou. Mais aussi de nouveaux acteurs comme le Groenland, la Bosnie-Herzégovine ou l'Indonésie. L'Iran pourrait apparaître en tant que nouveau producteur de zinc avec la réalisation du projet d'extraction sur le gisement de Mehdiabad, qui contiendrait environ 16,5 Mt de zinc.

Les 10 plus gros projets zincifères mondiaux

Projet	Compagnie	Pays	Etapes	Statut	Tonnage (Mt)	Teneur (%)	Zn contenu (Mt)	Date de démarrage	Co-produits associés
Kholodninskoe	MBC Resources	Russie	Faisabilité	Actif ?	519,0	4,1	21,2	?	Pb, Ag
Selwin	Yunan Chihong Zinc & Germanium	Canada	Faisabilité	Actif	427,2	4,8	20,5	?	Pb
Mehdiabad	KDD Group, Itok, MB Holding Company	Iran	Faisabilité	En attente de financement	466,4	3,5	16,5	?	Pb, Ag, Ba
Ozernoye	MBC Resources, China Nonferrous Metal	Russie	Construction débutée	Actif	135,0	6,1	8,3	2023	Pb, Ag
Reward	Teck Resources	Australie	Préfaisabilité	Actif	101,6	8,1	8,2	?	Pb
Admiral Bay	Metalicity	Australie	Préfaisabilité	Inactif	170,0	4,1	7,0	?	Pb, Ag, Ba
Hermosa	South32	USA	Préfaisabilité	Actif	193,0	3,4	6,6	2027	Ag, Pb, Mn, Cu, Au
Kipushi	Ivanhoe Mines, Gécamines	RDC	Faisabilité terminée	Actif	15,7	29,8	4,7	?	Cu, Pb, Ag, Co
San Gregorio	Compania de Minas Buenaventura	Pérou	Préfaisabilité	Inactif	79,9	5,2	4,2	2027?	Pb, Ag
Konimansur	Gouvernement du Tadjikistan	Tadjikistan	Préfaisabilité	Inactif	1 088,0	0,4	4,1	?	Ag, Pb

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

Tableau 4 - Les dix plus gros projets miniers de zinc dans le monde

##### a) Ozernoye (Ozernaya, Ozernyi, Nazarovskoe), Russie

Le projet Ozernoye d'Ozernaya Mining Company est situé en Russie à 200 km à l'Ouest du lac Baïkal, en république de Buriatie. Plus précisément, dans la commune de Ozernyi au sein du

district de Yeravninsky. Il est localisé dans le district minier d'Ozerninsky qui contient d'autres gisements polymétalliques similaires.

Le gisement stratiforme découvert en 1961 est circonscrit dans des roches volcano-sédimentaires du cambrien inférieur. Sa mise en place est syn-sédimentaire mais il a subi de nombreuses modifications métamorphiques et hydrothermales postérieures à sa mise en place. Celles-ci sont responsables de recristallisation par métamorphisme de contact ou de l'introduction de l'or et d'une partie du plomb à postériori. La paragenèse contient essentiellement : pyrite, sphalérite, galène, or, argent et sulfosels d'argent.

Ozernaya Mining Company est une co-entreprise détenue à part égale entre le russe MBC Resources (groupe Metropol) et le chinois China Nonferrous Metal Industry. Les installations sont toujours en construction et la production devrait démarrer progressivement lors de la seconde moitié 2023 pour atteindre une capacité de production de 8 Mt par an d'ici 2024. L'objectif premier étant la production d'un concentré de zinc et d'un concentré de plomb par le biais d'une usine de concentration avec broyage ultrafin (IsaMill) et flottation (cellule Jameson). Il semblerait que le minerai soit difficile à traiter car très fin mais la société bénéficie de l'aide de Glencore qui traite un minerai similaire dans sa mine de zinc de McArthur River (Australie)

Actuellement le projet Ozernoye (Figure 42) est l'un des plus grands gisements de zinc en cours de développement avec un volume considérable de 135 Mt à 6,1% Zn, 1,2% Pb, 37 g/t Ag, et 0,016% Cd. D'autres sources indiquent une estimation JORC de 157 Mt à 5,2% Zn et 1% Pb, contenant également 25 tonnes d'or et 4 500 tonnes d'argent.



Figure 42: Installation minière d'Ozernoye (source : China Nonferrous Metal)

### **b) Dairi (Sopokomil), Indonésie**

Le projet Dairi de la société Dairi Prima Mineral est localisé en Indonésie dans la région montagneuse du Sumatra du Nord au voisinage du village de Sopokomil (Figure 43).

Dairi, découvert en 1997, contient deux corps minéralisés, Anjing Hitam et Jehe. Le premier est un gisement syn-sédimentaire stratiforme à plomb et zinc de type SedEx (SEDimentary

EXhalative) contenu dans des schistes noirs alors que le second est probablement de type MVT (Mississippi Valley Type) et est inclus dans des calcaires et dolomies. Anjing Hitam est la cible prioritaire de la mise en exploitation tandis que Jehe est toujours en cours d'évaluation. La paragenèse contient essentiellement : pyrite, pyrrotite, sphalérite, galène, quartz, dolomite et plus rarement feldspath potassique, calcite et barytine.

Le gisement est la propriété de Dairi Prima Mineral, issue d'un partenariat entre China Nonferrous Metal Industry (51 %) et Bumi Resources Minerals (49 %). Il contiendrait 25,1 Mt de ressources à 10,1 % Zn et 6 % Pb. L'exploitation devrait se faire exclusivement en souterrain à partir de galerie débouchant à flanc de montagne.

Initialement, le début de la production était prévu pour 2024, mais une importante opposition au projet s'est formée avec l'appui d'ONG. Les villageois sont, entre autres, inquiétés par la construction d'une digue à résidus sur une zone instable à moins d'un kilomètre des résidences dans ce secteur à très forte activité sismique. Des travaux de terrassement et de construction ont commencés, mais il est donc plausible que cette échéance soit repoussée.



Figure 43: Camp d'exploration de Dairi Prima Minerals à proximité du village de Sopokomil (source : China Nonferrous Metal)

### **c) Kvanefjeld (Kuannersuit), Groenland**

Le gisement de Kvanefjeld, exploré par la compagnie australienne Greenland Minerals Limited, est situé au Groenland dans le sud du pays à environ 8 km au nord de la ville de Narsaq (Figure 44).

Kvanefjeld est localisé dans le complexe alcalin d'Illimaussaq au sein d'un type particulier de syénite dénommée lujavrite. C'est l'un des plus importants gisements de terres rares et d'uranium au monde. Les ressources JORC sont de 1 013 Mt, avec 1,1% d'oxydes de terres rares, 0,24% Zn et 270 ppm U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> alors que les réserves sont de 108 Mt, 1,43 % d'oxydes de terres rares, 0,26 % Zn et 362 ppm U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Les volumes sont très importants, mais les teneurs en zinc sont faibles, celui-ci serait valorisé uniquement en tant que co-produit des terres rares. La minéralogie du gisement est très complexe, le porteur majoritaire des terres rares et de l'uranium est la

steenstrupine, le zinc est contenu dans la sphalérite, ceux-ci sont accompagnés par la fluorite et les minéraux de gangue tels que l'arfvedsonite, l'albite et les feldspathoïdes.

Le gisement étant situé à faible profondeur, il serait exploité à ciel ouvert ce qui implique la construction d'une fosse à stérile de grand volume. Plusieurs autres gisements satellites sont connus dans ce secteur dont Sørensen au sud-est et Zone 3 à l'est.

La compagnie espérait pouvoir débiter la construction de la mine fin 2021 après réception du permis d'exploitation. Mais, suite à l'organisation de réunion publique, une opposition locale s'est formée autour de la peur d'une pollution radioactive mise en avant par les ONG. Ce qui mena à la victoire aux élections législatives de 202X d'un parti politique anti-uranium. Après ce succès législatif, le parlement groenlandais a voté une loi bannissant l'exploitation et l'exploration de tout gisement contenant plus de 100 ppm d'uranium, gelant de fait le développement du gisement Kvanefjeld.

Greenland Minerals Limited serait en train de modifier sa demande d'exploitation pour réduire son impact radiologique en excluant l'extraction d'uranium. Un retournement de situation est également envisageable en cas de remontée de l'indépendantisme dans le pays lors de prochaines élections.



Figure 44: Camp d'exploration à Kvanefjeld (source : Greenland Minerals)

#### **d) Aripuana, Brésil**

Le projet Aripuana de Nexa Resources, est situé à Serra do Expedito, à environ 25 km d'Aripuana, dans le nord-ouest de l'État du Mato Grosso au Brésil (Figure 45).

Le site comporte trois zones minéralisées, à savoir Arex, Link et Ambrex, ainsi que d'autres corps minéralisés annexes. Le gisement est décrit comme un ensemble de lentilles stratiformes de sulfures massifs volcanogènes. Elles sont localisées dans une unité volcanosédimentaire, au contact stratigraphique entre des volcanites felsiques et des sédiments. Celles-ci ont par la suite été fortement plissées et métamorphisées au faciès schiste-vert. Les ressources minérales du gisement sont de 71,1 Mt à 3,3% Zn, 1,2% Pb, 0,3% Cu, 33g/t Ag et 0,5g/t Au.

Les trois lentilles seront exploitées concomitamment et exclusivement en souterrain par la combinaison de deux méthodes d'exploitation (verticale et horizontale) en fonction de la géométrie des corps minéralisés. Ces méthodes permettraient un remblayage des travaux avec les stériles et résidus miniers.

La construction de la mine est en cours de finalisation et la production devrait commencer à la fin du premier trimestre 2022.



Figure 45: Installation de la mine Aripuanã (source : Nexa Resources)

**e) Buenavista (Cananea), Mexique**

Le projet Buenavista zinc, est situé à proximité de la ville de Cananea, dans l'état de Sonora au Mexique (Figure 46). Plus précisément, il est localisé au sein même des infrastructures de la mine de cuivre et molybdène de Buenavista del Cobre, propriété de la société Southern Copper. C'est un gisement de zinc et de cuivre adjacent à la mine de cuivre et molybdène du même nom.

La mine de cuivre de Buenavista est l'une des plus grandes au monde. C'est un immense porphyre cuprifère avec plus de 8 500 Mt de réserves à 0,4% Cu et 0,003% Mo. Le gisement de zinc quant à lui est un skarn situé au nord-ouest du gisement de cuivre. Il contient 102,6 Mt de ressource à 1,9% Zn, 0,5% Cu et 17 g/t Ag.

Les travaux consistent essentiellement en la construction d'un nouveau concentrateur permettant de produire 80 000 tonnes de zinc et 20 000 tonnes de cuivre par an. L'ensemble des permis ayant été obtenus et les travaux d'ingénierie étant validés, la construction a commencé et devrait se terminer d'ici fin 2022- début 2023.



Figure 46: Mine de cuivre à ciel ouvert de Cananea lors de la construction d'une nouvelle unité de concassage (source : Grupo México)

#### **f) Prairie Creek (Cadillac), Canada**

Le projet Prairie Creek, propriété de la société canadienne NorZinc, est situé dans une enclave au sein de la réserve du parc national de Nahanni dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada à approximativement 550 km à l'ouest de Yellowknife (Figure 47).

Ce gisement a la particularité d'avoir été découvert en 1928 et de ne jamais avoir été mis en production. Plusieurs sociétés se sont succédées sur le site, effectuant de nombreux travaux d'exploration et d'infrastructure, y compris en souterrain. Le gisement a manqué d'être mis en exploitation par Procan Exploration Company en 1982. Inopportunistement, l'effondrement du cours de l'argent a entraîné la faillite de la société qui avait déjà construit sur place l'usine de concentration et le bassin de résidus.

Plusieurs types de corps minéralisés à Pb-Zn sont présents dans ce secteur, les deux principaux étant un filon de quartz-carbonate et des lentilles de sulfures lités ou massifs, syn-sédimentaires de type SedEx. La minéralogie est simple avec la présence de pyrite, sphalérite, galène accompagnées par des sulfosels (tennantite-tétraédrite porteur de l'argent) dans une gangue à quartz, calcite et dolomite. Les ressources de ce gisement sont de 16,2 Mt à 11 % Zn, 8 % Pb et 144 g/t Ag.

Les travaux seraient exclusivement réalisés en souterrain principalement par la méthode descendante des sous-niveaux foudroyés. Une fois exploités, les vides seront remplis avec les résidus de flottation épaissis pour diminuer l'impact de surface de l'exploitation. NorZinc prévoit la réutilisation d'une partie des installations de traitement préexistantes sur le site.

Le début de la production initialement prévu pour 2023 a été repoussé à 2024. En effet, fin 2021, à la surprise générale, une des populations autochtones a demandé un délai supplémentaire pour

décider si le projet nécessitait ou non la réalisation d'une nouvelle étude environnementale. Celle-ci est nécessaire à l'obtention des permis d'utilisation de l'eau et d'occupation des terres.



Figure 47: Aperçu des installations minières historiques de Prairie Creek (source : NorZinc)

#### **g) Corani, Pérou**

Le projet Corani de Bear Creek Mining est localisé au Pérou, à 30 km à l'est de la ville de Macusani, dans la province de Carabaya, sur la partie orientale de la cordillère des Andes (Figure 48).

Le gisement de Corani est décrit comme un gisement épithermal neutre ou faiblement acide à argent, plomb et zinc. La minéralisation est essentiellement composée de freibergite, galène, sphalérite, pyrite, marcassite et des sulfosels d'argent accompagnés d'une gangue à quartz, barytine et céladonite. Une importante altération hydrothermale à illite, kaolinite et smectite affecte les tufs volcaniques encaissants.

Les ressources minérales sont de 376,5 Mt à 39 g/t Ag, 0,5 % Pb et 0,3 % Zn. Les teneurs en métaux de base étant faibles, la compagnie considère ce gisement comme un gisement d'argent avec plomb et zinc en coproduits. Plus au sud, dans la continuité de la zone minéralisée, la compagnie signale la présence d'or et également d'antimoine. Néanmoins, Bear Creek indique que les teneurs en or sont trop erratiques pour prévoir une exploitation.

L'ensemble des permis nécessaires à la construction de la mine ayant été obtenu, seule la décision d'investissement est en attente. Le projet semble être très bien accepté par les populations locales et également par les institutions péruviennes. Certains consultants prédisent une ouverture pour 2024, mais la compagnie n'a pour l'instant annoncé aucune date de démarrage des travaux.

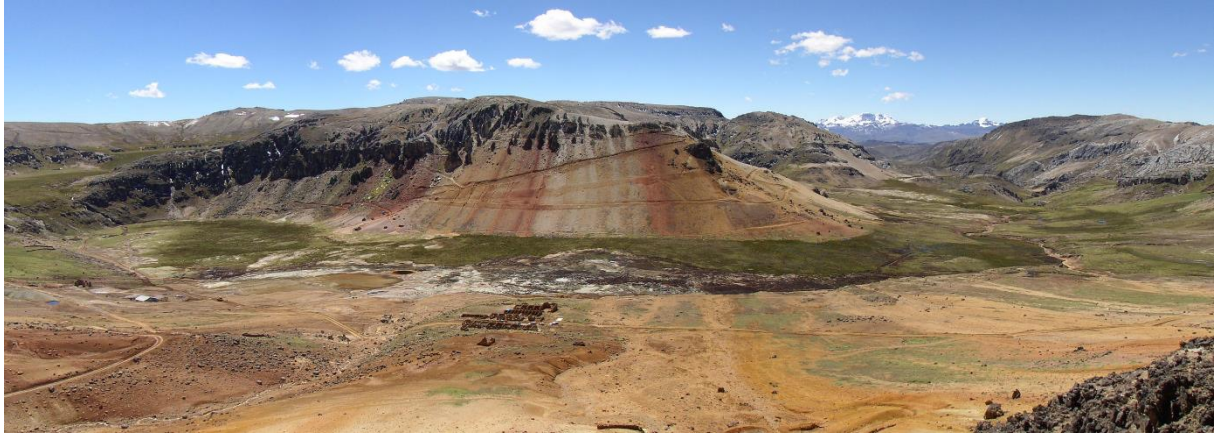


Figure 48: Panorama de l'extension nord du gisement de Corani (source: Bear Creek Mining)

#### **h) Horne 5, Canada**

Le gisement d'or de Horne 5, développé par Falco Resources est situé dans la ville de Rouyn-Noranda au Québec (Canada). Ce gisement est la continuité en profondeur du gisement Horne historiquement exploité par Noranda Mines (1926-1976) sur lequel s'est par la suite installé la fonderie Horne, propriété de Glencore (Figure 49).

Horne est un gisement polymétallique de type sulfure massif volcanogène (VMS) localisé dans la ceinture de roche verte de l'Abitibi. La minéralisation est mise en place sur des coulées de rhyolites massives et son toit est composé de tuf rhyolitique. La minéralogie est simple avec la présence de pyrite, sphalérite, chalcopryrite ainsi que pyrrhotite et or. Ce gisement est développé verticalement sur plus de deux kilomètres et horizontalement sur 500 à 800 m.

Les ressources sont de 130 Mt à 0,8 % Zn, 0,2 % Cu, 15,6 g/t Ag et surtout 1,5 g/t Au. De par son contenu en or équivalent, le gisement est considéré de taille mondiale (> 100 tonnes d'or contenu).

Les infrastructures de la mine réutiliseront les infrastructures souterraines existantes et en particulier le puit d'accès de la mine Quémont 2 localisé à moins d'un kilomètre au nord du gisement. La mine ne nécessitera pas la création d'un nouveau parc à résidus, car les déchets seront majoritairement remblayés en souterrain et l'excédent déversé dans le parc préexistant de la mine Norbec. La présence sur site de la fonderie Horne est un avantage considérable, car celle-ci rachètera directement les concentrés de cuivre et zinc produits et les coûts de transport seront faibles.

La société espère obtenir l'ensemble des fonds et des permis nécessaires à la construction de la mine en 2022. Le dénoyage des différentes mines devrait prendre approximativement 2 ans. Le début de l'exploitation de la mine est ainsi envisagé pour 2025.





Figure 49: Futur site de construction des installations de la mine Horne 5 (source : [miningweekly.com](http://miningweekly.com))

#### **i) Jabali, Yémen**

Le projet Jabali de la société Ansan Wikfs Investments est situé au Yémen à 110 km à l'est de la capitale Sana'a (Figure 50). Le gisement qui porte les traces d'une exploitation artisanale ancienne a été redécouvert dans les années 80. Le projet est actuellement à l'arrêt.

Le gisement, de type MVT, est localisé dans des calcaires jurassiques dolomités. Il a comme particularité d'être très fortement oxydé. La minéralisation primaire sulfurée à galène, sphalérite, pyrite et marcassite a été massivement remplacée par une minéralisation secondaire carbonatée à smithsonite, hydrozincite, cérusite et goethite/hématite. Les ressources sont de 10,5 Mt à 9,3 % Zn, 0,2 % Pb et 12 g/t Ag

La société ZincOx Resources, propriétaire majoritaire du gisement lors de son développement, prévoyait une production annuelle de 700 kt d'oxyde de zinc (> 79 % Zn) à destination des producteurs de peinture et de céramique. La méthode pyrohydrométallurgique employée, nécessite différentes étapes de grillages, lixiviation, purification et précipitation. Dans un second temps, l'ouverture d'une usine de récupération de l'argent était envisagée, une fois la capacité nominale de l'usine de zinc atteinte.

En 2010, l'usine de concentration a été construite et les premiers travaux de découverte et creusement de la mine à ciel ouvert ont débuté. Malheureusement, suite à la dégradation de la situation politique et sécuritaire du pays, l'exploitation est rapidement arrêtée. Par la suite, en 2013, la société exploitante ZincOx revend l'ensemble de ses parts dans le projet à son associé yéménite Ansan Wikfs. La situation actuelle de la mine est inconnue et le contexte géopolitique présent ne permet pas d'envisager une réouverture prochaine.



Figure 50: Aperçu des installations minières de Jabali (source : Mondillo et al., 2011)

#### **j) Vares, Bosnie-Herzégovine**

Le projet Vares d'Adriatic Metals est situé en Bosnie-Herzégovine à environ 35 km au nord de Sarajevo et couvre plusieurs mines et prospects historiques (Figure 51). La compagnie y a récemment exploré deux gisements polymétalliques, Rupice et Veovaca.

Les corps minéralisés sont décrits comme des gisements de remplacement dans des carbonates. Un autre terme pour décrire ce type de gisements de haute température péri-intrusif est celui de manto. Les roches hôtes sont des sédiments triasiques de composition carbonatés ou détritiques tels que des grès ou des schistes. Les minéralisations sont des sulfures massifs mis en place au sein de brèches dolomitiques. La paragenèse minérale est constituée de sphalérite, galène, barytine, chalcopryrite, or, argent ainsi que divers sulfosels (tétraédrite, boulangérite, bournonite).

Les ressources JORC du gisement de Rupice sont de 12 Mt à 149 g/t Ag, 4,1 % Zn, 2,6 % Pb, 0,5 % Cu, 1,4 g/t Au, 25 % barytine et 0,2 % Sb. Celle du gisement de Veovaca sont de 7,4 Mt à 41 g/t Ag, 1,4 % Zn, 0,9 % Pb, 0,1 g/t Au et 13 % barytine.

Rupice étant considérablement plus riche, c'est à présent la cible prioritaire d'Adriatic Metals qui envisage une exploitation souterraine à un rythme de 800 kt par an. Dans un second temps Veovaca pourrait être exploité à ciel ouvert. Le procédé de flottation séquentielle actuellement envisagé permettra la production d'un concentré de zinc et d'un concentré à plomb et argent. Une partie des résidus seront utilisés pour le remblaiement des travaux souterrain.

Le permis d'exploitation a été obtenu début 2021 et la construction/réhabilitation des infrastructures est en cours. Le début de l'exploitation est prévu pour 2023. La société précise que la récupération ainsi que la purification de la barytine, initialement envisagée, a été repoussé faute d'acheteur.



Figure 51: Usine de traitement des anciennes mines de fer de Varès (source : Adriatic Metals)

#### IV.4. Recyclage

La Figure 52 présente le cycle de vie du zinc. La plupart du zinc, tel qu'il est utilisé aujourd'hui, provient d'une mine, sous la forme d'un concentré. Ce concentré est ensuite raffiné, puis transformé en produits de première transformation, principalement sous la forme d'acier galvanisé mais aussi combiné dans des alliages ou transformé sous forme de produits chimiques. Ces différents produits sont ensuite transformés et utilisés dans des biens de consommation pour de nombreuses applications comme la construction, le transport, l'industrie ou la santé et la nutrition. Ces biens constituent un stock utile évalué à environ 250 Mt de zinc dans le monde.

Une certaine quantité de zinc est perdue au cours du cycle à différentes étapes. Cependant plusieurs flux sont récupérables et c'est ce qui fera l'objet de cette partie.

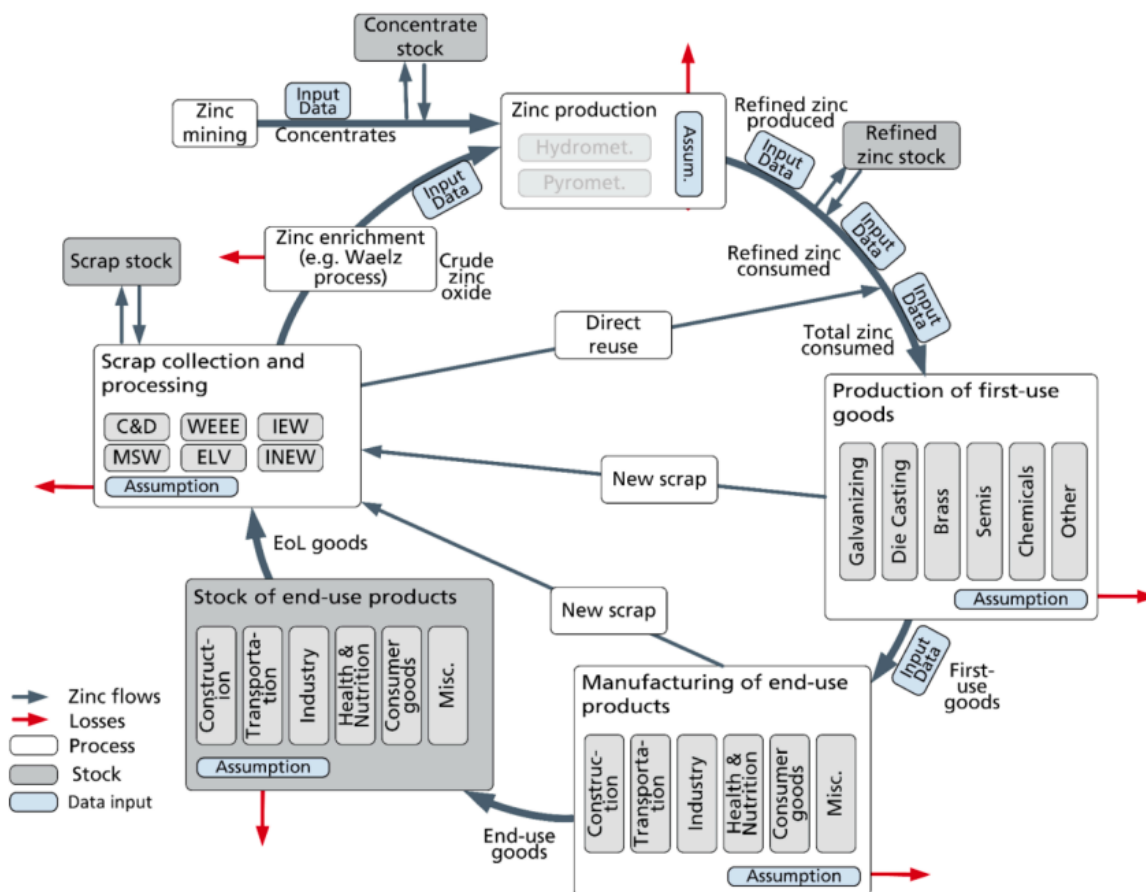


Figure 52: Schéma représentant le cycle de vie du zinc comprenant sa production, sa transformation, son utilisation, son recyclage et ses pertes (L. Rostek et al., 2022)

#### IV.4.1. Origine et nature des déchets

Afin de bien comprendre quels sont les différents types de déchets de zinc et de pouvoir étudier leurs récupérations et recyclages spécifiques, ceux-ci peuvent être séparés en trois catégories :

- Les rebuts issus de la production des produits de première utilisation (représentent environ 40 % de l'origine du zinc recyclé)
- Les rebuts issus de la production des biens finis (18 %)
- Les déchets correspondant aux produits en fin de vie (42%)

A noter que les deux premières catégories concernent les déchets générés lors du procédé de fabrication ou « new scraps ». Ils font opposition aux déchets en fin de vie, ou « old scraps ».

##### a) Déchets issus de la fabrication...

Les déchets générés lors de la fabrication des produits de première utilisation et des biens de consommation constituent la source la plus importante pour le recyclage. Environ 60 % du zinc recyclé provient directement de pertes et de récupérations au moment de la fabrication des produits de première utilisation et de la fabrication des produits finis. Pour donner un ordre de grandeur, cela représente environ 28 Mt de zinc recyclé entre 2010 et 2019.

##### ...des produits de première utilisation (rebut de fabrication)

Les déchets issus de la fabrication des biens de première utilisation représentent la plus grande part des déchets recyclés issus de la fabrication, de l'ordre de 19 Mt produites entre 2010 et 2019. Il s'agit par exemple des chutes de fabrication et de transformation, comme les résidus de galvanisation, les poussières et les cendres de fours, les débris de fonte et les chutes provenant de l'usinage des pièces en laiton.

Les déchets issus de la galvanisation de l'acier sont particulièrement importants. La galvanisation se fait en plongeant les pièces d'acier dans un bain de zinc liquide à environ 450°C soumis à un arc électrique. Cette étape génère des fumées, dont les teneurs en zinc peuvent atteindre 30 %. Le zinc pourra ensuite être récupéré sous la forme d'oxyde ZnO.

### **...des biens de consommation**

Les déchets issus de la fabrication des produits finis représentent la plus petite part des déchets recyclés issus de la fabrication, de l'ordre de 9 Mt produite entre 2010 et 2019. Il s'agit ici principalement de chutes d'usinage lors de la fabrication des pièces métalliques ou des objets. On peut prendre l'exemple de la découpe d'une pièce d'acier galvanisé qui va produire un déchet métallique.

#### ***b) Biens de consommation en fin de vie***

La grande diversité des usages du zinc rend son recyclage, dans son ensemble, difficile. Néanmoins, le contexte actuel (forte demande, prix élevés etc.) fait que le recyclage du zinc contenu dans les biens de consommation gagne en importance.

Le zinc contenu dans les biens de consommation en fin de vie se retrouve dans de nombreux usages : ferrures et raccords en laiton, pièces moulées sous pression en alliage de zinc, pièces en acier galvanisé provenant des automobiles, des appareils électroménagers, de composants électriques ou même provenant de la déconstruction d'infrastructures.

À noter que près de la moitié des produits en fin de vie contenant du zinc n'est pas recyclée. Il s'agit principalement de biens qui ne sont pas collectés et qui n'intégreront pas les filières de recyclage, comme les décharges sauvages par exemple.

Cependant, même dans la part des biens de consommation qui intègre les filières de recyclage, une partie non négligeable du zinc contenu est perdue. Ces pertes représentent 16 % des pertes totales de zinc dans le cycle, en raison des imperfections dans le tri ou la non-séparation du zinc inclus dans les éléments « non métalliques ». La récupération du zinc peut présenter un intérêt moindre dans le cas du recyclage d'un objet multi-métaux, le recycleur privilégiant d'autres métaux plus intéressants car plus faciles à récupérer ou plus chers à la revente.

#### ***c) Perte par diffusion pour les usages***

La perte par diffusion ne constitue pas un déchet en tant que tel, puisque c'est cette diffusion qui est recherchée (diffusion dans les sols sous forme de fertilisants, diffusion dans les êtres vivants pour la nutrition etc.). Néanmoins, cette diffusion constitue un flux sortant dans le cycle, et ces utilisations du zinc qui sont par nature dissipatives et ne permettent donc pas de récupération. Il peut y avoir aussi des pertes lors de l'usure de certains composants en acier galvanisé par exemple des processus de corrosion, frottements, abrasion etc. Environ 21 % des pertes de zinc se font par dissipation.

#### IV.4.2. Procédés de recyclage

Contrairement à de nombreux autres métaux, il n'existe pas de technologie unique de recyclage. Cependant, des technologies de recyclage sur mesure sont bien établies pour les utilisations les plus importantes du zinc.

- Les tôles de zinc et les pièces moulées sous pression en zinc sont refondues. A titre d'exemple, plus de 95 % des déchets de tôles de zinc sont recyclés en Europe. La refonte du zinc ne nécessite que 5 % de l'énergie nécessaire à la production de zinc primaire à partir de minerais ;
- L'acier galvanisé est fondu dans l'industrie sidérurgique, notamment dans les fours à arc électrique (FAE). 11 % des déchets d'acier provenant du bâtiment et de la construction sont réutilisés, comme en Allemagne, tandis que 88 % sont recyclés dans l'industrie sidérurgique. Toutes les poussières des FAE produites en Europe sont recyclées. Avec le développement des pays émergents, une croissance significative de l'utilisation de l'acier galvanisé à l'échelle mondiale est attendue ;
- Le zinc, en tant qu'élément d'alliage du laiton, est recyclé par l'industrie du cuivre. Il y est utilisé pour la production d'un nouveau laiton ou renvoyé dans la filière du zinc.

Diverses technologies sont utilisées pour recycler le zinc à partir de résidus, de déchets et de sous-produits. Dans ces boucles de recyclage, le zinc est souvent directement utilisé pour produire des composés zincifères sans passer par des fonderies, ce qui permet d'économiser des coûts, de l'énergie et des matières premières (Grund et al., 2019).

21 % du zinc à recycler repasse par une étape de raffinage (ordre de grandeur de 10 Mt entre 2010 et 2019) tandis que 80 % peut directement réintégrer la chaîne au moment de la fabrication de biens de première consommation (environ 42 Mt entre 2010 et 2019). Entre 6 % et 11 % de zinc entrant dans une ligne de raffinage provient du recyclage.

Le recyclage des différents alliages contenant du zinc ou de l'acier galvanisé se fait principalement par des procédés métallurgiques de fusion dans un haut-fourneau, convertisseurs et fours successifs, ce qui permet la séparation et la récupération des différents métaux. Le zinc se retrouve principalement dans les fumées issues de ces étapes de traitement.

A titre d'illustration, l'acier galvanisé est fondu dans l'industrie sidérurgique, par exemple dans un four à arc électrique spécifiquement dédié au recyclage ou directement dans la ligne de fabrication de l'acier. Le zinc se retrouve dans les poussières de combustion (poussières de FAE) et est encore concentré dans le procédé Waelz. L'oxyde brut Waelz est une matière première bienvenue pour la production de zinc primaire à un coût inférieur à celui des concentrés, son utilisation étant souvent limitée par le tonnage disponible. D'autres technologies potentielles pour le recyclage du zinc à partir de l'acier galvanisé sont testées en usine pilote ou en phase conceptuelle incluant la lixiviation avec de l'acide sulfurique, lixiviation caustique, lixiviation au chlore ou traitement par réduction et évaporation dans le four de Waelz. Ces traitements sont complétés par une extraction électrolytique pour générer le zinc métallique.

Le processus de réduction dans le four Waelz est pratiqué commercialement et environ 83 % des fumées sont recyclées par cette méthode à l'heure actuelle. Cependant, dans le but de réduire les dépenses énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub>, ainsi que de la nécessité d'un traitement ultérieur du produit de zinc impur généré, cette approche ne semble pas durable. Les meilleures options sont la lixiviation caustique et la chloration sélective. Le choix des techniques utilisées dépendra aussi de la composition des aciers et de la présence d'autres métaux dans les ferrailles.

#### IV.4.3. Part du recyclage dans le cycle

Le zinc peut être recyclé de manière économique et sans perte de ses propriétés physiques. Cette propriété intrinsèque contribue à assurer la collecte et la récupération. En moins de dix ans - de 2010 à 2018 - le recyclage du zinc a doublé, en partie en raison de l'augmentation des réglementations et des mesures d'application visant à promouvoir le recyclage des poussières de FAE en Europe, en Amérique du Nord et en Chine. En outre, environ 250 Mt de zinc sont actuellement retenues dans le stock utile et seront disponibles pour le recyclage à l'avenir.

Aujourd'hui, environ un peu moins d'un tiers de la production mondiale de zinc provient de zinc recyclé. Comme illustré en Figure 53, si l'on considère la période entre 2010 et 2019, quelques 50 Mt de zinc ont été recyclées dont environ 42 % provenait du recyclage des équipements en fin de vie, 40 % des rebuts de fabrication des produits de première utilisation et 18 % des rebuts de fabrication des biens de consommations.

Considérant la valorisation du zinc contenu dans les équipements en fin de vie, seules 21 Mt ont été récupérées entre 2010 et 2019 sur les 95 Mt de zinc contenus dans ces déchets. Cela correspond à une perte de près de 77 % du zinc contenu dans les équipements en fin de vie. Cela étant, la collecte et le recyclage du zinc contenu dans les équipements en fin de vie se sont améliorés puisque le taux de recyclage atteint aujourd'hui environ 34 %.

Les taux de recyclage du zinc contenus dans les rebuts de fabrication sont de l'ordre de 80 %. Ces rebuts sont en général bien récupérés et recyclés par les industriels et fabricants.

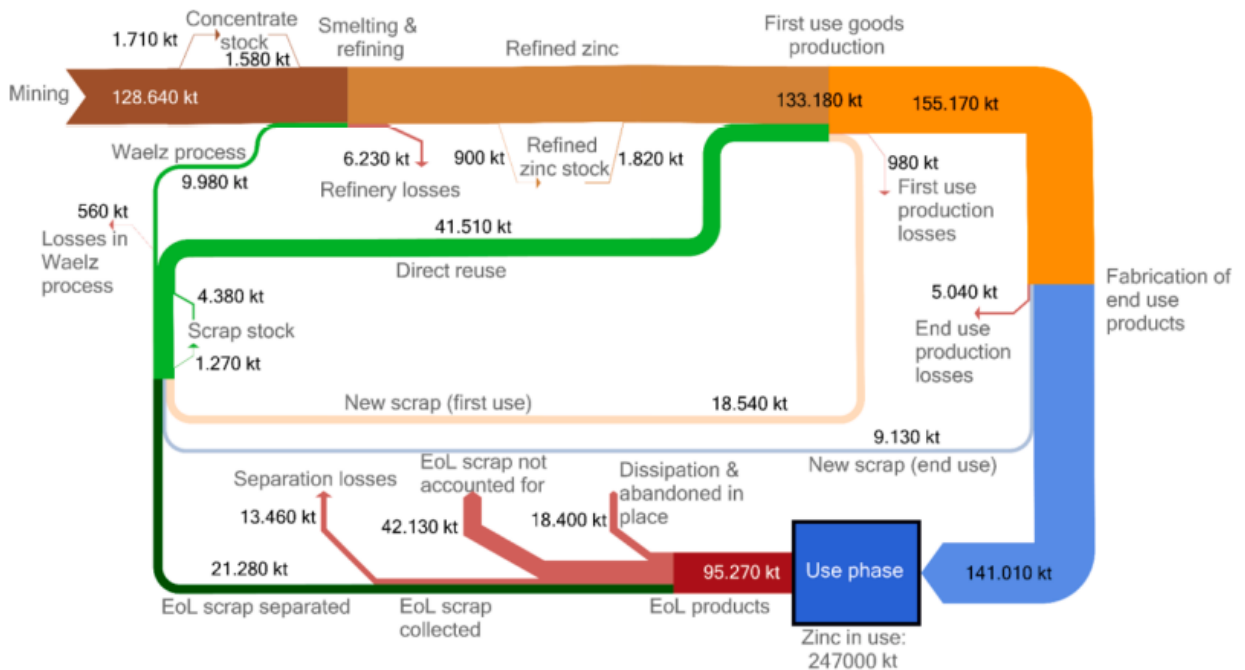


Figure 53: Diagramme de Sankey présentant les flux globaux de zinc entre 2010 et 2019 en kt (L. Rostek et al., 2022)

Selon la fiche technique « Zinc recycling 2050 Demand and Supply » publiée par l'International Zinc Association (IZA), 6,5 Mt de zinc sont aujourd'hui recyclées chaque année dans le monde, soit deux fois plus qu'en 2000. Cette quantité inclut 1 Mt provenant des rebuts de fabrication des

produits finis, 2 Mt provenant des rebuts de fabrication des produits de première utilisation et 3,5 Mt des produits en fin de vie.

L'organisation a évalué l'évolution de la quantité de zinc recyclé selon deux scénarios, un premier, pouvant être qualifié de pessimiste et se basant sur une faible amélioration des procédés de recyclage, conduirait à recycler 9 Mt de zinc par an, tandis qu'un scénario plus optimiste sur les améliorations des procédés de recyclage permettrait d'atteindre plus de 14 Mt de zinc recyclé annuellement. Ce deuxième scénario prévoit une augmentation significative de la part du zinc recyclé provenant des produits en fin de vie. En effet, en 2020, le zinc recyclé provenait pour moitié des déchets en fin de vie, tandis qu'en 2050, la part serait plutôt autour de 65 %. Il y a donc un enjeu et un réel potentiel dans l'amélioration de la récupération et du recyclage du zinc contenu dans les biens de consommation en fin de vie.

### Durée de vie longue (plusieurs dizaines d'années) dans les stocks utiles

Environ 45 % du zinc produit par extraction minière depuis 1900 est toujours présent dans le stock utile, en particulier dans les produits à longue durée de vie pour des applications dans la construction et les infrastructures par exemple.

Selon l'International Zinc Association (IZA), le stock anthropique de zinc dans les produits utilisés devrait doubler, passant de 247 Mt en 2019 à 490 Mt en 2050.

D'une part, cette longue durée de vie bloque une grande quantité de zinc dans le cycle. Mais ce stock pourra constituer une réserve importante pour l'approvisionnement futur.

### IV.4.4. Principaux recycleurs : pays + entreprises

Les données présentées dans cette partie proviennent de l'International Lead and Zinc Study Group (ILZSG).

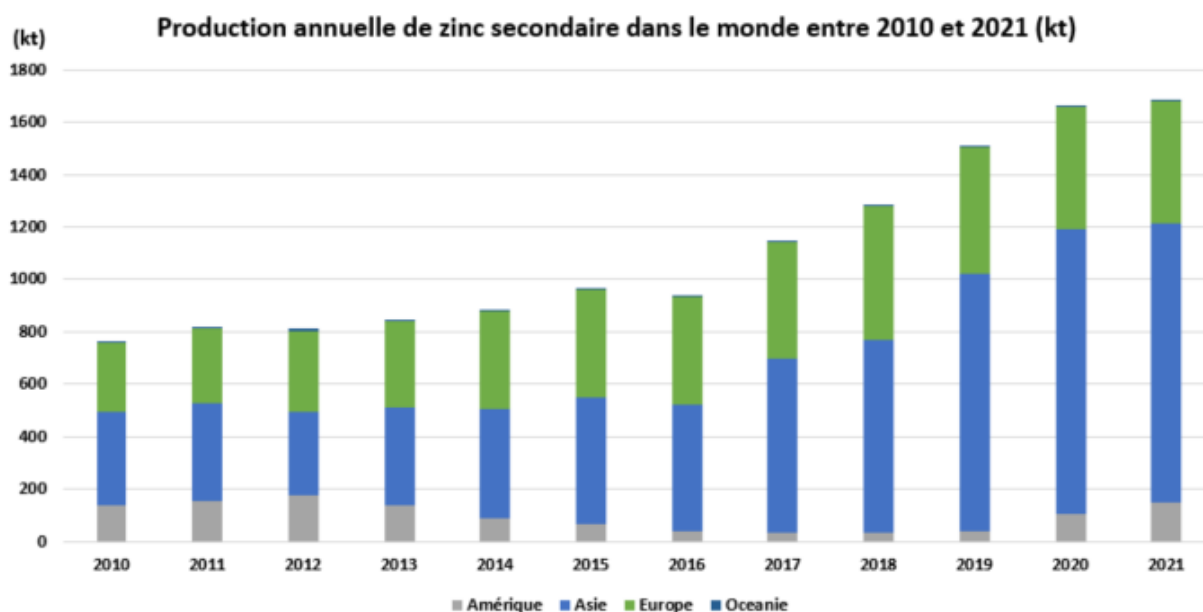


Figure 54: Graphique présentant la production secondaire de zinc raffiné par continent et par année entre 2010 et 2021 (source : ILZSG, 2022)



La Figure 54 présente la production secondaire de zinc raffiné par continent et par année entre 2010 et 2021. Le continent africain n'en produit pas, ou de façon négligeable. En 2010, la production secondaire de zinc raffiné s'élevait à 764 kt par an, en légère augmentation jusque 2016 pour atteindre 940 kt par an. Entre 2016 et 2020, la production secondaire de zinc raffiné a fortement augmenté pour atteindre quasiment 1,7 Mt en 2021. En particulier, la production du continent asiatique, qui représentait 47 % en 2010, représente aujourd'hui près de 65 % de la production mondiale. L'évolution des proportions par continent entre 2010, 2015 et 2020 est présentée dans les diagrammes de la Figure 55.

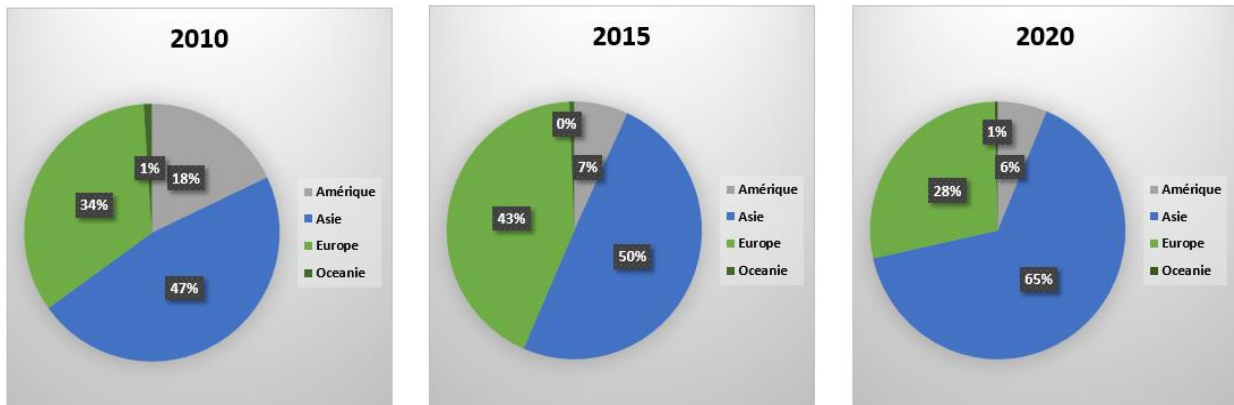


Figure 55: Proportion de la production mondiale de zinc raffiné secondaire par continent (source ILZSG)

Le diagramme présenté en Figure 56Figure 55 s'intéresse aux pays producteurs de zinc raffiné secondaire en 2021. 90 % de la production mondiale est répartie entre 10 pays, parmi lesquels la Chine représente à elle seule environ la moitié de la production mondiale. Les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et la Pologne sont des producteurs importants. La Chine et l'Allemagne ont augmenté leur production annuelle de zinc raffiné secondaire entre 2010 et 2021 passant de 181 kt à 850 kt pour le premier et de 20 kt à 114 kt pour le second

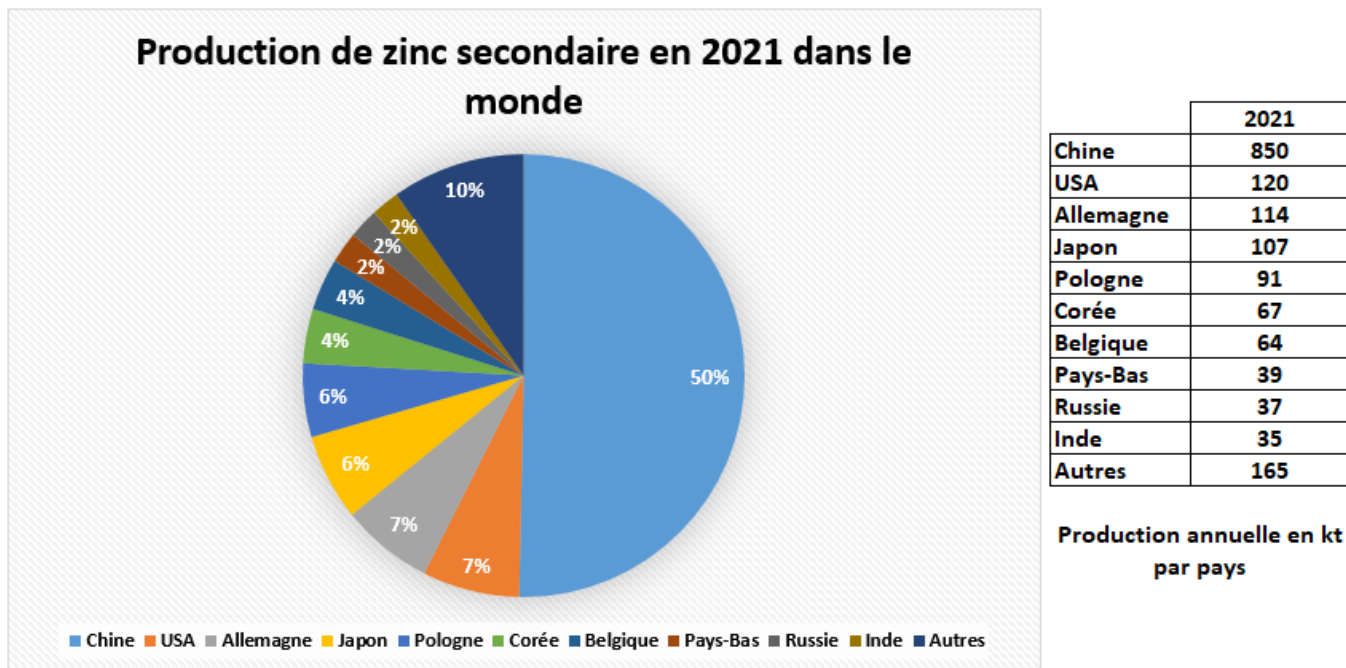


Figure 56: Diagramme présentant la part de la production secondaire de zinc raffiné dans le monde par pays en 2021 et tableau correspondant indiquant la quantité de zinc secondaire produite (en kt) par pays en 2021 (source ILZSG).

#### IV.5. Cours du Zinc

Le zinc est coté au London Metal Exchange (LME) en USD/tonne. Un degré de pureté de 99,95% est exigé pour que le zinc y soit éligible. La Figure 57 est un graphique montrant le cours du zinc entre 1960 et 2020. La tendance est plutôt à la hausse du prix sur la période avec un prix compris entre 500 et 1 000 \$/t dans les années 70, alors qu'il oscille ces dernières années entre 2 500 et 3 000 \$/t, en moyenne. L'augmentation du prix est d'ailleurs nettement plus forte entre 2000 et 2020, puisque le prix a été multiplié par plus de 4. Le cours du zinc est passé par un pic historique au cours de l'année 2006 atteignant 4 550 US\$ par tonne, pour rechuter à 1 100 US\$ par tonne en 2008 en conséquence de la crise des subprimes aux États-Unis. Au-delà de ces grandes tendances, le cours du zinc subit de fortes variations sur de courtes périodes. La Figure 58 suit le cours du zinc entre 2004 et 2022, en moyenne lissée sur 7 jours.

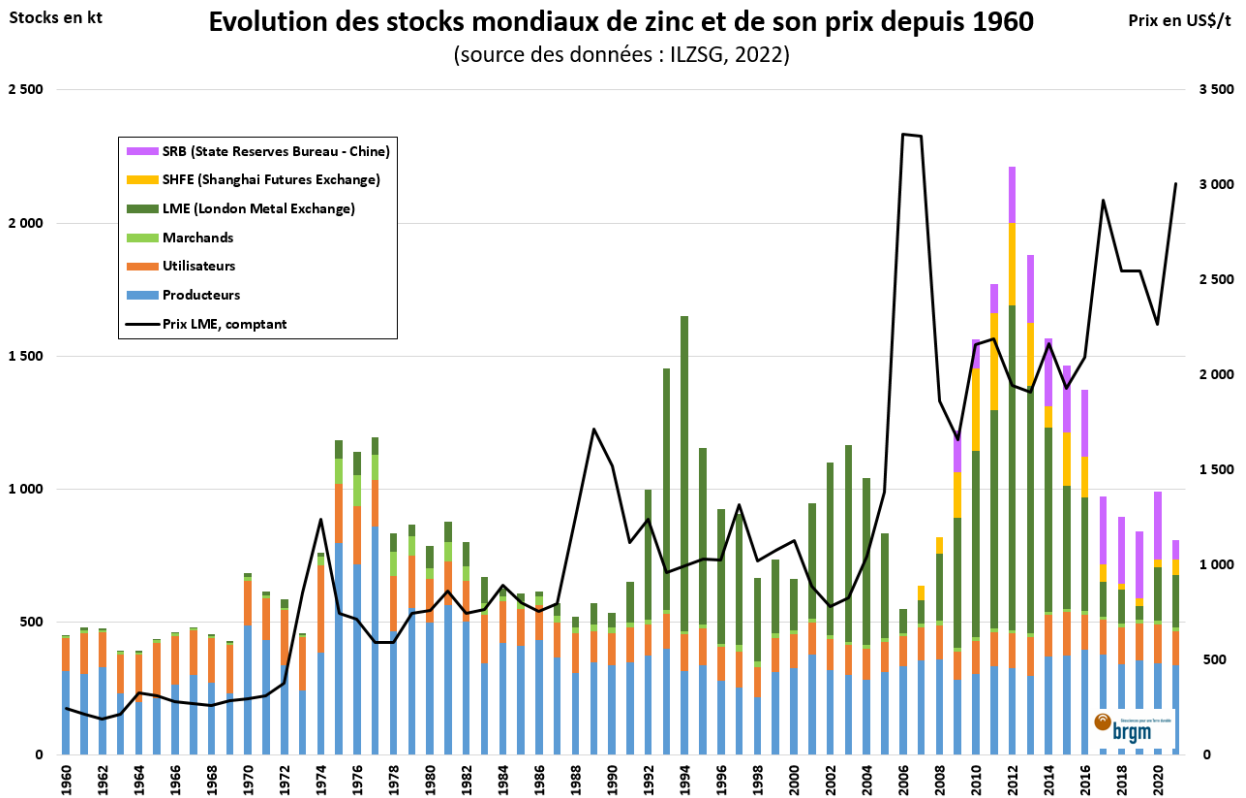


Figure 57 - Evolution des stocks et du cours du zinc entre 1960 et 2021

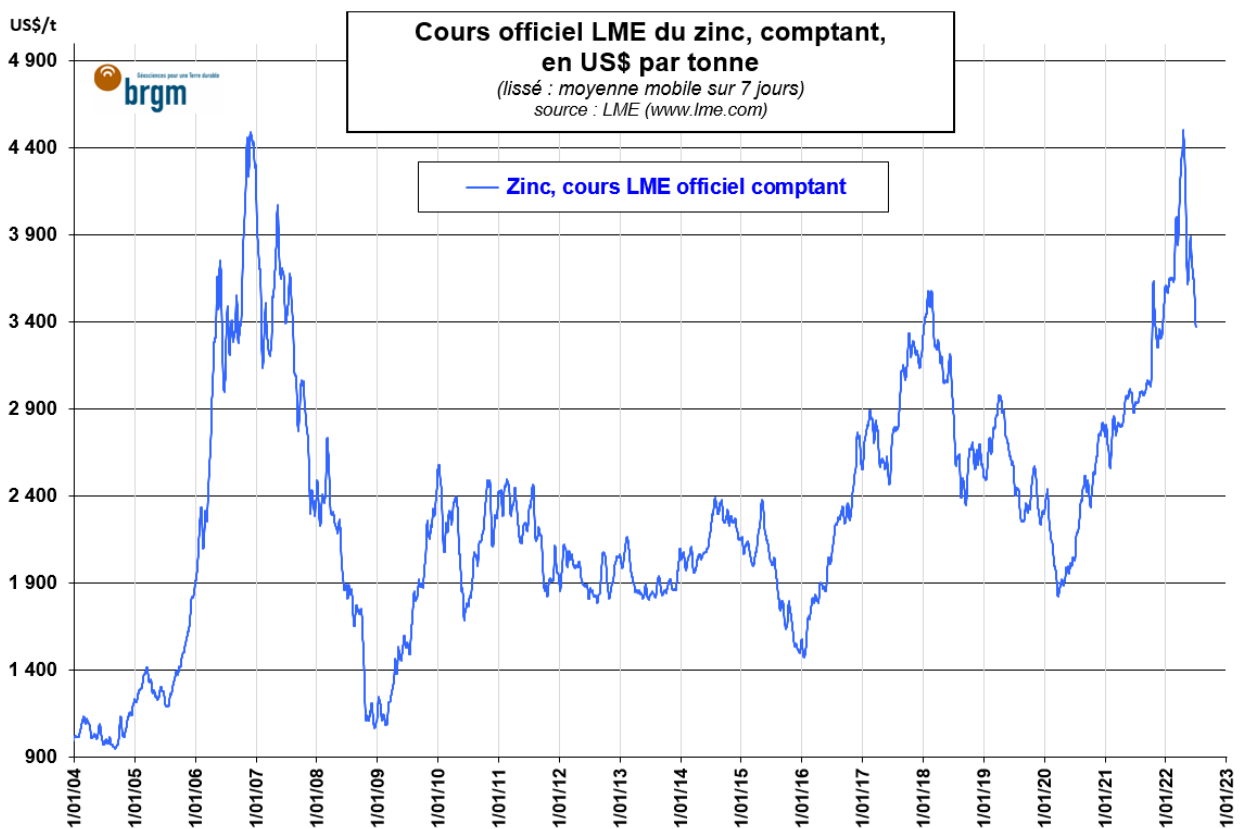


Figure 58 : Cours du zinc en US\$ par tonne entre 2004 et 2022, moyenne mobile sur 7 jours (source LME)

## **V. Focus sur l'Union européenne et la France**

Même si la France a été un important pays producteur de zinc par le passé, il n'y a plus de production primaire sur le territoire aujourd'hui. Selon les données de l'ILZSG, la production minière de concentré de zinc en 2021 en Europe a été de 715 kt (relativement stable sur les 10 dernières années). Les unités de production sont localisées principalement en Suède (ex : mines de Tara et Garpenberg exploitées par Boliden), au Portugal, en Irlande et en Espagne. La production primaire de zinc raffiné s'élève à 1 666 kt en 2021, son niveau le plus bas sur les 10 dernières années. Le raffinage est fait principalement en Espagne, en Irlande et aux Pays-Bas.

L'Union européenne a bien développé ses filières de recyclage de zinc puisqu'elle produit environ 430 kt de zinc raffiné secondaire en 2021, en nette augmentation depuis 10 ans, portées notamment par l'Italie, la Pologne et la Belgique.

Même si la production minière ne suffit pas à rendre l'Union européenne auto-suffisante pour son approvisionnement en zinc, la production de zinc raffiné et le recyclage lui permet d'être proche de l'équilibre puisque l'UE consomme environ 2 000 kt de zinc chaque année. Les plus gros consommateurs sont la Belgique, l'Allemagne et l'Italie.

## VI. Perspectives

En 2021, les ressources en zinc sont estimées à 1,9 Gt, soit 130 fois la production annuelle environ. La même année, les réserves minières ont été évaluées à 250 Mt. Ce chiffre est probablement sous-évalué puisque les entreprises minières ont suffisamment de réserves évaluées sur leur site de production pour ne pas avoir besoin d'en évaluer plus. Ces réserves sont d'ailleurs assez stables puisque depuis plusieurs années, les années de réserves connues correspondent à plus ou moins 20 ans de production annuelle, ce qui permet d'avoir une visibilité assez importante sur l'avenir et d'avoir une certaine stabilité du marché. Les ressources comme les réserves sont assez bien réparties tout autour du globe, dans différents pays. Une telle diversité de producteurs permet aussi de diminuer les incertitudes sur le marché, si par exemple l'un des acteurs est temporairement défaillant. Les principaux pays qui détiennent les ressources et les réserves sont l'Australie, la Chine, la Russie, le Mexique et le Pérou.

De nombreux projets sont en phase de faisabilité avancée ou de construction, encore une fois répartis dans différents pays sur tous les continents, tels que les projets Ozernoye en Russie, Dairi en Indonésie, Kvanefjeld au Groenland ou encore Aripuana au Brésil. Les dates de démarrage estimées sont comprises entre 2022 et 2025, ce qui permettra d'augmenter de quelques centaines de milliers de tonnes la production annuelle de zinc raffiné.

Même si beaucoup de pays produisant du concentré de zinc par extraction minières ont aussi les capacités de raffiner le zinc, le marché du raffinage est plutôt dominé par la Chine qui produit à elle seule près de la moitié du zinc raffiné mondial. Certains pays sont positionnés sur cette étape de transformation comme la Corée du Sud ou le Japon. Les procédés de transformation hydrométallurgiques ou pyrométallurgiques sont très énergivores, mais il est possible d'y intégrer le zinc à recycler (rebuts de fabrication ou produits en fin de vie) directement dans ces unités.

Le zinc est utilisé principalement pour la galvanisation de l'acier (50 % des usages totaux). Il confère aux aciers un caractère inoxydable. Malheureusement, il n'y a pas de procédés majeurs permettant de donner aux aciers une aussi bonne protection que par la galvanisation ce qui rend le zinc peu substituable dans cet usage. Les perspectives de développement économique de nombreux pays vont accroître la demande pour cet usage, en particulier pour les secteurs des infrastructures et des transports. Selon l'International Zinc Association, la consommation mondiale en zinc pourrait presque doubler d'ici 2050.

Une part de cette nécessaire augmentation de production pourrait provenir des nouveaux projets en phase de faisabilité, et l'autre part du recyclage. En effet, le stock utile de zinc est important et le potentiel d'amélioration est encore plus important, en particulier par la mise en place de meilleurs processus de collecte des déchets en fin de vie. Néanmoins, l'usage principal du zinc dans les infrastructures limite sa récupération pour le recyclage puisque la durée de vie de ces éléments peut aller de plusieurs dizaines d'années à plusieurs centaines.

Même si les prix connaissent une relative stabilité, la tendance est à l'augmentation générale du cours du zinc, comme pour de nombreux métaux. Cependant, une des difficultés dans l'estimation du prix futur réside dans la partie amont de la chaîne de valeur, notamment la production puisque le zinc est souvent un co-produit de substances telles que le cuivre ou le plomb. Une législation plus stricte, par exemple sur la consommation du plomb dans nos sociétés, pourrait limiter son usage et donc la rentabilité des gisements Pb-Zn, pouvant aller jusqu'à l'arrêt de leur exploitation, impactant du même coup la disponibilité mondiale de concentré de zinc et donc son prix.

Au-delà du développement des secteurs des infrastructures et des transports qui consomment du zinc pour la galvanisation, le développement de nouvelles technologies pour de nouvelles applications telles que les batteries ou les énergies offshore pourrait aussi entraîner une augmentation de la consommation en zinc dans un futur plus ou moins proche.

## VII. Bibliographie

**Bonnet, J.**, (2014) - Distribution et contrôle cristallographique des éléments Ge, Ga et Cd dans les sphalérites des gisements de type Mississippi Valley dans les districts de Central et East Tennessee, USA. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. 204 p.

**Boni, M., Large, D.**, (2003) - Nonsulfide Zinc Mineralization in Europe : An Overview. *Economic Geology* 98, 715-729.

**Borg, G., Kärner, K., Buxton, M., Armstrong, R., Van der Merwe, S.W.**, (2003) – Geology of the Skorpion Supergene Zinc Deposit, Southern Namibia. *Economic Geology* 98, 749-771.

**Borg, G.**, (2005) - Geological and economical significance of supergene non sulphide zinc deposits in Iran and their exploration potential. *20<sup>th</sup> World Mining Congress*, Tehran, 385–390.

**Bourgarit, D., Thomas N.**, (2012) – Le Laiton au Moyen Âge. *La Recherche n°468*, 62–64.

**Cardon, O.**, (2007) - Datation Re-Os sur pyrite et traçage des sources de métaux dans des gisements de type porphyre et épithermal neutre : Exemple des gisements de Bolcana, Troita et Magura, Monts Apuseni, Roumanie. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. 231 p.

**Charles, N., Choulet, F., Sizaret, S., Chen, Y., Barbanson, L., Ennaciri, A., Badra, L., Branquet, Y.**, (2016) – Internal structures and dating of non-sulphide Zn deposits using rock magnetism : insights from the Moroccan High Atlas. *Miner Deposita* 51, 151-175.

**Choulet, F., Charles, N., Barbanson, L., Branquet, Y., Sizaret, S., Ennaciri, A., Badra, L., Chen, Y.**, (2014) - Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas : Multi-scale characterization and origin. *Ore Geology Reviews* 56, 115-140.

**Christmann, P., Angel, J.-M., Bailly, L., Barthélémy, F., Benhamou, G., Billa, M., Gentilomme, P., Hocquard, C., Maldan, F., Martel-Jantin, B., Monthel, J., Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)**, (2010) – Panorama mondial 2010 du germanium. BRGM/RP-60584-FR, 54 p.

**Cole, P.M., Sole, K.C.**, (2002) - Solvent extraction in the primary and secondary processing of zinc. *J. South Afr. Inst. Min. Metall.* 102, 451–456.

**Corriveau, L.**, (2007) - Iron Oxyde Copper-Gold deposits: A canadian perspective. In Goodfellow, W.D. (ed.), *Mineral Deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological province and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 307-328.

**Dill, H.G.**, (2010) - The « chessboard » classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminium to zirconium. *Earth-Science Reviews* 100, 1-420.

**Edmond, J.M., Von Damm, K.L.**, (1983) - Hot springs on the ocean floor. *Scientific American* 248, 78-93.

**Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J.**, (1981) - Skarn deposits. *Economic Geology 75<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 317-391.

- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., Galley, A.G.,** (2005) - Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 523-560.
- Galley, A.G., Koski, R.A,** (1999) - Setting and characteristics of ophiolite-hosted massive sulfide deposits. *Reviews in Economic Geology* 8, 221-246.
- Gauthier, M., Chartrand, F.,** (2005) - Metallogeny of the Grenville Province revisited. *Canadian Journal of Earth Sciences* 42, 1719-1734.
- Gnoinski, J.,** (2007) - Skorpion zinc: optimization and innovation. *J. South Afr. Instrum. Min. Metall.* 107, 657–662.
- Gomes, G.L.,** (2016) - Spatial simulation of the W-Sn ore grades of Sao Pedro das Aguias skarn mineral deposit (Tabuaço, northern Portugal). Thèse de doctorat. Universidade nova de Lisboa. 102 p.
- Goodfellow, W.D., Lydon, J.W., Turner, R.,** (1993) - Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (sedex) Zn-Pb-Ag sulphide deposits. Geological Society of Canada Special Paper 40, 201–251.
- Heald, P., Foley, N.K, Hayba, D.O,** (1987). Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: Acid-sulfate and adularia-sericite type. *Economic Geology* 82, 1-26.
- Hékinian, R., Fouquet, Y.,** (1985) - Volcanisme and metallogenesis of axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13°N. *Economic Geology* 80, 221-243.
- Heyl, A.V., Bozior, C.N.,** (1962) - Oxidized zinc deposits of the United States, part 1. General geology. *U. S. Geol. Surv. Bull.* 1135-A, 52 p.
- Hitzman, M.W., Reynolds, N.A., Sangster, D.F., Allen, C.R., Carman, C.E.,** (2003) - Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Econ. Geol.* 98, 685–714.
- Hosseini, S.H.,** (2008) - Physicochemical Studies of Oxide Zinc Mineral Flotation. (dissertation) University of Technology, Luleå.
- Jébrack, M., Marcoux, E.,** (2008) - Géologie des ressources minérales. Société de l'Industrie Minérale, 667 p.
- Johnson, C.A., Skinner, B.J.** (2003), Geochemistry of the Furnace magnetite bed, Franklin, New Jersey, and the relationship between stratiform iron oxide ores and stratiform zinc oxide-silicate ores in the New Jersey Highlands. *Economic Geology* 98, 837–854.
- Kesler, S.E., Reich, M.H.,** (2006) - Precambrian Mississippi Valley-type deposits: Relation to changes in composition of the hydrosphere and atmosphere. In Kesler, S.E. and Ohmoto, H. (eds): Evolution of the Early Earth's Atmosphere, Hydrosphere and Biosphere-Constraints from Ore deposits. *Geological Society of London, Memoir* 198, 185-204.
- Klau, W., Large, D.E.,** (1980) - Submarine exhalative Cu-Pb-Zn deposits, a discussion of their classification and metallogenesis. *Geologische Jahrbuch* 40, 13-58.
- Kyle, J.R, Li, N.,** (2002) - Jinding: a giant tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China. *SEG Newsletter* 50, 9-16.



**Large, D.**, 2001 - The geology of non-sulphide zinc deposits — an overview. *Erzmetall* 54, 264–276.

**Large, R.R., McPhie, J., Gemmel, J.B., Hermann, W., Davidson, G.J.**, (2001a) - The spectrum of ore deposit types, volcanic environments, alteration halos and related exploration vectors in submarine volcanic successions : some examples from Australia. *Economic Geology* 96, 913-938.

**Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, G., Allen, C.R., Gutzmer, J., Walters, S.**, (2005) - Sediment-hosted lead-zinc deposits: a global perspective. *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 561-607.

**Lhermann, B., Stobbs, I.J., Lusty, P.A.J., Murton, B.J.**, (2018) - Insights into Extinct Seafloor Massive Sulfide Mounds at the TAG, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals* 8, 302.

**Lydon, J.W.**, (2004) - Genetic models for Sullivan and other SEDEX deposits. In Deb, M. and Goodfellow, W.D. (eds): Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits: attributes and models of some major deposits in India, Australia and Canada. *Narosa Publishing House*, 149-190.

**Lyons, T.W., Gellatly, A.M., McGoldrick, P.J., Kah, L.C.**, (2006) – Proterozoic sedimentary exhalative (SEDEX) deposits and links to evolving global ocean chemistry. In : Kesler, S.E., Ohmoto, H. (eds) - Evolution of the Early Earth's atmosphere, hydrosphere and biosphere-Constraints from ore deposits. Geological Survey of America, Memoir 198, 169-184.

**McGoldrick, P.J., Bull, S.W., Cooke, D.R., Large, R.R.**, (1998) - Northern Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted (sedex) Zn-Pb-Ag: Hobart, Tasmania. University of Tasmania, Centre for Ore Deposit Research Special Publication 2, 11–22.

**Meinert, L.D., Dipple, G.M., Nicolescu, S.**, (2005) - World skarn deposits. *Economic Geology 100<sup>th</sup> Anniversary Volume*, 299-336.

**Mudd, G.M., Jowitt, S.M., Werner, T.T.**, (2017) - The world's lead-zinc mineral resources: Scarcity, data, issues and opportunities. *Ore Geology Reviews* 80, 1160-1190.

**Murton, B.J., Lehrmann, B., Dutrieux, A.M., Martins, S., Gil de la Iglesia, A., Stobbs I.J., Barriga F.J.A.S, Bialas J., Dannowski A., Vardy, M.E, North, L.J., Yeo I.A.L.M., Lusty, P.A.J., Petersen, S.**, (2019) – Geological fate of seafloor massive sulphides at the TAG hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge). *Ore Geology Reviews* 107, 903-9325.

**Olivo, G.R., Monteiro, L.V.S., Baia, F., Slezak, P., Carvalho, I., Fernandes, N.A., Oliveira, G.D., Neto, B.B, McGladrey, A., Silva, A.M., Moura, M.A., Layton-Matthews, D.**, (2018) - The Proterozoic Vazante Hypogene Zinc Silicate District, Minas Gerais, Brazil: A Review of the Ore System Applied to Mineral Exploration. *Minerals* 8, 22.

**Paradis, S., Hannigan, P, Dewing, K.**, (2007) - Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits (MVT), in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 185–203.

**Petersen, S., Herzig, P.M., Hannington, M.D.**, (2000) - Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N. *Mineralium Deposita* 35, 233-259.

**Rostek L., Tercero Espinoza L.A., Goldmann D., Loibl A., (2022)** - A dynamic material flow analysis of the global anthropogenic zinc cycle: Providing a quantitative basis for circularity discussions. *Resources, Conservation and Recycling* 180, 106154.

**Rozendaal, A., Stadler, M., (2000)** - Stratabound Pb-Zn deposits of the Proterozoic in southern Africa. Field excursion guide book E6, Geocongress 2000, Stellenbosch, South Africa, University of Stellenbosch Department of Geology, 30–34.

**Sangster, D.F., (1990)** - Mississippi Valley-type and sedex lead-zinc deposits: A comparative examination. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Section B, 99:B21-B42.

**Stolojan, N., Viland, J.C.** avec la collaboration de Béziat, P., Bigot, M., Bormuat, M., Cortial, Ph., Lagny, Ph., Pouit, G., (1991) - Les gisements de plomb-zinc en France. Situation en 1991. Rapport BRGM/RP-37813-FR., 278 p.

**Takahashi, T., (1960).** Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone. *Econ. Geol.* 55, 1084–1115.

**Yesares, L., Drummond, D.A., Hollis, S.P., Doran, A.L., Menuge, J.F., Boyce, A.J., Blakeman, R.J., Ashton, J.H., (2019)** – Coupling Mineralogy, Textures, Stable and Radiogenic Isotopes in Identifying Ore-Forming Processes in Irish-Type Carbonate-Hosted Zn-Pb Deposits. *Minerals* 9, 335.

**Sites internet consultés (liens valides au moment de l'écriture du présent rapport) :**

Adriatic Metals (<https://www.adriaticmetals.com/>)

AS3M – MinéralInfo (<https://www.mineralinfo.fr/>)

Bear Creek Mining Corporation (<https://bearcreekmining.com/>)

Boliden (<https://www.boliden.com/>)

China Nonferrous Mining Corporation (<https://www.cnmccl.net/>)

Fabre Minerals (<https://www.fabreminerals.com/fine-mineral-specimens.php>)

Franklin Mineral Museum (<https://franklinmineralmuseum.com/>)

Galvazinc Association (<https://www.galvazinc.com/>)

Greenland Minerals (<https://ggg.gl/>)

GrupoMéxico (<https://www.gmexico.com/P>)

ILZSG - International Lead and Zinc Study Group (<https://www.ilzsg.org>)

LME – London Metal Exchange ([www.lme.com](http://www.lme.com))

Lundin Mining (<https://lundinmining.com/>)

Mindat.org (<https://www.mindat.org/>)

Mining History Association (<https://www.mininghistoryassociation.org/>)

Mining Weekly (<https://www.miningweekly.com/>)

Nexa Resources (<https://www.nexaresources.com/>)

Noranda Income Fund (<http://www.norandaincomefund.com/index.php>)

NorZinc (<https://norzinc.com/>)

S&P Global ([www.snl.com](http://www.snl.com))

Teck (<https://www.teck.com/>)

The Sterling Hill Mining Museum (<https://www.sterlinghillminingmuseum.org/>)

USGS – National Minerals Information Center (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/zinc-statistics-and-information>)



**Centre scientifique et technique**  
**Direction des g eoressources**  
3, avenue Claude-Guillemine

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – T el. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)