

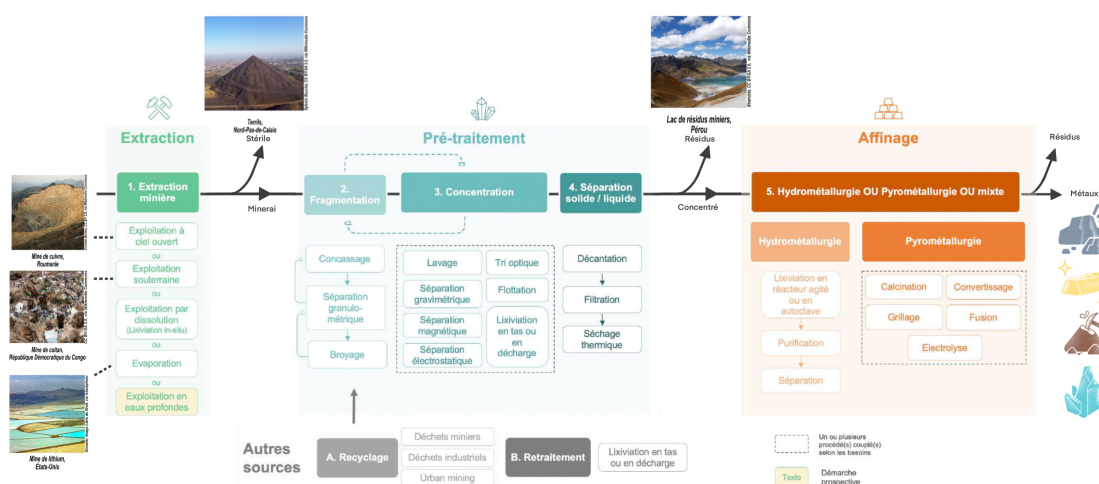
# La production des métaux

## Warning

Attention, cette fiche est en cours de rédaction

## Les grandes étapes de la production des métaux

- extraction
- minéralurgie
- métallurgie



Modélisation de la chaîne de valeur d'un minerai (RECORD n°22-0721/1A, 2022-2023)

Etude RECORD n°22-0721/1A

Précisions \* De nombreux métaux du numérique sont des **sous-produits**, c'est-à-dire qu'ils sont récupérés lors du traitement d'autres métaux. Par exemple, le gallium est un sous-produit de l'aluminium. \* NB : le cas du silicium

## I - L'extraction minière

### Qu'est-ce qu'une mine ?

En France, le **code minier** définit la distinction entre mines et carrières. On parle de mine lorsque le matériau extrait est considéré comme stratégique, et sinon, de carrière.

Précisions et source

*Les "mines" sont les exploitations, sous-terre ou à ciel ouvert, de gisements définis par une liste figurant dans le code minier (sel, minerais métalliques, gaz et énergies fossiles...). Tout autre activité terrestre d'extraction de minéraux est une "carrière". [...] D'une manière générale, les substances de mines se distinguent par une relative rareté à l'échelle nationale et une importance économique accrue, voire stratégique, qui justifie que leur gestion soit confiée à l'État et non laissée à la libre disposition du propriétaire du sol. Toutes les autres substances relèvent de la classe des carrières et sont laissées à la libre disposition du propriétaire du sol.*

Source : [Les mines en France. Mineral info](#)

## À quoi ça ressemble une mine ?

- mines à ciel ouvert vs mines souterraines

Même s'il existe de nombreuses mines **souterraines**, la majorité des mines actuelles sont exploitées à **ciel ouvert**.

Précisions et source

*L'exploitation minière à ciel ouvert est la méthode la plus couramment utilisée dans le monde pour l'extraction des minéraux : 57% des mines du monde sont exploitées à ciel ouvert en nombre, et 88% en production.*

Page 48 du rapport [Étude des risques environnementaux, socio-sociétaux et juridiques des approvisionnements en minerais stratégiques pour les transitions énergétique et numérique. Record. Septembre 2023](#)

## Minerai et teneur

- minerai = notion économique

Un **minerai** est une roche qu'on extrait pour obtenir, après plusieurs étapes de traitement, des métaux ou d'autres minéraux utiles.

Précision : le minerai peut parfois être sous forme de solution, cf lithium.

NB : Parfois le minerai lui-même a un nom (pas seulement "minerai de fer"), cf bauxite = minerai qu'on extrait pour produire l'aluminium et le gallium, coltan = minerai pour le tantale

La teneur moyenne varie beaucoup entre les différents métaux : environ 45% pour le fer (45g de fer pour 100g de minerai) mais seulement 0,00008% pour l'or (8g d'or pour 10 tonnes de minerai)

On exploite souvent plusieurs métaux dans une mine. Il existe par exemple de nombreuses mines produisant à la fois du cuivre et du zinc.

## Précisions et source

La Figure 2 du papier [Article By-product metals are technologically essential but have problematic supply](#), reproduite pour le malus [TODO], montre un certain nombre d'associations de métaux qui sont produits conjointement, les uns étant des sous-produits des autres.

On lit par exemple dans la table S1 des *Supplementary materials* du même papier que 2% de la production de cuivre est obtenue dans des mines qui exploitent principalement du zinc, et 4% de la production de zinc dans des mines qui exploitent principalement du cuivre.

Source : [L'élémentarium \(Société chimique de France, Education nationale\)](#)

## Co-produits, sous-produits

*Le gallium ne forme pas de gisements économiquement exploitables à l'état naturel, et provient en grande majorité de la filière de production d'aluminium (sous-produit du raffinage de la bauxite en alumine).*

Source : [Gallium \(Ga\). Mineral info](#)

Dans le cas général, on trouve une liste des métaux du système périodique qui sont principalement obtenus comme des sous-produits dans la Figure 1 du papier [Article By-product metals are technologically essential but have problematic supply, NT Nassar, 2015](#). Parmi ces métaux on trouve un grand nombre de métaux présents dans les smartphones, comme le cobalt, le germanium, le zirconium, l'indium, les terres rares...

## Extraction

video

L'extraction et les premières étapes de traitement du minerai (concassage et broyage) génèrent des poussières, sources de pollutions majeures des eaux et des sols.

*Une mine à ciel ouvert générera de grandes quantités de poussière contenant des métaux lourds. Tout d'abord, lors du forage et du dynamitage, se forment des nuages de poussière contenant des gaz et particules en suspensions et pouvant affecter la santé des populations locales. Ensuite, l'exploitation à ciel ouvert nécessite de nombreux transports quotidiens des minerais, la plupart du temps par camions, pour acheminer le minerai vers des zones de transformation. Les trajets génèrent des poussières [...].*

Pages 71-72 du rapport [Étude des risques environnementaux, socio-sociétaux et juridiques des approvisionnements en minerais stratégiques pour les transitions énergétique et numérique](#) publié en septembre 2023.

*Lors du processus de fragmentation d'importantes quantités de poussières sont produites par le concassage et le broyage des minerais. [...] Les poussières peuvent se déplacer par voie éolienne, et l'envol de poussières, à partir d'un dépôt de résidus minier ou du minerai mis à nu dans une mine à ciel ouvert peut être à l'origine de la contamination des sols après dépôt et accumulation des poussières.*

Page 82 du même [rapport](#)

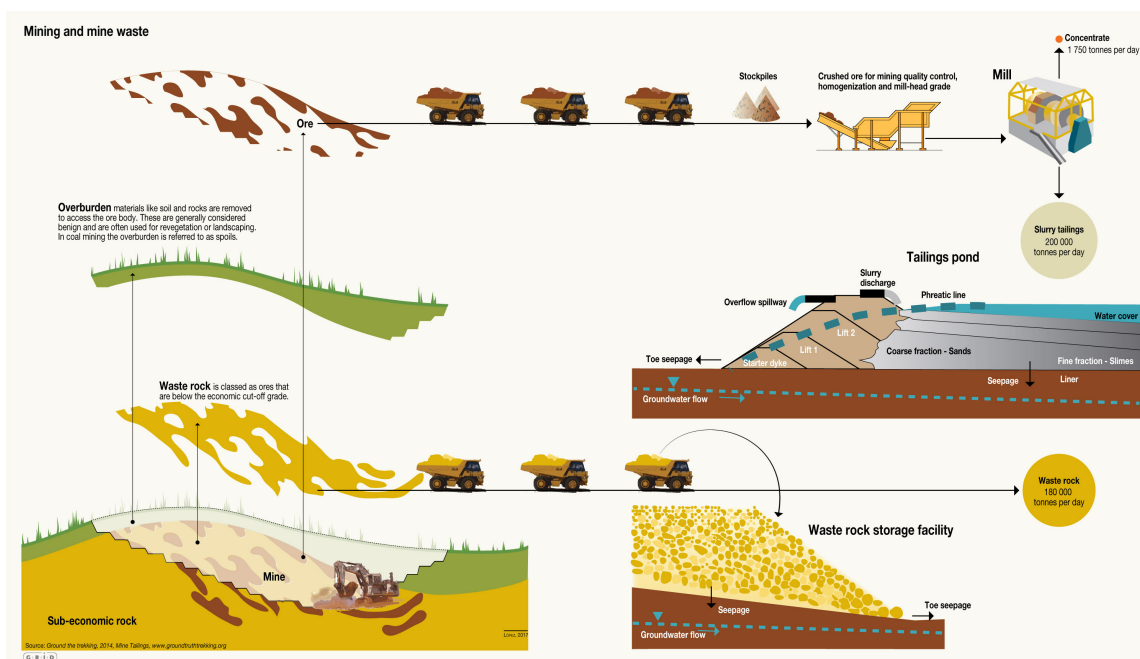
Il est intéressant de noter la difficulté à réduire les poussières tout en maîtrisant la consommation d'eau des sites miniers, comme illustré par le discours commercial de cette entreprise spécialisée dans la fabrication de polymères hydrosolubles :

*L'eau est nécessaire pour la suppression des poussières sur les routes de transport et les équipements de concassage et de transport. De grandes quantités d'eau sont utilisées quotidiennement, ce qui représente une perte nette puisque cette eau s'évapore. Les résidus sont une source majeure d'émissions de poussières, qui pourraient avoir un impact sur la santé des communautés voisines en raison de l'impact de poussières non contrôlées dans l'environnement.*

Source : [Lutte Contre la Poussière. SNF](#)

## Stériles

On appelle **stériles miniers** les roches qu'il faut extraire pour accéder au minerai.



<https://www.grida.no/resources/11415>

Un **terril** est une colline artificielle formée par l'accumulation de stériles ou de résidus issus de l'exploitation d'une mine.

## Co-produits, sous-produits

Les mines d'or contiennent souvent naturellement du mercure et de l'arsenic, dangereux pour la santé et l'environnement.

*Du mercure est souvent présent dans les gisements de zinc, plomb, cuivre, argent et or.*

Source : [L'élémentarium \(Société chimique de France, Education nationale\)](#)

*On distingue l'or libre, inclus ou non dans d'autres minéraux, de l'or associé à des sulfures de fer [...], de l'or associé à des sulfures d'arsenic [...] ou d'antimoine [...].*

Source : [L'élémentarium \(Société chimique de France, Education nationale\)](#)

Le mercure et l'arsenic font partie des métaux lourds, cf malus [9].

*Toxiques pour tous les êtres vivants sous leur forme oxydée, ils n'ont aucun rôle bénéfique et s'accumulent dans les chaînes alimentaires (bioaccumulation).*

Source : [Métaux lourds : cadmium, mercure et plomb. Commissariat général au développement durable. Juillet 2019](#)

Pour les dangers que représentent le mercure et l'arsenic pour la santé, voir les fiches détaillées de l'OMS :

- [Fiche sur le mercure](#)
- [Fiche sur l'arsenic](#)

Les mines de zinc contiennent souvent naturellement du mercure, de l'arsenic et du plomb, dangereux pour la santé et l'environnement.

*Du mercure est souvent présent dans les gisements de zinc, plomb, cuivre, argent et or.*

Source : [L'élémentarium \(Société chimique de France, Education nationale\)](#)

*Dans les minerais, le zinc est très souvent associé à Pb [plomb] et Cd [cadmium] ainsi qu'à Fe [fer], Cu [cuivre], Bi [bismuth], Sb [antimoine], As [arsenic], Ge [germanium], In [indium], Ag [argent], Au [or]...*

Source : [L'élémentarium \(Société chimique de France, Education nationale\)](#)

Le mercure, l'arsenic et le plomb font partie des métaux lourds, cf malus [9].

*Toxiques pour tous les êtres vivants sous leur forme oxydée, ils n'ont aucun rôle bénéfique et s'accumulent dans les chaînes alimentaires (bioaccumulation).*

Source : [Métaux lourds : cadmium, mercure et plomb. Commissariat général au développement durable. Juillet 2019](#)

Pour les dangers que représentent le mercure, l'arsenic et le plomb pour la santé, voir les fiches détaillées de l'OMS :

- [Fiche sur le mercure](#)
- [Fiche sur l'arsenic](#)
- [Fiche sur l'intoxication au plomb](#)

## II - Le pré-traitement minéralurgique

Une fois le minerai extrait, il est concassé, broyé et trié pour isoler les minéraux recherchés. C'est une étape qui consomme beaucoup d'énergie et d'eau, et qui génère des résidus.

Cette phase de traitement a souvent lieu à proximité du site d'extraction, mais ça n'est pas toujours le cas, cf la bauxite.

La répartition de l'origine minière du gallium est difficile à établir puisque la Chine, principal producteur métallurgique, récupère le gallium dans ses raffineries qui traitent des bauxites importées de divers pays (Australie, Malaisie, Inde, Indonésie, etc.).

<https://deskeco.com/2024/11/18/rdc-kico-la-mine-de-zinc-plus-haute-teneur-au-monde-reprend-ses-activites>

### Fragmentation

- concassage
- séparation granulométrique
- broyage = minerai réduit en poudre

L'extraction et les premières étapes de traitement du minerai (concassage et broyage) génèrent des poussières, sources de pollutions majeures des eaux et des sols.

Broyeur à boulet <https://www.youtube.com/watch?v=vSi75VTnBoA>

### Concentration

Une fois réduit en poudre, le minerai subit différents traitements chimiques et physiques pour éliminer les impuretés jusqu'à obtenir le métal recherché.

- Flottation
- Lixiviation

Les résidus miniers contiennent des produits chimiques dangereux utilisés pendant le traitement du minerai. On utilise par exemple du cyanure pour le traitement de l'or.

#### Focus sur la lixiviation

La **lixiviation** est une des méthodes classiques de concentration de minerai.

*La lixiviation est un processus simple d'extraction par dissolution basé sur le fait que tous les minerais ont des coefficients de dissolution différents et peuvent donc se retrouver séparés par la circulation d'un solvant. Ce principe est mondialement utilisé pour extraire l'or (le solvant étant majoritairement le cyanure), mais d'autres métaux comme le cuivre et l'uranium peuvent être extraits ainsi.*

Source : rapport de MineralInfo [Exploitation minière et traitement des minerais](#) publié en février 2017

<https://wikimemoires.net/2019/12/la-lixiviation-techniques-de-separation-et-types/>  
<https://thierryregards.eu/2019/06/banro-lixiviation-cyanure-mines-extraction-or-gold-kivu-twangiza-namoya/>

## Séparation solide / liquide

- Décantation
- Filtration
- Séchage thermique

## Résidus miniers

On appelle **résidus miniers** les déchets (solides ou liquides) produits lors du traitement du minerai.

Pour stocker les résidus miniers, on crée des lacs artificiels en construisant des barrages ou des digues. Les **ruptures de digues** sont une des causes de catastrophes environnementales liées aux mines.

Une grande mine de cuivre produit en moyenne 1.750 tonnes de concentré de cuivre en une journée, d'une teneur de 20 à 30% en cuivre, pour environ 200.000 tonnes de résidus miniers comprenant 114.000 m<sup>3</sup> d'eau. D'où la nécessité de créer des lacs artificiels pour stocker ces résidus.

Pour plus de précisions, voir la figure 5 du rapport de l'UNEP [Mine tailings storage: Safety is no accident](#)

Les déchets miniers (stériles et résidus) contiennent souvent des métaux lourds naturellement présents dans la mine et qui sont dangereux pour la santé et l'environnement : plomb, mercure, arsenic...

*Les métaux lourds sont des éléments métalliques présentant un poids atomique élevé, tels que le mercure, le chrome, le cadmium, l'arsenic et le plomb. Ils peuvent nuire aux organismes vivants à faibles concentrations et ont tendance à s'accumuler dans la chaîne alimentaire.*

Source : [Définition de "Métal lourd" sur le glossaire du site ec.europa.eu](#)

Certains métaux lourds sont souvent naturellement associés à d'autres métaux (voir les malus [37] et [49] pour des exemples). Si ces métaux lourds ne sont pas eux-mêmes exploités, alors ils se retrouvent dans les déchets miniers.

#### Focus sur l'eau

```
<a href="./img/tailings.jpg"> </a>
```

## III - L'affinage métallurgique

### En vrac

[https://ismgb.net/coursUniv/coursUniv\\_14635\\_pdf.pdf](https://ismgb.net/coursUniv/coursUniv_14635_pdf.pdf)

Fiche explicative de la leçon: Extraction du fer

<https://www.nagwa.com/fr/explainers/294160721507/>

<https://spiegato.com/fr/quest-ce-que-lenrichissement-du-minerai-de-fer>

[https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome\\_06\\_exploitation\\_miniere\\_et\\_traitement\\_des\\_minerais\\_final24032017\\_1.pdf](https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_06_exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais_final24032017_1.pdf)

<https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/processus-industriels-et-traitements-des-effluents-residuaire/metallurgie-et-hydrometallurgie/cuivre>

[https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome\\_01\\_industrie\\_mineraleactivite\\_miniere\\_final24032017.pdf](https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_01_industrie_mineraleactivite_miniere_final24032017.pdf)

<https://www.mineralinfo.fr/fr/substance/gallium-ga>

[https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-05/brgm\\_plaquette\\_gallium\\_2011.pdf](https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-05/brgm_plaquette_gallium_2011.pdf)