

CHAPITRE I

Rappels

➤ Minerais

C'est une substance utile, minérale naturelle solide renfermant une teneur suffisante en métal ou matière première dont l'extraction génère des profits. Il se définit aussi comme une roche dont on peut extraire avec profit un ou plusieurs substances minérales avec la technologie existante et dans les conditions économiques du moment. C'est un ensemble rocheux contenant des substances utiles en proportion suffisante pour justifier une exploitation. Cette substance peut être exploitée et vendue après un traitement industriel physico-chimique. Ce traitement s'appelle la minéralurgie.

La notion de minerai est à la fois une notion chimique, minéralogique, métallogénique et surtout économique.

- La notion chimique et minéralogique s'applique aux métaux et autres substances non métallifères.
- Notion métallogénique : concentration jusqu'à un certain seuil.
- Notion économique : roche renfermant des substances profitables économiquement.

Au sens du mineur désigne tout minéral ou association minérale susceptible d'être exploité(e) pour l'obtention d'un ou plusieurs métaux. On lui associe la notion de teneur (=grade) et de seuil limite d'exploitabilité (teneur de coupure) ;

➤ Minéral

Le minéral est un corps solide naturel inorganique ayant une formule chimique et des propriétés physiques bien définies. C'est une espèce chimique naturelle qui se présente sous forme de solide cristallin. C'est un corps inorganique à l'état naturel dans le sol avec les propriétés distinctes et une composition représentée par une formule chimique donnée. C'est un corps naturel, solide, inorganique, cristallin et homogène ayant des propriétés physiques et une formule chimique bien définies.

➤ Métal

C'est un corps simple, donné d'un éclat particulier (éclat métallique), bon conducteur de chaleur et d'électricité, et formant par liaison avec l'oxygène des oxydes basiques.

Un métal est un élément chimique qui comporte au moins 4 électrons sur la couche électronique de valence. On a différents groupes de métaux :

- Les métaux alcalins : sodium, potassium,...
- Les métaux alcalinoterreux : calcium,...

➤ Gîte minéral

Un *gîte* est une concentration anormale (dans le sous-sol) de minéraux utiles à l'homme, quelle que soit sa taille, son volume et sa valeur qui n'est pas toujours exploitable; cette notion va au-delà des tendances immédiates du marché. C'est une notion purement géologique

➤ Gisement minéral

Un gisement est une concentration minérale exploitable économiquement dans les conditions techniques et sociales du moment. Le facteur de concentration correspond au taux d'enrichissement en un élément chimique, c'est à dire au rapport entre sa teneur moyenne d'exploitation et son abondance dans la croûte (**Clarke**). Il n'est pas le même pour tous les métaux. On distinguera les concentrations métallifères, où l'on va détruire la structure des minéraux pour en extraire un élément, par exemple la sphalérite pour le zinc, des concentrations de minéraux dits industriels où l'on conserve la structure naturelle tout en l'aménageant, comme c'est le cas pour l'amiante. La notion de gisement minéral est directement dépendante de la satisfaction de besoins industriels et de profits.

On peut dire aussi qu'un gisement est un gîte exploitable avec profit. C'est un lieu où l'on rencontre une substance déterminée si on se réfère à la notion d'espace. C'est un dépôt à forte concentration de minéraux exploitable avec profit.

➤ **Gîtologie**

Étude descriptive des gisements (environnement géologique, minéralogie, géométrie de la minéralisation).

➤ **Métallogénie**

Étude de la genèse des minéralisations d'un gîte (somme des processus à l'origine du gîte tel qu'il est observable aujourd'hui).

L'encaissant = Surrounding rocks : désigne les roches qui contiennent le gîte ;

Indice minéralisé / anomalie = Mineral occurrence / anomaly;

Minéralisation = Mineralization : désigne l'existence de minéraux anormaux par rapport aux roches banales encaissantes ;

Gangue = Gangue : minéraux sans utilité associés au minerai.

Teneur : C'est la proportion exacte (contenu exact) d'un élément donné dans un corps. Il s'agit de l'appréciation de l'abondance de cette substance. Elle s'exprime en g/t.

Clarke : C'est la teneur moyenne d'un élément chimique donné dans l'écorce terrestre exprimée en %, en ppm ou en g/t. $1 \text{ ppm} = 1 \text{ g/t} = 10^{-4}\%$. Les principaux éléments chimiques sont dans l'ordre décroissant: O-Si-Al-Fe-Ca-Na-K-Mg et totalise 98,5% et tous les autres éléments ne représentent que 1,5% dans la croûte.

Teneur de coupure : C'est la teneur limite en dessous de laquelle une mine n'est plus économiquement rentable.

C'est la teneur minimale au dessus de laquelle le gisement est économiquement exploitable.

Clarke de concentration : C'est le rapport entre la teneur d'un élément chimique et son Clarke.

Mines: Une mine est un gisement exploité de substances autre que les matériaux de construction.

Carrière : C'est un endroit où l'on extrait les matériaux de construction ou différents minéraux non métalliques.

La prospection minière est l'ensemble des travaux géologiques, géophysiques, géochimiques, géobotaniques, de photogéologie et de télédétection dont la finalité est de:

- localiser les substances utiles dans l'écorce terrestre;
- préciser la position exacte, la forme et la concentration des corps minéralisés (ore bodies) ou gisements;
- estimer (évaluer) la quantité des substances utiles extractibles que contiennent ces corps minéralisés, étant donné que ceux-ci peuvent contenir, et c'est souvent le cas, d'autres matières premières non extractibles.

Facteurs influant sur l'exploitabilité d'un gisement

Les minéraux sont à la base des civilisations: après l'âge de la pierre, l'humanité a toujours cherché à diversifier ses sources de matières premières (cuivre, fer, plus de 80 éléments aujourd'hui). L'étude des gîtes minéraux a justifié l'essor de la géologie. Après les alchimistes du Moyen Âge, les premières études scientifiques sont celles des érudits de la Renaissance en Europe Centrale, en particulier Georg Bauer (1494-1555), dit Agricola. Les travaux ont ensuite suivi les développements de la métallurgie, en particulier en Europe centrale et dans l'Ouest américain.

Le facteur de concentration correspond au taux d'enrichissement en un élément chimique, c'est à dire au rapport entre sa teneur moyenne d'exploitation et son abondance dans la croûte (*clarke*). Il n'est pas le même pour tous les métaux (tableau 1). On distinguera les concentrations métallifères, où l'on va détruire la structure des minéraux pour en extraire un élément, par exemple la sphalérite pour le zinc, des concentrations de minéraux dits industriels où l'on conserve la structure naturelle tout en l'aménageant, comme c'est le cas pour l'amiante.

Tableau 1: Concentrations métalliques et facteurs de concentration

Élément	Teneur moyenne dans la croûte continentale	Teneur d'exploitation	Facteur de concentration	Taille des gisements géants (Mt)
Fe	7,4 %	60 %	8	
Ti	0,54 %	35 %	65	
Ni	0,011 %	3 %	270	>5,8
Pb	16 ppm	10 %	1 250	>1.6
Sn	2,5 ppm	1 %	4 000	>0,25
Au	0,3 ppb	10 g/t (=10 ppm)	30 000	>0,00034

La notion de gisement repose sur une base économique et politique. Ainsi, il y a lieu de prendre en compte plusieurs types de facteurs liés au gisement lui-même, à la structure du marché et à des considérations politiques. La situation géographique (éloignement, coûts de l'énergie et de la main d'œuvre), le mode d'exploitation, les coûts métallurgiques (maille de libération, substances pénalisantes, mode de traitement etc.) sont des facteurs liés au gisement.

Les facteurs liés à la structure du marché tel l'existence de monopole, d'oligopole ou une concurrence plus ou moins vive influenceront largement la viabilité d'une exploitation. Les substances minérales jouent également un grand rôle politique et suscitent donc l'intérêt des gouvernements: indépendance énergétique, métaux militairement stratégiques, développement

régional et fixation de population, acquisition de monnaie. Les différents métaux présentent donc un intérêt variable dans le temps et dans l'espace.

- La teneur et le tonnage: la teneur limite d'exploitabilité (mutable et fonction du cout d'exploitation) est la teneur minimale supportable en deçà de laquelle l'exploitation d'un gisement cesse d'être rentable. Elle dépend du cours du métal sur le marché économique mondial. Elle est à distinguer de la teneur marchande qui est la teneur atteinte après valorisation. Les bons gisements sont ceux qui présentent un bon tonnage de façon à récupérer le cout d'investissement et à faire du profit.
- La nature du minerai: comportement chimique lors de la flottation: les carbonates réagissent mieux que les silicates.
- La position géographique du gisement: le cout du transport vers les usines de traitement et vers les centres de consommation. De plus la main-d'œuvre qualifiée coûte de plus en plus cher avec la distance.
- La profondeur et la structure du gisement: c'est moins coûteux d'exploiter à ciel ouvert (gisement en plateau) qu'en mine souterraine (gisement dressant).
- Les facteurs économiques: notamment la loi de l'offre et de la demande.
- Les outils d'exploitation: engins pour forage, extraction, transport.
- Les substances extractibles: les gisements poly métalliques sont les plus intéressants.

Teneur et tonnage

Pour qu'un gisement soit exploitable, il faut qu'il contienne plus qu'une concentration minimale et un tonnage minimal d'une valeur marchande. La figure 1a montre de façon très schématique que les gisements sont disposés sur une courbe entre de très petits gisements très riches comme les monocristaux de cuivre et l'immense gisement de teneur beaucoup plus faible que forme la Terre entière. La plupart des gisements qui sont à la fois grands et de fortes teneurs ont été exploités et il reste désormais des gisements petits et à fortes teneurs et d'autres gisements beaucoup plus grands mais avec de plus faibles teneurs.

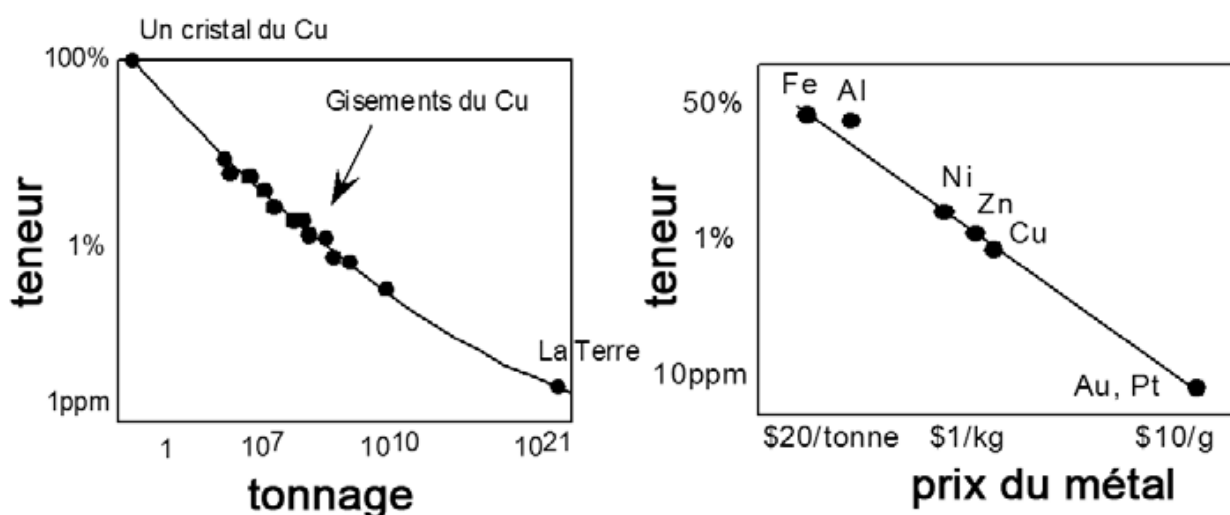


Figure 1 – Teneur moyenne des gisements en fonction de leur tonnage (a) et en fonction du prix du métal (b).

La figure 1b donne une idée grossière de la relation qui existe entre la teneur dans les gisements et le prix des métaux. La plupart des métaux abondants et présents en concentrations

élevées dans les minerais ont un prix relativement faible ; d'autres métaux présents dans des concentrations beaucoup plus faibles ont un prix beaucoup plus élevé.

Dans tout gisement, la teneur du minerai est variable, depuis de petites zones de minerai riche jusqu'à de plus grandes zones avec des teneurs inférieures. La partie du gisement pour laquelle on n'extraie pas le métal est généralement très similaire au minerai duquel le métal est extrait, mais sa concentration en métal est inférieure à un certain seuil. Ce paramètre important est la teneur-limite (cut-off grade en anglais). Inclure ce minerai « pauvre » au minerai « riche » extrait serait une opération non rentable : le coût de l'exploitation minière du minerai « pauvre » dépasserait la valeur du métal récupéré. Mais que se passe-t-il si le prix du métal augmente ?

Nature du minerai

Plusieurs autres facteurs influencent fortement la possibilité d'exploitation d'un gisement. Un facteur important est la nature du minerai. Les caractéristiques à prendre en considération sont par exemple le type de minéraux, la taille des grains et la texture du minerai, qui influencent le coût de l'exploitation minière et de la purification du métal. Prenons, par exemple les deux principaux types de minerai de nickel : magmatique et latéritiques. Dans le minerai magmatique on exploite des minéraux sulfurés – principalement la pentlandite, $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$, alors que dans le minerai latéritique on exploite la garniérite (une argile) ou la goethite (hydroxyde de Fe).

Chaque minerai a ses avantages et ses inconvénients. L'énergie nécessaire pour extraire le minerai de nickel est beaucoup plus importante dans le cas des minerais latéritiques, et c'est un inconvénient majeur dans la période actuelle où le coût de l'énergie augmente. En contrepartie dans le cas du minerai magmatique, la purification du nickel à partir de minerai sulfuré produit de grandes quantités de soufre dont seule une partie est vendue. Le reste constitue un polluant et un déchet toxique qui doit être éliminé. Selon les pressions politiques et économiques sur l'utilisation de l'énergie et sur l'élimination des déchets, l'un ou l'autre des types de gisement est privilégié.

La taille des grains et la dureté du minerai influencent le coût de son broyage en fine poudre. Cette opération est généralement nécessaire pour les purifications en raffinerie ou en fonderie. Les trois gisements de Pb-Zn ($\pm$ Cu) australiens sont un exemple frappant: tous ont des teneurs identiques en métaux, mais le dépôt à Broken Hill a été métamorphisé sous le faciès granulite. Le métamorphisme a entraîné la formation de gros minéraux, très faciles à traiter ; le gisement du Mt Isa a été moins fortement métamorphisé et son minerai à grains fins est moins attractif ; enfin le minerai de McArthur River n'est presque pas métamorphisé et son minerai à des grains si fins que les sulfures ne peuvent pas être séparés des autres minéraux par un simple broyage.

Localisation du gisement

La valeur et la viabilité d'un gisement sont réduites lorsqu'il est éloigné des régions industrielles et peuplées, lorsqu'il est situé dans un climat hostile ou dans une région politiquement instable. Tous ces facteurs augmentent le coût de l'exploitation minière, le coût du transport des produits et le risque d'installation d'une exploitation.

La localisation géologique est également un paramètre important : le plus grand gisement de nickel que nous connaissons est au centre de la Terre. Le noyau contient quelque 1019 tonnes de nickel métal mais il est évidemment totalement inaccessible. La profondeur d'un gisement a une influence majeure sur le coût d'exploitation. Un gisement peu profond peut être exploité dans une mine à ciel ouvert, qui est une alternative bien moins onéreuse que l'exploitation d'une mine

souterraine, nécessaire pour les gisements plus profonds. D'autre part, la nature du minerai peut être importante pour son coût d'exploitation. Les minerais sédimentaires friables et peu résistants sont creusés plus facilement que les roches magmatiques plus dures.

Enfin, un corps minéralisé compact et regroupé est beaucoup plus facile à exploiter qu'un corps minéralisé discontinu et entrecoupé de failles. Deux gisements de platine au sud de l'Afrique apportent une illustration intéressante. Les gisements de platine de l'intrusion du Bushveld (Afrique du Sud) sont formés de couches quasi continues, qui rendent l'exploitation prévisible et très efficace. Au contraire, les gisements situés dans une autre intrusion, le « Great Dyke » du Zimbabwe, même s'ils ont des teneurs équivalentes, sont tellement irréguliers et découpés par des failles que leur exploitation est rendue très difficile. Le déséquilibre politique et la fragilisation de l'économie du pays rend toute exploitation encore plus difficile.

Références & Bibliographie

- 1- N. Arndt, C. Ganino : Ressources minérales, nature, origine et exploitation, Dunod, Paris, 2010.
- 2- C. Pomerol et M. Renard : éléments de géologie, Edition Armand Colin, 2010.
- 3- A. Foucoult et J.F. Raoult : Dictionnaire de géologie, 4^{ème} Edition, Masson, Paris, 1995.
- 4- M. Jébrak : Manuel de gîtologie, Version 3.1, Université du Québec à Montréal, 2003.
- 5- V. Smirnov : Géologie des minéraux utiles, Edition Mir Moscou, 1988.