

CHAPITRE 2

CLASSIFICATION DES MINERAIS

On trouve dans la littérature des classifications variées, basées sur toute une diversité de critères. Certaines classifications se fondent sur des critères économiques, comme l'utilisation finale de la substance utile extraite, alors que d'autres se fondent sur des facteurs géologiques. Quelques exemples sont donnés dans les tableaux 1 et 2.

➤ Classification par utilisation du métal ou du minéral d'intérêt

Dans les ouvrages plus anciens, il est courant de lire des classifications se fondant sur le type de métal ou l'utilisation de la substance extraite des gisements. Le tableau 2.2 présente par exemple une liste des minéraux extraits des mines de cuivre.

On remarque que ce métal est extrait de différents types de sulfures et de sulfosels, de sulfates, de carbonates, d'oxydes et dans quelques rares cas sous forme de cuivre natif. Le cuivre est l'un des « métaux de base », terme qui fait référence à un groupe de métaux communs, dominé par les éléments de transition, qui sont très utilisés dans l'industrie. Les autres catégories de minerais (tableau 2.1) comprennent les minéraux qui sont utilisés sous leur forme naturelle sans purification ou extraction d'un élément spécifique. La barytine, par exemple, est un sulfate de baryum – élément relativement lourd – utilisé pour augmenter la densité des boues de forages pétroliers. L'uranium et le charbon sont des sources d'énergie. De nombreux types de minéraux sont utilisés comme abrasifs ; les grenats, les émeris et les diamants sont trois exemples, mais on utilise également les feldspaths (la prochaine fois que vous achèterez un tube de dentifrice, regardez s'il contient des « silicates de sodium et d'aluminium »).

Ce type de tableau propose des liens utiles entre les divers types de minerais et le type d'utilisation sociale qui en est fait.

Tableau 1 – Classification des ressources minérales en fonction de l'utilisation du produit.

Minerais métalliques	Métaux ferreux (utilisé dans la fabrication d'acier)	Fer
		Chrome
		Manganèse
		Nickel
		Molybdène
	Métaux de base (métaux communs, utilisé dans l'industrie)	Cuivre
		Zinc
		Plomb
		tain
		Antimoine
	Métaux de haute-technologie	Cobalt
Gallium		

Minerais métalliques (suite)	Métaux de haute-technologie (suite)	Lithium
		Niobium
		Platine (et autre métaux de ce groupe)
		Tantale
		Terres-rares
		Titane
	Métaux précieux	Or
		Platine
		Argent
Autre	Aluminium	
Sources d'énergie	Uranium, pétrole, gaz, charbon	
Matériaux de construction	Sables, graviers, argiles	
Minéraux industriels	Silice, kaolin, gypse, talc, potasse, phosphate, sillimanite	
Pierres précieuses	Diamant, émeraude, opale, rubis, saphir	
Pierres fines	Agate, améthyste, béryl, grenat, jade, lapis-lazuli, malachite, topaze, tourmaline, turquoise, zircon	

Note : cette classification est indicative mais certains éléments ne peuvent pas être rangés dans une seule catégorie : le nickel est à la fois un métal de base et un métal ferreux ; le titane est à la fois un métal ferreux et un métal de haute-technologie.

➤ Classification par type de minéraux

Le type de minéral peut être utilisé comme autre critère de classification comme le montre le tableau 2. Dans ce tableau, nous voyons qu'un grand nombre de métaux sont extraits sous forme de sulfures (par exemple le Cu sous forme de chalcopryrite, le Pb sous forme de galène, le Ni sous forme de pentlandite). Une autre catégorie importante est celle des gisements d'oxydes, qui procurent l'étain sous forme de cassitérite (SnO_2), le fer sous forme de magnétite (Fe_3O_4), ou l'uranium sous forme de pechblende (U_3O_8). Les autres métaux sont extraits de carbonates ou de sulfates, généralement dans les zones d'altération au-dessus des gisements primaires.

Très peu de métaux sont extraits des mines sous forme native, les seuls exemples courants étant l'or et les éléments du groupe du platine. Le carbone est également extrait sous forme native de diamant ou de graphite, et sous forme impure dans les charbons. Même si le cuivre existe dans la nature sous forme native, sa présence sous cette forme est plutôt un inconvénient qu'un avantage : certes, le cuivre natif contient 100 % Cu et augmente la teneur globale en cuivre du minerai, mais il est malléable et a tendance à s'amalgamer dans les broyeurs conçus pour les sulfures et silicates cassants.

Les silicates sont de loin les principaux minéraux dans la plupart des roches, mais ils sont peu fréquents dans les listes de minéraux d'intérêt économique. Les exceptions sont la garniériste, un minéral du groupe des serpentines qui constitue l'essentiel des latérites à Ni, les zircons, minéraux détritiques lourds exploités comme source de métal Zr, et les grenats, utilisés comme abrasifs. Le

quartz est en phase de devenir de plus en plus important en tant que source de silicium, utilisé dans les semi-conducteurs et les panneaux solaires

Tableau 2. Classification des minerais à partir des types de minéraux.

<i>Sulfures et sulfosels</i>	
Covellite – CuS Chalcocite – Cu ₂ S Chalcopyrite – CuFeS ₂ Bornite – Cu ₈ FeS ₄ Tetraédrite – (Cu, Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ Galène – PbS Sphalérite – (Zn,Fe)S Cinabre – HgS Cobaltite – (Co, Fe)AsS Molybdénite – MoS ₂ Pentlandite – (Fe, Ni) ₉ S ₈ Millerite – NiS Realgar – AsS Stibine – Sb ₂ S ₃ Sperrylite – PtAs ₂ Laurite – RuS ₂	
<i>Oxydes et hydroxydes</i>	
Bauxite	Gibbsite – Al(OH) ₃ Boehmite – (–AlO(OH)) Diaspore – (–AlO(OH))
Cassitérite – SnO ₂ Chalcotrichite – Cu ₂ O Tenorite – CuO Chromite – (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄ Columbite – tantalite ou coltan – (Fe, Mn)(Nb, Ta) ₂ O ₆	
Hématite – Fe ₂ O ₃ Ilménite – FeTiO ₃ Magnétite – Fe ₃ O ₄ Pyrolusite – MnO ₂ Rutile – TiO ₂ Uraninite (pechblende) – UO ₂	
<i>Oxysels</i>	
Calcite – CaCO ₃ Rhodochrosite – MnCO ₃ Smithsonite – ZnCO ₃ Malachite – Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃ Barytine – BaSO ₄ Gypse – CaSO ₄ .2H ₂ O Chalcocyanite – CuSO ₄ Brochantite – CuSO ₄ . 3Cu(OH) ₂ Scheelite – CaWO ₄ Wolframite – (Fe, Mn)WO ₄	

Apatite – $\text{Ca}_8 (\text{PO}_4)_3 (\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
<i>Halogènes</i>
Halite – NaCl Sylvite – KCl Fluorite – CaF_2
<i>Métaux et éléments natifs</i>
Or – Au Argent – Ag Platinoïdes – Pt, Pd, Ru Cuivre – Cu Carbone – C (diamant, graphite)
<i>Silicates</i>
Beryl – $\text{Be}_3 \text{Al}_2 (\text{SiO}_3)_6$ Grenat – $\text{Fe}_3 \text{Al}_2 (\text{SiO}_4)_3$ Garnierite – mélange d'hydrosilicates de Ni et Mg Kaolinite – $\text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_8 (\text{OH})_8$ Sillimanite – $\text{Al}_2 \text{SiO}_8$ Spodumène – $\text{LiAlSi}_2 \text{O}_6$ Talc – $\text{Mg}_3 \text{Si}_4 \text{O}_8 (\text{OH})_2$ Zircon – ZrSiO_4

CLASSIFICATIONS DES GISEMENTS

Il existe des similitudes entre la diversité de classement des minerais et celle des classements de gisements. Dans les ouvrages plus anciens, les gisements sont classés selon leur type de production : les gisements de cuivre, les gisements d'or, les sources d'énergie (fissile – l'uranium, ou fossile – les charbons et hydrocarbures), etc.

La classification des gisements obéit à des règles qui régissent leur distribution et présentent les particularités de leur environnement. Elle est basée sur un certain nombre de critères dont les principaux sont : l'espace, la composition chimique, l'âge, les conditions physiques, la genèse.

Critères de classification des gisements

1. L'espace du gisement

La description de l'espace du gisement concerne sa géométrie, sa disposition. Il faut dire si la minéralisation est dans un filon, si elle est massive ou disséminée. On distingue aussi sa position stratigraphique (localisation ou position verticale ou horizontale).

2. La composition chimique

Il s'agit de définir la composition chimique de la roche encaissante du gisement et de la minéralisation c'est-à-dire donner la paragenèse minérale du gisement.

3. L'âge

Il s'agit de donner l'âge relatif du gisement (gîte supergène, hypogène,...) ou l'âge absolu (gisement précambrien,...).

4. Condition physique

En fonction des paramètres de température et de pression qui ont prévalurent à la formation des gisements, on distingue :

- Les gisements à haute température (HT)
- Les gisements à moyenne température (MT)
- Les gisements à basse température (BT)
- Les gisements à haute pression (HP)
- Les gisements à moyenne pression (MP)
- Les gisements à basse pression (BP).

5. La genèse

Les gisements sont formés par concentration chimique à partir d'un magma, des eaux hydrothermales, des eaux météoriques et d'un métamorphisme. En fonction de l'origine des gisements on peut distinguer plusieurs catégories de gisement :

- **Gisements en liaison avec un magma éruptif**
 - Gisements de ségrégation magmatique
 - Gisements pegmatitique
 - Gisements pneumatolitique
 - Gisements de fumerole et exhalatif,...
- **Gisements hydrothermaux**
 - Gisements épithermaux (température de 50 à 200°C et à proximité de la surface)
 - Gisements mésothermaux (température de 200 à 300°C avec une moyenne profondeur)
 - Gisements hypothermaux (température de 300 à 500°C et une profondeur élevée).
- **Gisements sédimentaires**

- **Gisements pyro-métasomatiques**
- **Gisements volcano-sédimentaires**
- **Les chapeaux de fer** (zones d'oxydation et de cimentation).

RÉPARTITION

Les gisements sont temporellement et spatialement en lien avec des processus compressifs et transpressifs de déformation induits à la convergence des marges et conduisant à formation d'orogénies.

Le gradient géothermique élevé et la déshydratation des roches en subduction et en enfouissement permettent la génération et la migration des fluides métamorphiques. Ceux-ci sont communément aqueux et carboniques, faiblement salins et oxydants, et riches en éléments mobiles. Ils sont drainés le long de grands accidents structuraux à différentes profondeurs de l'épizone à l'hypozone (260-650 °C et 1-5 kbar)

Ces fluides hydrothermaux sont dignes d'intérêt car ils s'accompagnent des concentrations en substances métalliques.

UTILISATION

Le tableau suivant montre une liste représentative des substances utiles ainsi que leurs utilisations

Famille	Substance utile	Utilisations/ Propriétés
Métaux alcalins	Césium (Cs)	Source de radioactivité (horloge atomiques, médecine)
	Lithium (Li)	Anode de batterie
	Potassium (K)	Industrie pharmaceutique
	Rubidium (Rb)	Cellules photovoltaïques, verre de sécurité
	Sodium (Na)	Industrie pharmaceutique, cosmétique, pesticides
Métaux alcalinoterreux	Baryum (Ba)	Piégeage des gaz résiduels dans les tubes cathodiques
	Béryllium (Be)	Agent durcissant de certains alliages
	Calcium (Ca)	Production d'alliages
	Magnésium (Mg)	Industries chimiques et pharmaceutiques, production d'alliages
	Radium (Ra)	Luminescence (aiguilles de montre)
	Strontium (Sr)	Vernis et glaçures des céramiques, tubes cathodiques
Métaux de transition	Argent (Ag)	Joaillerie, orfèvrerie, photographie
	Cadmium (Cd)	Accumulateurs électriques, alliages
	Chrome (Cr)	Alliage (résistance à la corrosion et brillance de l'acier inoxydable)

Cobalt (Co)	Alliages, catalyseur dans l'industrie chimique et pétrolière
Cuivre (Cu)	Conducteurs électriques, alliages
Fer (Fe)	Constructions métalliques
Hafnium (Hf)	Filaments des lampes à incandescence, réacteurs nucléaire, alliages, processeurs
Iridium (Ir)	Alliages (durcissement des alliages de platine), traitement des lunettes de ski (aspect miroir)
Manganèse (Mn)	Alliages, piles électriques, engrais
Mercure (Hg)	Industrie pharmaceutique, cathodes, lampes à fluorescence, plombages dentaires, piles électriques, thermomètres
Molybdène (Mo)	Alliages (durcissement de l'acier), catalyseur (industrie pétrolière)
Nickel (Ni)	Alliages, accumulateurs électriques, cordes de guitare
Niobium (Nb)	Alliages, aimants supraconducteurs
Or (Au)	Joaillerie, orfèvrerie, monnaie, dorure
Osmium (Os)	Alliages (avec les platinoïdes) : pointes de stylo plumes, pacemaker
Palladium (Pd)	Composants électroniques (téléphones cellulaires, ordinateurs...), catalyseur, capteur d'hydrogène, joaillerie
Platine (Pt)	Catalyseur, capteur d'hydrogène, alliages (résistance à la température), joaillerie
Rhénium (Re)	Alliages, joints des cellules à enclumes de diamant
Rhodium (Rh)	Catalyseur, tubes à rayons X, miroir (réverbération et dureté), joaillerie
Ruthénium (Ru)	Alliages (renforce la résistance du titane à la corrosion), disques durs, supraconducteurs
Scandium (Sc)	Alliages (surtout d'aluminium), lampe à halogénure métallique
Tantale (Ta)	Condensateurs électroniques
Technétium (Tc)	Imagerie médicale
Titane (Ti)	Pigment, alliages
Tungstène (W)	Carbure de tungstène utilisé dans la formation des pièces d'usure industrielles
Vanadium (V)	Additif dans l'acier, catalyseur
Yttrium (Y)	Tubes cathodiques, laser (YAG), alliages supraconducteurs
Zinc (Zn)	Galvanisation (protection de l'acier contre la corrosion par dépôt d'une fine couche de Zn), laiton (alliage cuivre-zinc)

	Zirconium (Zr)	Enveloppe du combustible nucléaire, faux diamants
Métaux pauvres	Aluminium (Al)	Transport, emballage, construction, fils électriques
	Bismuth (Bi)	Fusible, verre, céramiques, industries pharmaceutique et cosmétique
	Étain (Sn)	Bronze (cuivre et étain), fer blanc (acier recouvert d'étain) des boîtes de conserves, électronique (étamage et soudures), monnaies
	Indium (In)	Cellules photovoltaïques, détecteurs infrarouges, médecine nucléaire
	Plomb (Pb)	Accumulateurs électriques (batteries de voiture), conduites d'eau, gouttières, cristallerie, munitions
	Thallium (Tl)	Thermomètres basse température, détecteurs infrarouges
Minéraux et roches	Diamant	Dureté, propriétés esthétiques
	Corindon ou « émeri »	Dureté
	Talc	Douceur, propriétés lubrifiantes
	Pierre ponce	Abrasivité
	Amiante	Résistance au feu
	Mica	Résistance au feu, isolation électrique
	Diatomite	Propriétés filtrantes
	Barytine	Densité (boue de forage)
	Andalousite	Caractère réfractaire
	Disthène	Caractère réfractaire
	Albite	Fusibilité
	Halite	Alimentation, aptitude à baisser la température de fusion de l'eau (dénivageage)
	Calcite	Propriétés optiques (rend les papiers et peintures brillants)

NOTION DE RESSOURCES ET RÉSERVES MINÉRALES

Notion de ressource minérale

Une ressource minérale est une concentration ou une occurrence de diamants, d'une substance inorganique solide naturelle ou d'une substance organique fossilisée solide naturelle incluant les métaux de base, les métaux précieux et d'une teneur ou d'une qualité telles qu'elles présentent des perspectives raisonnables d'extraction rentable. La localisation, la quantité, la teneur, les

caractéristiques géologiques et la continuité d'une ressource minérale sont connues, estimées ou interprétées à partir d'évidences et de connaissances géologiques spécifiques.

Le terme de ressources minérales comprend la minéralisation et les substances naturelles d'intérêt économique intrinsèque, qui ont été identifiées et estimées par l'exploration et l'échantillonnage et à partir desquelles on pourra éventuellement définir des réserves minérales en tenant compte et en mettant en application des facteurs techniques, économiques, juridiques, environnementaux, socio-économiques et gouvernementaux. L'expression " perspectives raisonnables d'extraction rentable " implique un jugement de la part de la personne qualifiée relativement aux facteurs techniques et économiques pouvant vraisemblablement influencer la perspective d'une extraction économique. Une ressource minérale constitue un inventaire de la minéralisation dont l'extraction pourrait s'avérer économique dans l'hypothèse de conditions techniques et économiques réalistes et justifiables. Ces hypothèses doivent être présentées (exposées) de manière explicite à la fois dans les rapports publics et les rapports techniques.

Notion de réserve minérale

Les réserves minérales sont subdivisées en réserves minérales probables et réserves minérales prouvées suivant l'ordre croissant de confiance géologique. Les réserves minérales probables comportent un degré de confiance inférieur à celui des réserves minérales prouvées.

Les réserves minérales désignent la partie économiquement exploitable des ressources minérales mesurées ou indiquées, démontrée par au moins une étude préliminaire de faisabilité. L'étude doit inclure les renseignements adéquats sur l'exploitation minière, le traitement, la métallurgie, les aspects économiques et les autres facteurs pertinents démontrant qu'il est possible, au moment de la rédaction du rapport, de justifier l'extraction rentable. Les réserves minérales comprennent les matériaux de dilution et des provisions pour pertes subies lors de l'exploitation.

Les réserves minérales constituent la partie des ressources minérales qui, après considération de tous les facteurs miniers, donne une estimation de tonnage et de teneur qui, de l'avis de la ou des personnes qualifiées réalisant les estimations, forme la base d'un projet économiquement viable après considération des facteurs de traitement et de commercialisation, ainsi que des facteurs métallurgiques, économiques, juridiques, environnementaux, socio-économiques et gouvernementaux pertinents. Les réserves minérales comprennent tous les matériaux de dilution qui seront extraits conjointement avec les réserves minérales et transportés à l'usine de traitement ou aux installations équivalentes. Le terme « réserves minérales » ne suppose pas nécessairement la

mise en place ou en fonction d'installations d'extraction ni la réception de toutes les approbations gouvernementales. Il signifie qu'il est raisonnable d'espérer de telles approbations.

Phases et Étapes du développement minéral

I- Exploration: 1- Reconnaissance régionale 2- Prospection des anomalies 3- Vérification des indices de surface et sub-surface 4- Découverte et confirmation du gisement	Ressources délimitées
<u>II- Développement du gisement</u> 1- Définition du gisement 2- Ingénierie du projet, 3- Études économiques, 4- Étude de faisabilité et décision	Réserves minières
<u>III- Exploitation du gisement</u> 1- Développement de la mine (infrastructures + préparation) 2- Production	Réserves minières

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.