

Minéraux et métaux: La bouée de sauvetage de la croissance mondiale

Pour les gratte-ciel, les trains à grande vitesse, les équipements médicaux, les ordinateurs, les smartphones et une variété infinie d'autres éléments de la société moderne, le monde dépend d'un approvisionnement régulier en minéraux précieux et en matériaux géologiques. Après un grave ralentissement, les investissements mondiaux dans le secteur minier rebondissent alors que la reprise économique est tirée par les économies émergentes.

La dernière décennie dans l'industrie minière a été marquée par des niveaux de production record ainsi que par de graves revers alors que la crise financière qui a frappé au cours de la seconde moitié de 2008 a mis en péril la croissance de l'économie mondiale et a déclenché une récession mondiale.

Les prix des minéraux et des métaux ont perdu près de la moitié de leur valeur entre août et décembre 2008. Depuis 2009, cependant, les prix se sont redressés et au début de 2011, l'indice des prix des métaux et des minéraux du Fonds monétaire international (FMI) avait dépassé ses niveaux de prix d'avant la crise.

L'économie mondiale rebondit et la croissance revient. Elle continue d'être tirée par les économies émergentes, les prix des minéraux et des métaux se stabilisant désormais près de leurs niveaux d'avant la récession. En 2012, les économies influentes du Brésil, de l'Inde, de la Russie et de la Chine (BRIC) représentaient 20 % de la production économique mondiale, un chiffre qui devrait atteindre près de 25 % d'ici 2017. De la croissance attendue de l'économie mondiale dans les cinq prochaines années, près de 40 % seront représentés par ces pays émergents.

Les économies chinoise, indienne et brésilienne, comme de nombreux autres pays en voie de développement rapide, traversent une phase de croissance économique à forte intensité de ressources. Ils consomment de plus grandes quantités de minéraux et de métaux par pourcentage d'augmentation de la croissance économique par rapport aux économies industrialisées traditionnelles. Les facteurs à l'origine de cette demande de minéraux et de métaux vont de l'urbanisation accrue, des investissements dans les infrastructures et de la fabrication accrue de biens de consommation et d'équipement.

Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, à peu près le même nombre de personnes vivent dans des zones urbaines que dans des zones rurales, et d'ici 2030, 60 % de la population mondiale vivra dans des centres urbains. La plus forte augmentation de cette migration rurale-urbaine sera observée dans les villes des pays émergents et en développement.

La Chine à elle seule a l'intention d'urbaniser 350 millions de personnes supplémentaires d'ici 2025, soit 221 villes de plus d'un million d'habitants. Le 12e plan quinquennal de la Chine continue, comme ses prédécesseurs, d'inclure une série d'objectifs d'expansion des infrastructures. Alors que le Brésil se prépare à accueillir la Coupe du monde de football de 2014 et les Jeux olympiques d'été de 2016, ses dépenses d'infrastructure vont augmenter. La Russie a des plans ambitieux pour dépenser 1 000 milliards de dollars dans les infrastructures entre 2007 et 2017. Cette demande accrue de urbanization, infrastructure development, consumer goods and energy will contribute to increased demand for minerals and metals.

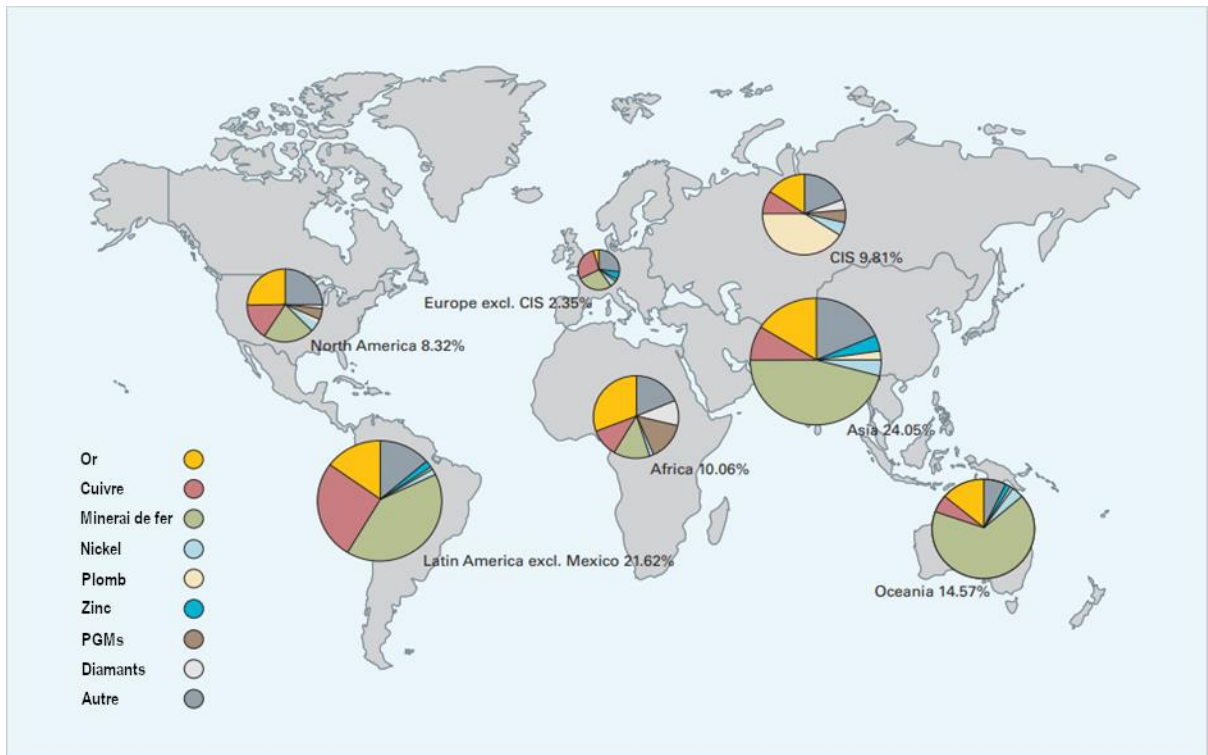
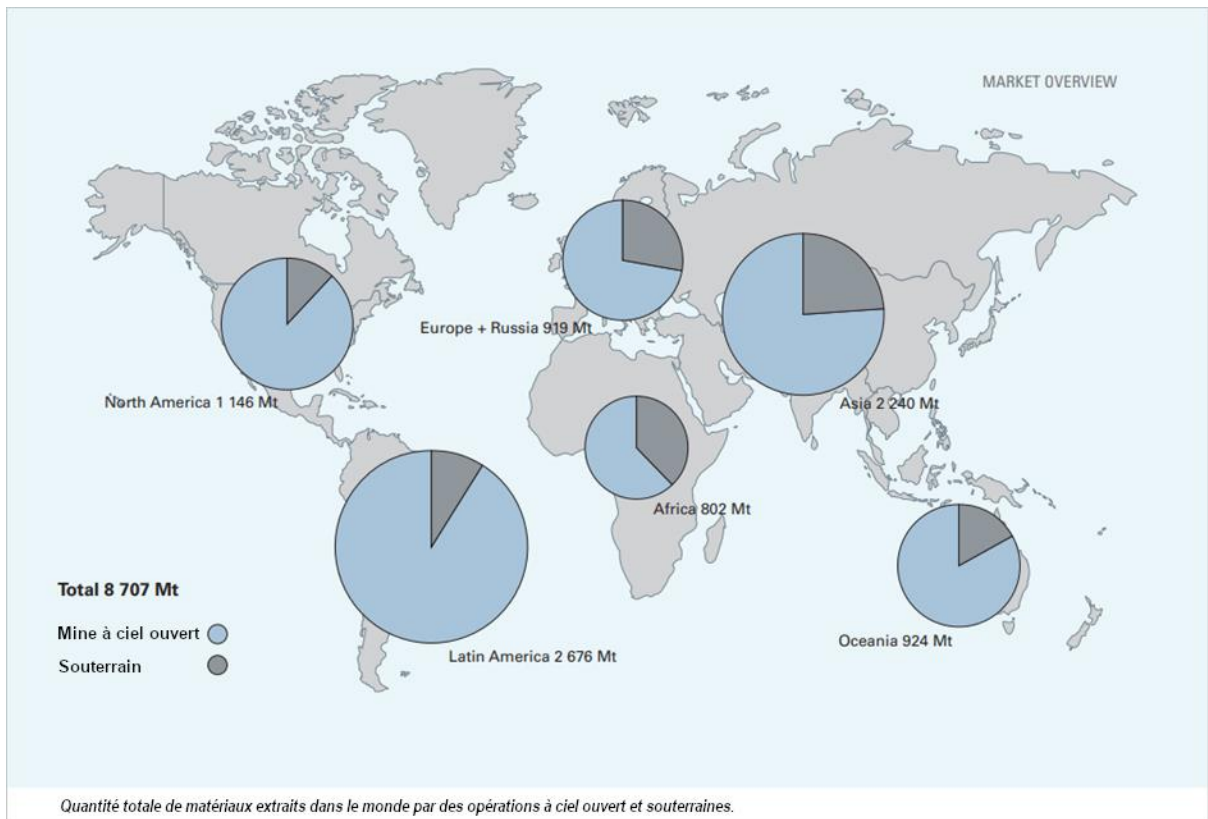


Figure 1 : Répartition mondiale des minerais extraits en fonction de la valeur des quantités extraites. (Source : données sur les matières premières)



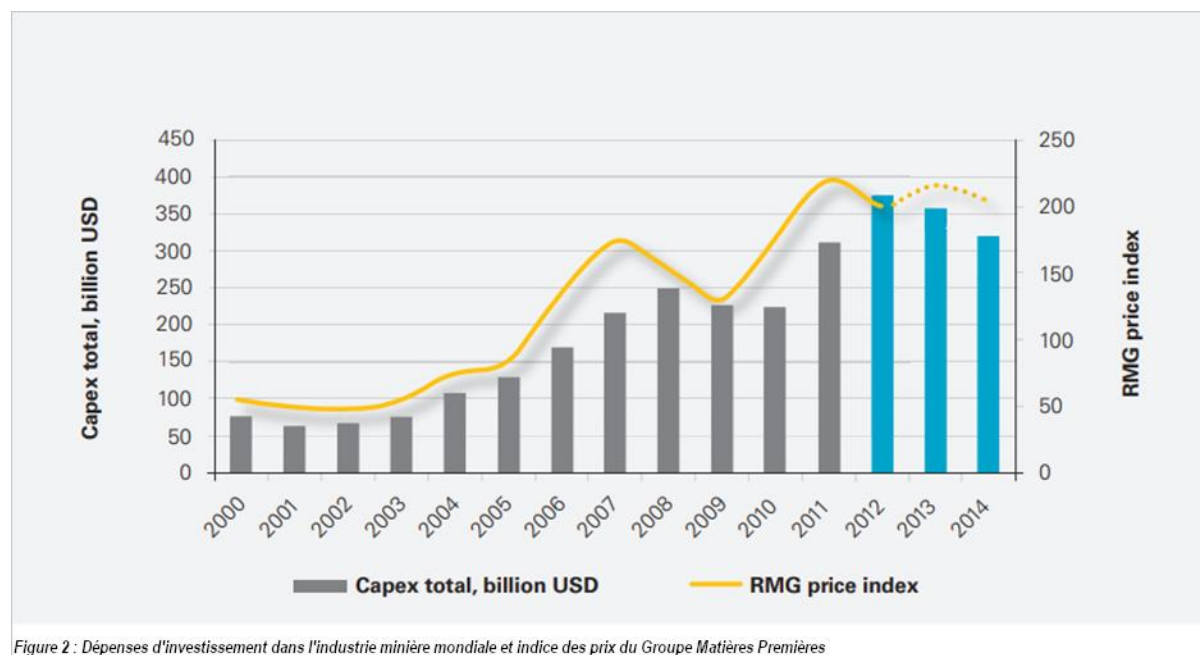
Quantité totale de matériaux extraits dans le monde par des opérations à ciel ouvert et souterraines.

Le secteur minier poursuit son expansion

Par rapport au ralentissement de l'économie mondiale, l'industrie minière a bien résisté et continue de se développer, la valeur totale de la production de minéraux et de métaux passant de 680 milliards USD en 2010 à 850 milliards USD en 2011. L'Asie continue d'être le plus grand producteur des minéraux et des métaux (hors charbon), et représente 24 % de la valeur globale de l'industrie, suivie par l'Amérique latine (22 %) et l'Océanie (15 %). L'Afrique et la Communauté des États indépendants (CEI) représentent chacun 10 % supplémentaires de la valeur mondiale, l'Amérique du Nord (8 %) et l'Europe (2 %) représentant le reste (voir Figure 1).

Les investissements maintiennent une trajectoire ascendante

Les investissements et les dépenses en capital dans le secteur minier ont poursuivi leur trajectoire ascendante régulière depuis 2003. Bien que la crise financière et la récession économique aient freiné les dépenses en 2009 et 2010, les dépenses de l'industrie devraient rester au-dessus du niveau de 300 milliards de dollars au cours des prochaines années. (Figure 2).



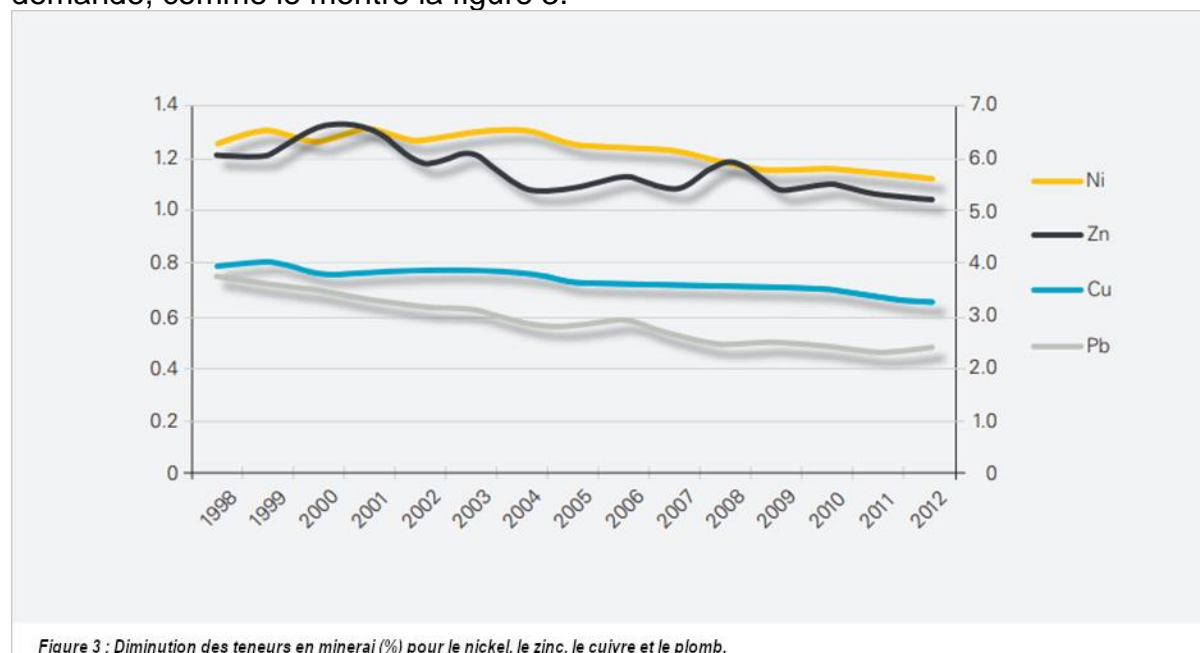
À ciel ouvert ou souterrain

Environ 1 milliard de tonnes de minerai ont été extraites en 2011 des mines souterraines de roche dure dans le monde et plus près de 1,2 milliard de tonnes si elles sont prises avec les minéraux industriels. En Afrique du Sud, l'exploitation minière souterraine représente près de la moitié de la production du secteur, mais dans d'autres régions telles que les États-Unis, le Pérou et le Brésil, la majorité de la production provient de mines à ciel ouvert.

Parmi les métaux les plus importants sur le plan économique, le zinc et le plomb sont principalement extraits à l'aide de méthodes d'extraction souterraine, plus de 70 % de tous les gisements de minerai de zinc/plomb étant extraits sous terre. Alors que la majorité du charbon est produit à partir de l'exploitation minière souterraine, l'exploitation à ciel ouvert représente la majorité de la production de minerai de fer, d'or, de cuivre et de nickel. L'exploitation à ciel ouvert représente la majorité de la production. Dans l'ensemble, le ratio de l'exploitation à ciel ouvert à l'exploitation souterraine restera stable ou augmentera vers l'exploitation à ciel ouvert pour les principaux minerais métalliques. À l'échelle mondiale, l'augmentation du volume de minerai extrait par les mines souterraines n'a pas été supérieure aux volumes extraits par les mines à ciel ouvert et à ciel ouvert. Les coûts plus élevés associés à l'exploitation minière souterraine ont plutôt encouragé les entreprises à tirer parti de l'échelle et à exploiter plutôt des fosses à ciel ouvert plus profondes. Ainsi, le rapport des volumes de minerai entre l'exploitation à ciel ouvert et l'exploitation souterraine n'a pas connu de changement majeur au cours de la dernière décennie.

Teneur du minerai

L'augmentation des prix des métaux et des minéraux au cours de la dernière décennie a poussé à une production plus élevée dans le secteur, mais cela a conduit à une baisse des teneurs en minerai à extraire pour répondre à cette demande, comme le montre la figure 3.



Recyclage

Une utilisation plus durable des métaux et des minéraux a encouragé le recyclage d'un certain nombre de ces produits, mais les taux de recyclage restent encore faibles. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) estime que pour 30 métaux, le taux de recyclage en fin de vie est supérieur à 30 %, tandis que pour 34 autres éléments, ce taux est inférieur à 1 %. Il existe des différences pour les métaux ferreux et non ferreux; par exemple, le fer et l'acier ont un taux de recyclage en fin de vie estimé entre 70 et 90 %, tandis que pour le cuivre, il est inférieur (43 à 53 %) et encore inférieur pour le zinc (35 à 60 %). En termes de contenu recyclé (fraction de métal secondaire dans l'apport total de métal de la production de métaux), entre 28 et 52 % de fer, 20 à 37 % de cuivre et 18 à 27 % de production de zinc comprennent de la ferraille.

Alors que l'importance du recyclage des métaux augmente, tant dans les sphères publiques que privées, ce qui va dans le sens de la promotion d'une utilisation durable des ressources, la part de ce secteur est encore dépassée par la « nouvelle » production. Étant donné que les principaux consommateurs de métaux se trouvent désormais dans les économies émergentes, les métaux utilisés dans ces pays sont au début de leur cycle de vie et il faudra des décennies avant qu'ils n'entrent dans leur phase de recyclage. Par exemple, la construction neuve en Chine consomme des métaux et il faut en moyenne 40 ans pour qu'un bâtiment soit remplacé. Par conséquent, ces matériaux n'entreront pas dans la catégorie des métaux recyclés pendant cette période.

Tendances pour l'avenir

2012 a été une année difficile pour l'économie mondiale ; cependant, avec les améliorations prévues de la croissance économique de la Chine (l'économie chinoise représentant près de la moitié de la consommation mondiale de métaux), une zone euro plus forte et la poursuite de la restauration de l'économie américaine, l'avenir devrait s'améliorer. Alors que la croissance mondiale se dirige vers des chiffres plus positifs à l'avenir, les activités de forage et d'exploration devraient suivre. Un projet minier a une longue période de gestation. Il peut s'écouler plus de 10 ans entre le début de l'exploration, le développement et la construction du projet et la sortie finale. Par conséquent, en utilisant pleinement la capacité actuelle, la réponse à une augmentation des prix des métaux et des minéraux peut être satisfaite par une légère augmentation de l'offre à court terme.

Pour qu'un approvisionnement plus significatif soit mis en ligne, une période plus longue est nécessaire. Par conséquent, le plein effet de la flambée des prix qui a débuté en 2003 continuera de se faire sentir au cours des prochaines années. Les nouvelles mines ont souvent été situées dans des régions éloignées et éloignées des marchés traditionnels des métaux. Ils se trouvent souvent dans des économies en développement avec moins d'installations routières et portuaires bien

développées. De plus, les corps minéralisés sont à faible teneur et sont situés beaucoup plus profondément. Tous ces facteurs contribuent à rendre les nouvelles sources d'approvisionnement en minerai plus coûteuses et plus longues à devenir opérationnelles.

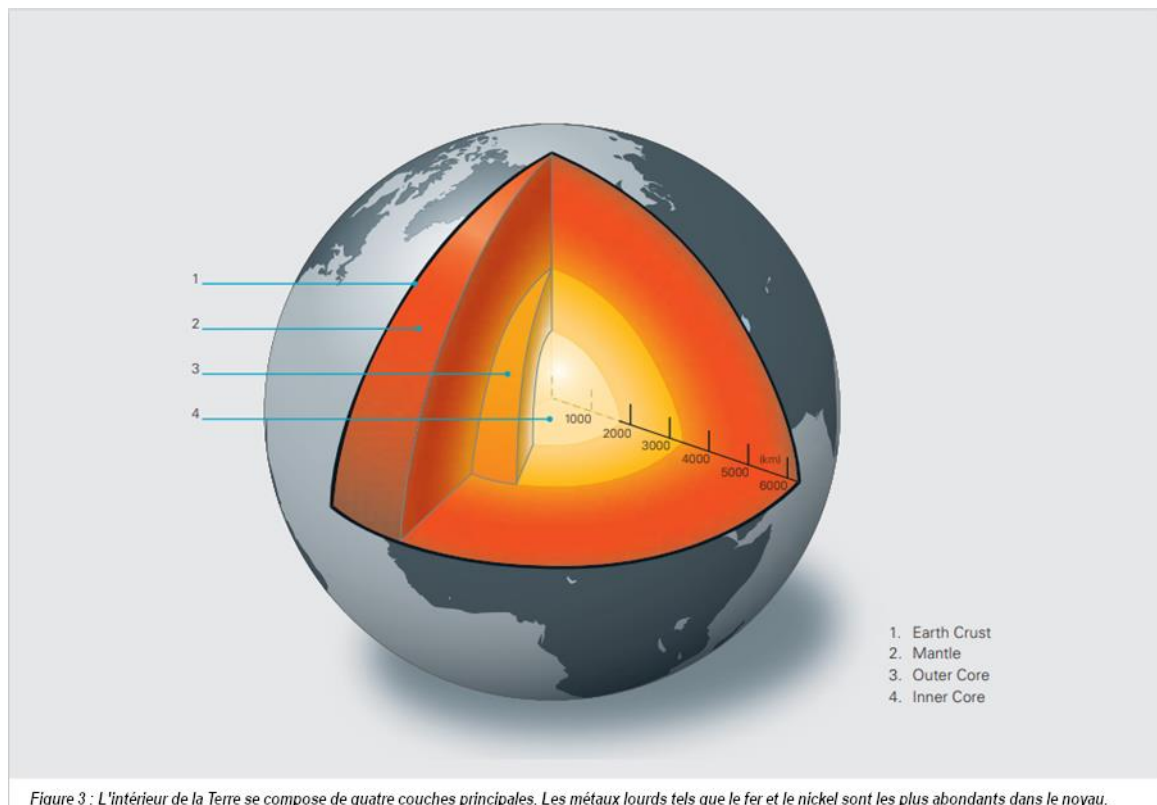
Le secteur minier continuera de faire face à des défis aussi sérieux que la recherche de nouveaux corps minéralisés les emmènera plus loin dans des régions minières non traditionnelles. Conjugée à l'augmentation des coûts de l'équipement, à l'augmentation des délais (par rapport au niveau d'avant 2003) pour la livraison de l'équipement, à la hausse des coûts de main-d'œuvre et à la lenteur de la croissance de la capacité de production, la pression à la hausse sur les prix des métaux et des minéraux demeure en place.

Alors que l'économie mondiale, en particulier les marchés financiers mondiaux, a, dans une certaine mesure, affecté la capacité des sociétés d'exploration et d'exploitation minière à mobiliser des capitaux, la vigueur du secteur minier demeure robuste. Les prix des matières premières devraient rester élevés et supérieurs à leurs niveaux d'avant 2003. Les sociétés minières ont fait preuve de prudence au cours des dernières années et, dans certains cas, ont réagi en réduisant les expansions prévues, mais dans l'ensemble, la demande sous-jacente de métaux reste forte. Même pour les projets actuellement mis sous cocon, une augmentation de prix sollicitera rapidement leur remise en exploitation. À mesure que la croissance économique mondiale se redressera, l'activité minière et les investissements continueront de croître. Le secteur minier restera en bonne santé à l'avenir.

Naviguer dans l'univers souterrain

Une bonne compréhension de la croûte terrestre et de la géologie d'un gisement minéral sont des facteurs clés pour savoir comment extraire au mieux des matériaux précieux.

Le choix de la méthode, le choix de l'équipement, la conception du système de soutènement de la roche et une douzaine d'autres décisions clés qui affecteront le succès d'une mine souterraine sont tous directement liés à la géologie du gisement. Sans une connaissance approfondie des conditions géologiques du site, de mauvaises décisions peuvent s'avérer désastreuses. Les géologues ont une excellente compréhension de ce à quoi ressemble la Terre sous sa croûte (voir la figure 3) et des propriétés des différents types de roches qui se sont formées au cours de millions d'années. Ce qui est important pour le mineur moderne, c'est l'impact de ces connaissances sur l'extraction du minerai dans un environnement souterrain. La roche est formée avec une variété de propriétés et se compose généralement d'un ou de plusieurs minéraux allant d'éléments chimiques simples à des composés complexes. On sait qu'il existe plus de 3 000 minéraux différents.



Minéraux et géologie

Sur les 155 éléments connus, dont certains ne se produisent pas naturellement, l'oxygène est de loin le plus courant, représentant environ 50 % de la croûte terrestre en poids. Le silicium forme environ 25% et les autres éléments communs tels que l'aluminium, le fer, le calcium, le sodium, le potassium, le magnésium et le titane constituent 99% de la croûte terrestre. Le silicium, l'aluminium et l'oxygène sont présents dans les minéraux les plus courants tels que le quartz, le feldspath et

le mica. Ceux-ci font partie d'un grand groupe de silicates qui sont des composés d'acide silicique et d'autres éléments. Les amphiboles et les pyroxènes contiennent de l'aluminium, du potassium et du fer. Certaines des roches les plus courantes de la planète, le granit et le gneiss, sont composées de silicates. L'oxygène se produit également couramment en combinaison avec des éléments métalliques, qui sont souvent des sources importantes à des fins minières.

Ces composés peuvent faire partie de minerais oxydés, tels que les minerais de fer magnétite et hématite. Le soufre se combine également facilement avec des éléments métalliques pour former des minerais sulfurés, notamment la galène, la sphalérite, la molybdénite et l'arsénopyrite. La chalcopryrite (CuFeS_2) est également un minerai très important et abondant qui contient du cuivre.

D'autres grands groupes de minéraux importants dans l'exploitation minière, comme le montre la figure 4, comprennent les halogénures tels que la fluorite et l'halite ; les carbonates tels que la calcite, la dolomite et la malachite ; les sulfates tels que la barytine ; les tungstates tels que la scheelite ; et des phosphates tels que l'apatite. Rarement, certains éléments peuvent se produire naturellement, sans combinaison. Les plus importants sont les métaux or, argent et cuivre, ainsi que le carbone sous forme de diamants et de graphite.

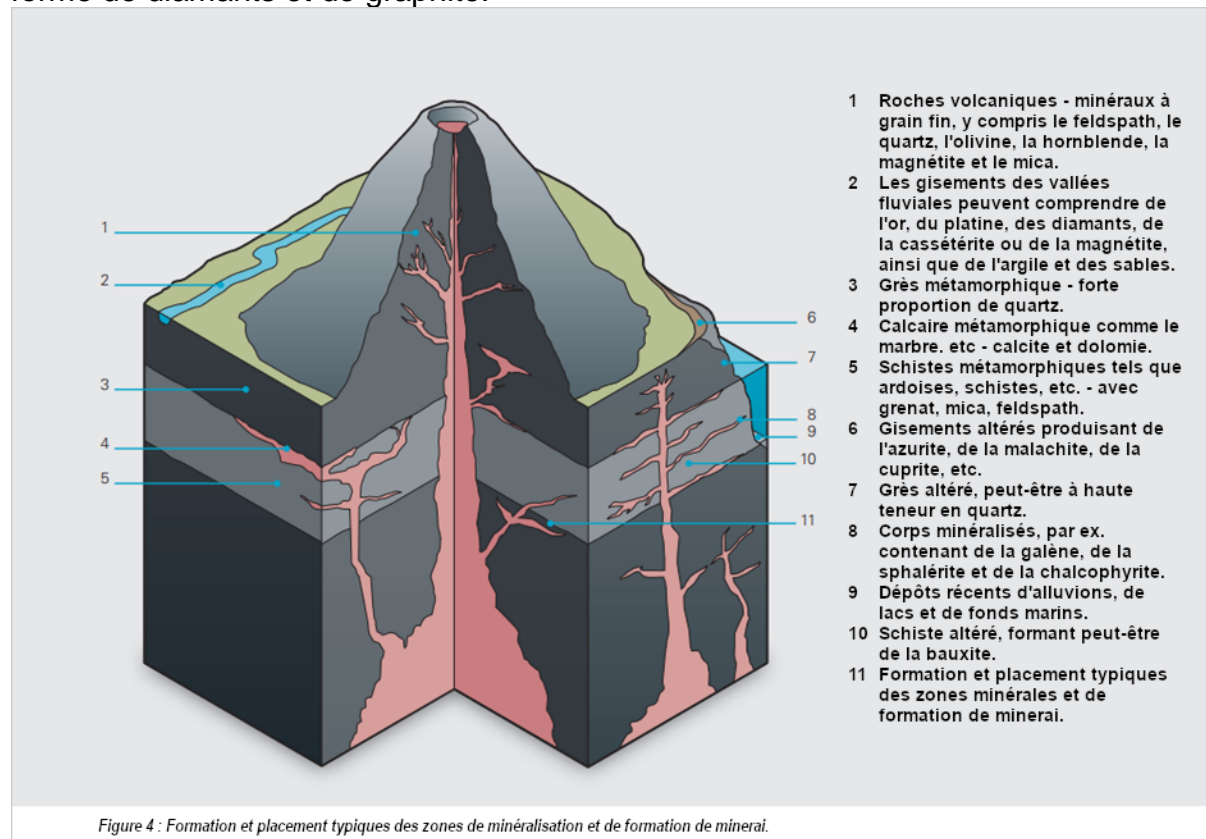


Figure 4 : Formation et placement typiques des zones de minéralisation et de formation de minerai.

Propriétés et caractéristiques

Il est vrai que la minéralisation est rarement pure. Au lieu de cela, il est généralement mixte, composé à la fois de structures homogènes et hétérogènes. Le feldspath représente près de 50% de la composition minérale de la croûte terrestre, suivi des minéraux pyroxène et amphibole, puis du quartz et du mica, constituant environ 90% de la croûte terrestre.

De plus, les minéraux ont une grande variété de propriétés et de caractéristiques, et ce sont elles qui déterminent la meilleure façon de les extraire.

Ces caractéristiques sont :

- **Dureté**
- **Densité**
- **Couleur**
- **Traînée**
- **Lustre**
- **Fracture**
- **Clivage**
- **Forme cristalline**

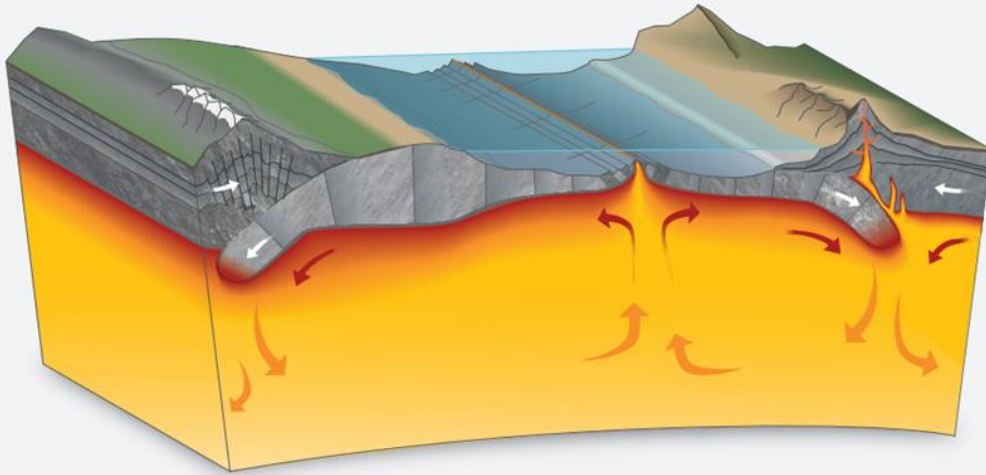
La taille des particules et la mesure dans laquelle le minéral est hydraté (mélangé avec de l'eau) indiquent la façon dont la roche se comportera lorsqu'elle sera excavée.

La dureté est généralement classée selon l'échelle de Mohs en 10 points. La densité des minéraux de couleur claire est généralement inférieure à 3. Les exceptions sont la barytine ou le spath lourd (sulfate de baryum - $BaSO_4$ - densité 4,5), la scheelite (tungstate de calcium - $CaWO_4$ - densité 6,0) et la cérusite (carbonate de plomb - $PbCO_4$ - densité 6,5).

Les minéraux de couleur foncée avec un peu de fer et de silicate ont des densités comprises entre 3 et 4. Les minerais métalliques ont des densités supérieures à 4 et l'or a une densité très élevée de 19,3. Les minéraux contenant du tungstène, de l'osmium et de l'iridium sont normalement encore plus denses. Bien que la densité des minéraux formant le minerai puisse être élevée, la densité totale du minerai dépend entièrement de la roche hôte où ces minéraux existent.

La strie est la couleur de la poudre minérale produite lorsqu'un minéral est gratté ou frotté contre de la porcelaine blanche non émaillée qui peut être différente de la couleur de la masse minérale. La fracture est la caractéristique de surface produite par la rupture d'un morceau de minéral et est généralement inégale dans une direction ou une autre.

Le clivage désigne les propriétés d'un cristal qui lui permettent d'être divisé le long de surfaces planes. La fracture et le clivage peuvent être importants pour la structure des roches contenant des quantités substantielles des minéraux concernés.



Les huit principales plaques tectoniques de la Terre se rencontrent et créent des zones de subduction, où le mouvement relatif transporte les plaques dans le manteau. Les centres d'étalement sont le phénomène inverse, où les plaques tectoniques s'écartent. ces limites géologiquement actives se traduisent souvent par la formation de minéralisations intéressantes.

La roche est normalement composée d'un mélange de matériaux. La roche peut non seulement combiner les propriétés de ces minéraux, mais également présenter des propriétés résultant de la manière dont les roches ont été formées ou ultérieurement modifiées par la chaleur, la pression et d'autres forces dans la croûte terrestre.

Il est relativement rare de trouver un massif rocheux homogène, et les discontinuités telles que les failles remplies de matériaux concassés, les non-conformités majeures de jointoiement et d'assise sont difficilement prévisibles.

Ces discontinuités sont également importantes, non seulement pour l'intégrité structurelle d'une mine et l'accès aux gisements minéraux, mais également en tant que voies pour les fluides qui provoquent des concentrations minérales dans la Terre.

Pour que l'exploitation minière soit économiquement viable, les minéraux doivent être présents en concentration suffisante pour valoir la peine d'être extraits et dans des structures rocheuses pouvant être excavées de manière sûre et économique. Il doit également être possible d'enrichir les minéraux de manière économique.

Pour le développement minier et le forage de production, la roche doit être correctement évaluée car les résultats auront une incidence sur les taux de pénétration de forage projetés, la qualité du trou et les coûts de l'acier de forage. Afin de déterminer les caractéristiques globales de la roche, il est nécessaire de faire la distinction entre les propriétés microscopiques et macroscopiques.

Comme la roche est composée de grains de divers minéraux, ses propriétés microscopiques comprennent:

- Composition minérale
- Taille d'un grain
- La forme et la distribution du grain
- Si les grains sont lâches ou cimentés ensemble

Collectivement, ces facteurs comprennent les propriétés de la roche telles que la dureté, l'abrasivité, la résistance à la compression et la densité.

À leur tour, ces propriétés de la roche déterminent le taux de pénétration qui peut être atteint lors du forage de trous de mine et l'étendue de l'usure de l'équipement de forage. Dans certaines circonstances, certaines caractéristiques minérales influenceront directement la méthode d'extraction. De nombreux sels, par exemple, sont particulièrement élastiques et peuvent absorber le choc du dynamitage.

Tableau des principaux types de roches ignées

Teneur en silice (SiO ₂)	Roches plutoniques	Digues et seuils	Volcanique (principalement lave)
Basique - <52% SiO ₂	Gabbro	Diabase	Basalte
Intermédiaire – 52-65% SiO ₂	Diorite	Porphyrite	Andésite
	Syenite	Syenite	Porphyre trachytique
Acide - >65% SiO ₂	Diorite quartzifère	Porphyrite quartzifère	Dacite
	Les Granodiors	Porphyre granodiorite	Rhyodacite
	Granit	Porphyre de quartz	Rhyolite

Figure 5 : Principaux types de roches ignées selon la composition chimique (teneur en silice) et l'emplacement où le magma s'est transformé en roche solide.

Perspectives de forage

La forabilité dépend de la dureté des minéraux constitutifs de la roche et de la taille des grains et de la forme cristalline, le cas échéant. Par exemple, le quartz, qui est l'un des minéraux les plus courants dans la roche, est un matériau très dur, extrêmement difficile à percer et qui causera certainement une usure importante, en particulier sur les forets. C'est ce qu'on appelle l'abrasion. À l'inverse, une roche à haute teneur en calcite peut être relativement facile à forer et causer peu d'usure aux trépan.

En ce qui concerne la forme cristalline, les minéraux à haute symétrie, tels que la galène cubique, sont plus faciles à forer que ceux à faible symétrie, tels que les amphiboles et les pyroxènes.

Une structure à gros grains est plus facile à forer et provoque moins d'usure sur le train de tiges qu'une structure à grains fins. Par conséquent, des roches ayant essentiellement la même teneur en minéraux peuvent être très différentes en termes de forabilité. Par exemple, le quartzite peut être à grain fin (0,5-1,0 mm) ou dense (taille de grain 0,05 mm).

Un granite peut être à grain grossier (taille > 5 mm), à grain moyen (1-5 mm) ou à grain fin (0,5-1,0 mm). Une roche peut également être classée en fonction de sa structure.

Si les grains minéraux sont mélangés en une masse homogène, la roche est dite massive (isotrope), comme la plupart des granites. Dans les roches mixtes, les grains ont tendance à être séparés en couches, que ce soit en raison de la formation sédimentaire ou de l'action métamorphique due à la chaleur et/ou à la pression.

Par conséquent, il est important d'identifier les origines de la roche, qui sont divisées en trois classes :

- Igné ou magmatique – formé à partir de lave solidifiée à la surface ou près de celle-ci, ou de magma souterrain.
- Sédimentaire – formé par le dépôt de matériaux réduits provenant d'autres roches et de restes organiques ou par précipitation chimique à partir de sels, ou similaire.
- Métamorphique – formé par la transformation de roches ignées ou sédimentaires, dans la plupart des cas par une augmentation de la pression et de la chaleur.

Roche ignée et sédimentaire

Les roches ignées se forment lorsque le magma se solidifie, soit sous forme de roche plutonique, profondément dans la croûte terrestre lorsqu'elle remonte à la surface dans des dykes, traversant d'autres roches ou seuils suivant des plans de stratification, soit sous forme de roche volcanique sous forme de lave ou de cendres sur la surface. Les constituants minéraux les plus importants sont le quartz et les silicates de divers types, mais principalement les feldspaths. Les roches plutoniques se solidifient lentement et sont donc à gros grains, tandis que les roches volcaniques se solidifient relativement rapidement et deviennent à grains fins, formant parfois même du verre.

Selon l'endroit où le magma se solidifie, la roche porte des noms différents, même si sa composition chimique est la même, comme le montre le tableau des principaux types de roches ignées (Figure 3). Une autre subdivision des types de roches dépend de la teneur en silice. Les roches à forte teneur en silice sont dites acides, et celles à faible teneur en silice sont dites basiques illustrées (Figure 5).

Les roches sédimentaires sont formées par le dépôt de matériaux et leur consolidation sous la pression des morts-terrains. Cela augmente généralement la résistance de la roche avec l'âge, en fonction de sa composition minérale. La roche sédimentaire est formée par une action mécanique telle que l'altération ou l'abrasion sur une masse rocheuse, ou le transport par un milieu tel que l'eau qui coule ou le vent et le dépôt ultérieur. Les origines de la roche détermineront donc en partie les caractéristiques de la roche sédimentaire. L'altération ou l'érosion peuvent se dérouler à des rythmes différents, tout comme le transport, et sont affectées par le climat de l'époque et la nature de la roche d'origine.

Les cas particuliers de roches sédimentaires comprennent celles formées par des dépôts chimiques tels que les sels et les calcaires, et des matières organiques telles que les calcaires

coralliens et coquilliers et les charbons, tandis que d'autres seront une combinaison, par exemple, de sables bitumineux et de schistes bitumineux.

Un autre ensemble de cas particuliers est celui des dépôts glaciaires, dans lesquels le dépôt est généralement aléatoire, en fonction des mouvements de la glace. Plusieurs couches distinctes peuvent souvent être observées dans une formation sédimentaire, bien que celles-ci puissent être inégales en raison des conditions de dépôt. Les couches peuvent être inclinées et pliées par des mouvements de sol ultérieurs. Les roches sédimentaires constituent une famille très hétérogène aux caractéristiques très variables, comme le montre le tableau des types de roches sédimentaires (Figure 6).

Certains types de roches sédimentaires

Roche	Matériel d'origine
Conglomérat	Gravier, pierres et rochers, généralement avec du ciment calcaire ou quartzitique
Grauwacke	Granulométrie variable de l'argile au gravier, souvent de forme anguleuse
Grès	Sable
Argile	Matériaux argileux à grains fins et aluminates précipités
Calcaire	Carbonate de calcium précipité, coraux, coquillages
Charbons	Végétation en conditions marécageuses
Sel gemme, potasse, gypse, etc.	Produits chimiques dans des solutions précipitées par la chaleur
Loess	Argile et sable soufflés par le vent

Figure 6 : Types de roches sédimentaires typiques et matériau dont elles sont issues.

Roche métamorphique

Les effets de l'action chimique, de l'augmentation de la pression due au mouvement du sol à de grandes profondeurs et/ou de la température d'une formation rocheuse peuvent parfois être suffisamment graves pour provoquer une transformation de la structure interne et/ou de la composition minérale de la roche d'origine. C'est ce qu'on appelle le métamorphisme. Par exemple, la pression et la température peuvent augmenter sous l'influence de remontées de magma ou parce que les strates se sont enfoncées plus profondément dans la croûte terrestre. Cela entraînera la recristallisation des minéraux ou la formation de nouveaux minéraux.

Une caractéristique de la roche métamorphique est qu'elle se forme sans refusion complète, sinon elle serait classée ignée. L'action métamorphique rend souvent les roches sédimentaires plus solides, plus denses et plus difficiles à forer. Cependant, de nombreuses zones métamorphiques, en particulier formées dans les zones de contact adjacentes aux intrusions ignées, sont des sources importantes de minéraux précieux, tels que ceux concentrés par dépôt à partir de solutions hydrothermales dans des veines.

Comme le métamorphisme est un processus secondaire, il peut ne pas être clair si une roche sédimentaire est devenue métamorphique ; cela dépend du degré de surpression et de température auquel il a été soumis. La composition minérale et la structure donneraient probablement le meilleur indice.

En raison de la nature de leur formation (voir la figure 7), les zones métamorphiques seront probablement associées à une augmentation des failles et des désordres structuraux, rendant plus difficile la planification du développement minier et un forage efficace.

Roches métamorphiques typiques

Type de roche	Roche originale	Degré de métamorphisme
Amphibolite	Basalte, diabase, gabbro	Haut
Micaschiste	Mudstone, grauwacke, etc.	Moyen à élevé
Gneiss	Diverses roches ignées	Haut
Schiste vert	Basalte, diabase, gabbro	Faible
Quartzite	Grès	Moyen à élevé
Leptite	Dacite	Moyen
Ardoise	Schiste argileux	Faible
Gneiss veiné	Roches silicatées riches en acide silicique	Haut
Marbre	Calcaire	Faible

Figure 7 : Types typiques de roches métamorphiques et leur origine, suivis du degré de métamorphisme nécessaire.

Propriétés macroscopiques des roches

Les propriétés macroscopiques des roches comprennent la formation de lattes, la fissuration, les zones de contact, la stratification, les veines et l'orientation. Ces facteurs sont souvent d'une grande importance dans le forage. Par exemple, des fissures ou des formations inclinées et stratifiées peuvent provoquer une déviation du trou, en particulier dans les trous longs, et ont tendance à coincer les outils de forage. Cependant, les méthodes modernes de contrôle du forage peuvent considérablement réduire ce problème.

Les roches molles ou friables rendent difficile l'obtention d'une bonne qualité de trou car les parois peuvent s'effondrer. Dans les cas extrêmes, l'air ou le fluide de rinçage disparaîtra dans les fissures de la roche, sans enlever les déblais du trou. Dans certaines roches, il peut y avoir des cavités importantes telles que des passages de solution dans les calcaires ou des bulles de gaz dans les roches ignées.

Ceux-ci peuvent nécessiter un pré-injection pour obtenir des propriétés de forage raisonnables. À plus grande échelle, la structure de la roche peut déterminer la méthode d'exploitation minière en fonction de facteurs tels que la forme du gisement minéral et des qualités telles que la friabilité, la formation de blocs, la contrainte in situ et la plasticité. La forme du gisement minéral déterminera comment il doit être développé. La qualité de la roche mère qui formera la structure autour des ouvertures souterraines peut être un facteur majeur pour déterminer la faisabilité de l'exploitation d'un gisement minéral. Cela est principalement dû à son effet sur le degré de soutien requis à la fois pour les efforts au niveau de la production et pour les dérives de développement.

C'est un équilibre économique délicat que de choisir entre un investissement dans des galeries de développement en terrain stable, peut-être sans minéralisation utile, et des galeries au sein du gisement minéral, qui peuvent avoir une durée de vie plus courte mais nécessitent davantage de mesures d'accompagnement. Bien qu'il soit avantageux de minimiser les galeries et les rampes de développement dans les stériles non productifs et de les raccourcir le plus possible, la stabilité et la longévité sont privilégiées. Lorsqu'il s'agit d'actifs de développement majeurs tels que des puits ou des niveaux de transport, ceux-ci

sont presque toujours placés dans les zones de sol les plus stables que l'on puisse trouver, car on s'attend à ce qu'ils durent longtemps, avec d'autres galeries ou niveaux construits à partir d'eux. Dans des cas extrêmes, il peut s'avérer que le gisement minéral ne peut pas supporter les travaux de développement sans des dépenses considérables. Dans ces circonstances, il pourrait être préférable d'installer des galeries de développement à proximité et sous le gisement minéral. Cela pourrait ensuite être exploité en utilisant le forage et le dynamitage de longs trous, le minerai étant soutiré par le bas. Ceci, cependant, est rare et la procédure recommandée est de laisser la méthode d'exploitation dicter la façon dont les galeries sont développées, tout en tenant compte des zones rocheuses critiques.

Selon l'ampleur de la perturbation à laquelle les strates minéralisées ont été soumises, le gisement minéral peut varier en forme de roche stratifiée à diverses inclinaisons à des formations filoniennes très déformées et irrégulières nécessitant un schéma de développement très irrégulier. Ce dernier peut nécessiter de petites galeries pour exploiter des minéraux précieux, bien que la productivité des équipements miniers modernes rende les galeries de plus grande section plus économiques, malgré l'excavation de plus de stériles. Cela dit, il existe aujourd'hui des machines minières à profil bas qui peuvent aider les mineurs à extraire le moins possible de stériles, et la demande pour ce type d'équipement devrait augmenter.

La tendance de la roche à se fracturer, parfois de manière imprévisible, est également importante pour déterminer des facteurs tels que les exigences de support de la roche et le remplissage des trous périphériques pour éviter le dépassement. Bien que les procédures de dépassement et de contour ne soient pas aussi strictes dans les mines que dans les tunnels civils, de bons résultats apporteront des avantages à la fois en termes de production et de sécurité. Un débordement minimisé empêchera l'excavation de trop de stériles, et un bon contour préserve la structure d'une galerie et facilite le soutènement de la roche. Il est clair que les structures rocheuses et les minéraux qu'elles contiennent peuvent donner lieu à une grande variété de stratégies minières possibles.

Évidemment, plus on obtient d'informations, meilleures sont les chances de succès minier. Si des incertitudes surviennent en raison de conditions de terrain imprévues, de corps minéralisés en voie de disparition ou de facteurs tels qu'une infiltration d'eau excessive, l'avantage fourni par un équipement minier moderne et productif sera perdu car il sera forcé de rester inactif.

Pour éviter ces situations, il est primordial d'effectuer le plus de travaux d'exploration possibles, non seulement en ce qui a trait à l'existence et à la localisation des minéraux d'intérêt, mais aussi pour établir les qualités de la roche dans et autour du gisement. Dans l'exploitation minière souterraine, les informations provenant des forages d'exploration en surface et des méthodes géophysiques d'investigation sont normalement complétées par des sondages ou des carottages souterrains. Les logiciels informatiques modernes peuvent également aider à traiter les grandes quantités de données et à en déduire les meilleures stratégies d'exploitation des gisements minéraux.

La valeur du minerai à extraire déterminera le niveau des travaux d'investigation, mais il y aura un niveau minimum pour chaque type de mine afin de donner une certaine assurance de succès. Par exemple, les dépôts stratifiés de faible valeur, qui sont connus pour être

assez uniformes en épaisseur et avoir des pentages réguliers, peuvent ne pas nécessiter de nombreux forages, bien qu'il puisse encore y avoir des surprises dues aux lessivages ou aux failles sédimentaires.

D'autre part, les gisements d'or dans des formations rocheuses déformées nécessiteront de fréquents forages souterrains, ainsi qu'à partir de la surface, pour donner l'assurance de l'emplacement du gisement et pour échantillonner les minéraux qu'il contient.

Après avoir déterminé la valeur et la forme d'un gisement minéral, la nature et la structure des roches qui l'entourent et la stratégie probable de développement de la mine, il devrait être possible de déterminer la pertinence des diverses méthodes d'excavation pour la roche susceptible d'être rencontré.

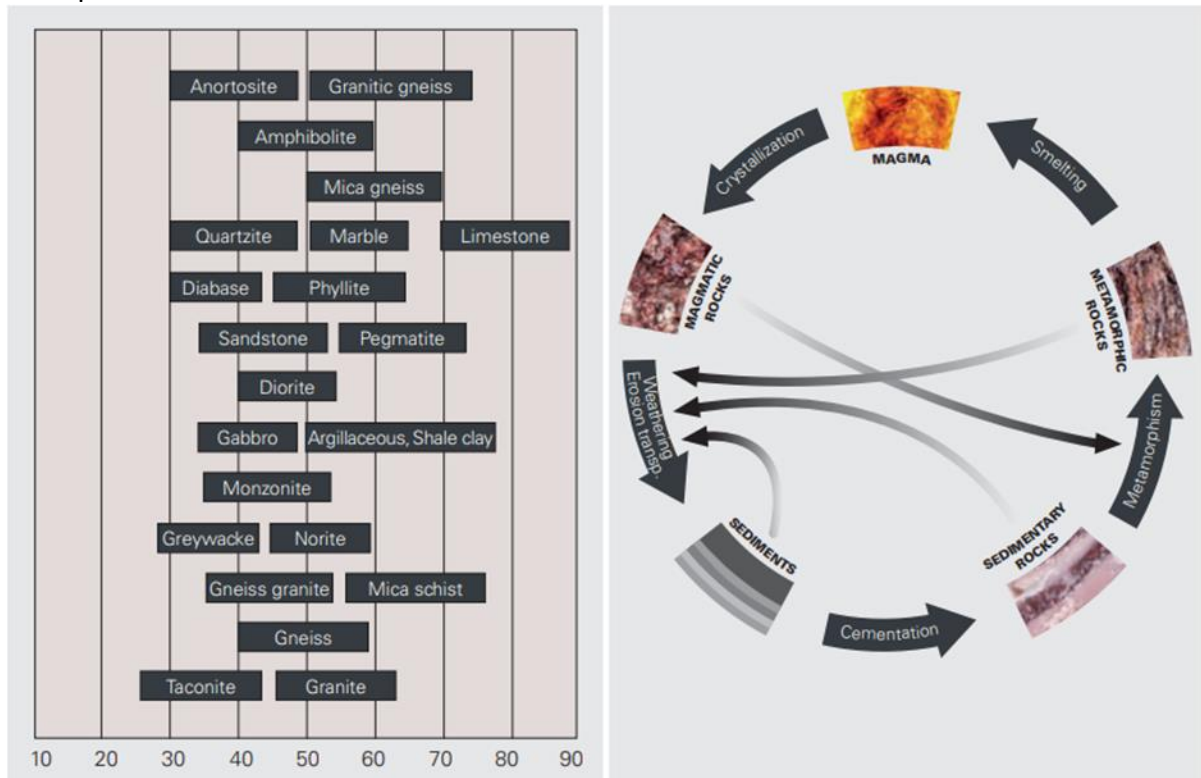


Figure 8 : Relation entre l'indice de taux de forage et divers types de roche.

Le cycle de formation des roches montre la création de divers types de roches et leur dégradation.

Classement des roches

Un certain nombre de systèmes de classification des roches ont été développés afin de déterminer systématiquement les exigences d'excavation et de soutènement, si une méthode particulière est appropriée et la quantité de consommables nécessaires. généralement défini par un objectif visé, tel que le niveau de support requis ou la forabilité de la roche. Les méthodes développées pour évaluer la forabilité visent à prédire la productivité et l'usure des outils. Les facteurs de forabilité comprennent le taux de pénétration probable de l'outil en proportion de l'usure de l'outil, les qualités de verticalité du trou, sa rectitude et toute tendance au blocage de l'outil.

La forabilité de la roche est déterminée par plusieurs facteurs dirigés par la composition minérale, la taille des grains et la fragilité. En termes bruts, la résistance à la compression ou la dureté de la roche peuvent être liées à la forabilité pour des calculs approximatifs, mais la question est généralement plus compliquée. L'Université technique norvégienne a

déterminé des méthodes plus sophistiquées : le Drilling Rate Index (DRI) et le Bit Wear Index (BWI). Le DRI décrit la vitesse à laquelle un foret particulier peut pénétrer. Il comprend également des mesures de fragilité et de forage avec un petit trépan rotatif standard dans un échantillon de roche. Plus le DRI est élevé, plus le taux de pénétration est élevé, et cela peut varier considérablement d'un type de roche à l'autre, comme le montre l'histogramme (Figure 8).

Il convient de noter que les trépans modernes améliorent considérablement les taux de pénétration possibles dans les mêmes types de roche. De plus, il existe différents types de mèches disponibles pour s'adapter à certains types de roches. Par exemple, les mèches spéciales Secoroc pour les formations molles, les mèches avec des boutons de calibre plus gros pour les formations abrasives, et les mèches de guidage, les tiges de direction ou les mèches de retrac pour les formations où la déviation des trous est un problème.

Le BWI, ou Bit Wear Index, donne une indication de la vitesse à laquelle le bit s'use, déterminée par un test d'abrasion. Plus le BWI est élevé, plus l'usure est rapide. Dans la plupart des cas, le DRI et le BWI sont proportionnels l'un à l'autre. Cependant, la présence de minéraux durs peut produire une forte usure du trépan malgré une capacité de forage relativement bonne. C'est particulièrement le cas avec le quartz, dont il a été démontré qu'il augmente considérablement les taux d'usure. Certains sulfures dans les corps minéralisés sont également relativement durs, ce qui nuit à la forabilité.

Les outils de classification des roches couramment utilisés comprennent le système Q (Barton, et al, par l'intermédiaire de l'Institut géotechnique norvégien), Rock Mass Rating RMR (Bieniawski) et l'indice de résistance géologique GSI (Hoek, et al). L'évaluation de la masse rocheuse de Bieniawski intègre l'ancienne désignation de la qualité de la roche (RQD - Deere, et al), avec quelques améliorations importantes qui tiennent compte des propriétés supplémentaires de la roche.

Tous ces éléments donnent des indications précieuses sur la facilité d'excavation de la roche et ses propriétés autoportantes. Dans la plupart des cas, les ingénieurs emploieront plus d'un moyen de classification des roches pour mieux comprendre son comportement et comparer les résultats.