

CHAPITRE 3

Processus de minéralisation :

Les processus géologiques qui créent les gisements ne sont pas différents de ceux impliqués dans la formation des roches. Cependant, la formation d'un gisement est un événement exceptionnel dans lequel se sont présentées des conditions bien particulières. Trois facteurs sont essentiels dans leur formation : (1) la source de la substance, (2) les moyens et les conditions de transport et (3) les mécanismes de dépôt et de concentration. Bien que le rôle et l'importance de chacun de ces facteurs soient inhérents d'un gisement à l'autre, plusieurs similitudes se trouvent entre les dépôts d'un même type ou d'une même classification. Un exemple de cette similitude se trouve dans la morphologie des gisements hydrothermaux, qui est normalement définie par les chemins qu'ont suivi les fluides minéralisateurs. Ainsi la source, le transport et le dépôt font partie d'un système encadré par les paramètres physiques et chimiques donnés dans l'environnement géotectonique au moment de la minéralisation.

Syngénétique : se dit d'une minéralisation qui s'est formée en même temps que la roche encaissante. Exemple : SEDEX et sulfures massifs volcanogènes

Epigénitique : se dit d'une minéralisation qui s'est formée en après la roche encaissante. Exemple : Filon de quartz aurifères, Cu de type lits rouges.

Stratabound : se dit d'une minéralisation qui est encaissée uniquement par une unité de roche encaissante.

Stratiforme : se dit d'un corps minéralisé ayant la forme d'une strate, soit une forme tabulaire, et qui est concordant avec la stratigraphie encaissante, observés dans des gîtes syngénétiques.

Si nous menons une exploration minière tout en ignorant les causes qui ont engendrées ces minéralisations alors nous faisons de la prospection aveugle. Ainsi le principe de base de la gîtologie est la connaissance des causes et des processus de mise en place de la minéralisation. Un dépôt minéral résulte des processus ignés, exogènes, hydrothermaux et métamorphiques. On a plusieurs causes et facteurs qui permettent une minéralisation.

AGENTS MINÉRALISATEURS

La minéralisation est une concentration d'un élément chimique donné dans une zone bien définie. On distingue deux types de minéralisation :

- **Minéralisation primaire**

Elle résulte de la cristallisation directe provenant de la différenciation magmatique. Il s'agit d'une distribution primitive des éléments chimiques dans une roche. Il s'agit d'un gisement syngénétique formé en même temps que la roche encaissante. Ex : l'or dans un granite.

○ **Minéralisation secondaire**

Elle provient des sédiments issus de l'altération des roches préexistantes. L'altération peut être chimique ou mécanique. Ce type de minéralisation donne des gisements épigénétiques formé après la roche encaissante. Ex : les placers, les gisements de bauxite.

Un agent minéralisateur est tout corps ou substance qui favorise la mise en place d'une minéralisation. Ce sont ; l'eau, les volatiles, les bactéries anaérobies, la matière organique végétale et carbonneuse.

○ **L'eau**

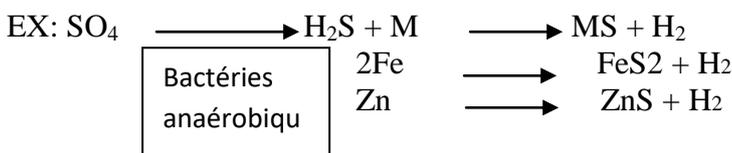
L'eau constitue le principal agent de la minéralisation. Elle joue un rôle essentiel de transport de la minéralisation en solution ou en suspension. Elle a aussi un rôle de solvant en fonction de sa température et son acidité. Les eaux superficielles ont en particulier une action érosive qui favorise la formation des gisements tels que les placers.

○ **Les volatiles**

Ce sont le soufre, le chlore, le fluore, le bore, le phosphore et le dioxyde de carbone. Ils ont pour rôle d'augmenter la mobilité des substances minérales afin de favoriser leur concentration ou leur minéralisation. En effet, certaines substances minérales sont incapables de se déplacer tout seul en solution. Elles s'associent alors aux volatiles au cours de leur transport pour faciliter leur déplacement surtout dans les dernières phases de la cristallisation d'un magma (processus hydrothermal). Les solutions hydrothermales de 100 à 400°C et sous pression contiennent divers corps tels que le cuivre, le plomb, le zinc, le titane s'associent aux volatiles pour se minéraliser : $Au^+ + Cl^- \rightarrow AuCl$.

○ **Les bactéries anaérobies**

Certaines bactéries sont réductrices de sulfates et permettent la formation de l'hydrogène sulfuré (H₂S) qui à la rencontre des métaux facilement sulfurables donne des sulfures de métaux.



○ **La matière organique végétale et carbonneuse**

La matière organique contribue au processus de minéralisation. C'est le cas de l'uranium et certains sulfures qui se fixent de préférence sur des fragments de végétaux transformés en matière organique.

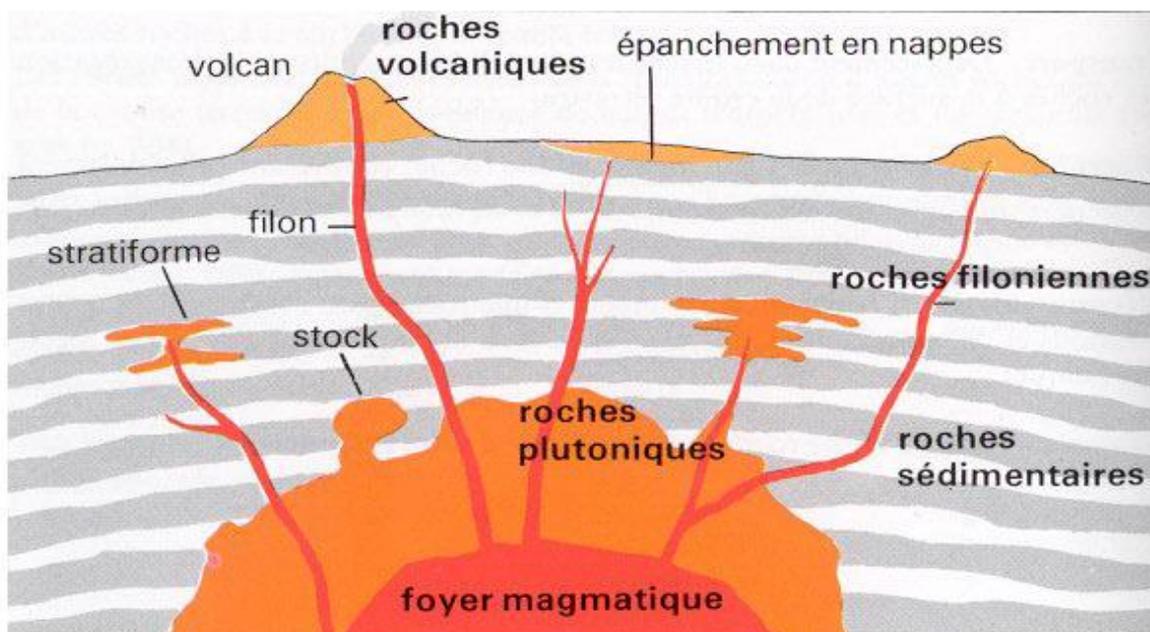
1- SÉRIES DES GISEMENTS MINÉRAUX

Pour comprendre l'origine des minéraux existants et de ceux qui naissent constamment à la surface et à l'intérieur de la Terre, il est important de connaître les conditions de leur formation. La très longue évolution géologique de la Terre est caractérisée par des processus compliqués qui, dans de nombreux cas, s'entremêlent ou bien se suivent. En gros, on peut les distinguer en processus **magmatique**, **sédimentaire** et **métamorphique**.

1. 1- MAGMATIQUE

Lors du processus magmatique, des minéraux se forment à partir de silicates en fusion incandescente (le magma), riches en combinaisons volatiles. Le magma prend naissance dans l'écorce terrestre, dans le manteau d'où, sous l'influence de phénomènes complexes (plissements, fractures), il parvient dans les couches supérieures où il se refroidit et se solidifie lentement. Au cours de son ascension, il absorbe une partie des roches voisines qui s'y dissolvent et modifient son caractère chimique. Le refroidissement du magma provoque la séparation des fluides et des matières solides et la différenciation magmatique. Cela signifie que les minéraux les plus légers restent dans la partie supérieure de la masse en voie de solidification et que les plus lourds descendent. Les minéraux qui se différencient les premiers cristallisent dans le magma sous la forme de cristaux parfaitement développés, les autres s'adaptant ensuite aux éléments cristallisés les premiers (voir schéma).

Au cours de la différenciation magmatique, apparaissent des roches aux compositions chimiques et minérales différentes. On parlera par exemple de roches ultra basiques (péridotite, picrite), riches en MgO et FeO, mais pauvres en SiO₂, de Al₂O₃ CaO et formées de feldspaths, de pyroxènes et d'amphiboles. Les roches acides (granites, rhyolites) sont riches en SiO₂, enrichies de Na₂O et de K₂O; mais plus pauvres en CaO, FeO, et MgO. Elles sont formées en général de quartz,



Genèse des roches magmatiques (Schumann, 1989)

de feldspaths, de micas et, très rarement, de pyroxènes et d'amphiboles.

Au cours de la différenciation magmatique, peut se produire une accumulation plus marquée de certains minéraux utiles. C'est ainsi que naissent par exemple les gisements de magnétite, d'ilménite, de chromite, de chalcopirite, de platine, ... La caractéristique de ces gisements est leur évolution irrégulière, en veines ou en amas.

Au stade final de la solidification du magma, se produit souvent le départ de silicates sous la forme de corps irréguliers, de lentilles et de veines d'aspect granuleux, les pegmatites. Elles se forment soit à l'intérieur de la masse magmatique soit dans sa périphérie. A ces pegmatites sont liés de nombreux minéraux de grande importance économique. En font partie les feldspaths, les quartz et les micas qui peuvent atteindre chacun des dimensions considérables. On y trouve aussi les minéraux de lithium ou lithinifères, des concentrations de zircons, de monazites, de cassitérites, d'émeraudes, de topazes, de saphirs, d'apatites, de grenats et d'un grand nombre d'autres minéraux.

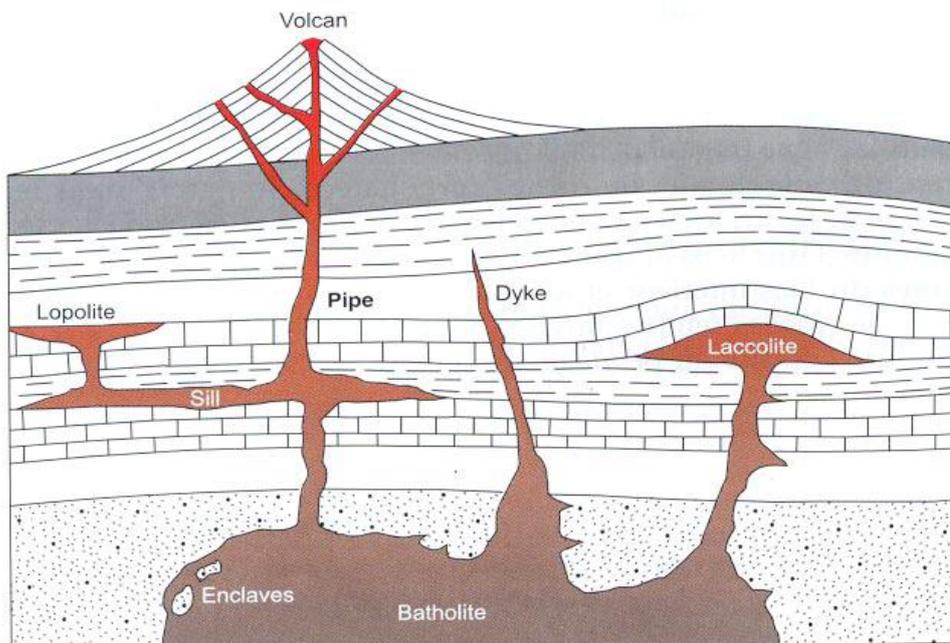


Schéma représente les intrusions, formation des roches plutoniques (D.G.R.N.E., Dejonghe, 1998)

Les types morphologiques de concentration minérale sont les suivants (schéma suivant) :

- Minéralisation **massive**, ou **disséminée** dans la roche support,
- Minéralisation **concordante** avec son enveloppe (gisement stratiforme par exemple),
- Minéralisation **discordante** :
 - **lentilles, amas** (Masse minérale, de forme irrégulière, enveloppée de roches (roches encaissantes) dont la nature est différente)
 - **filons** (Remplissage d'une fracture (faille, diaclase) dans une roche (dite roche encaissante) par un matériau différent de la roche), **stockwerks** (Mot allemand, en anglais stockwork. Minéralisation sous forme de réseau très densifié de petits filons)
 - **pipes** (Sorte de cheminée d'explosion volcanique) et **cheminées**

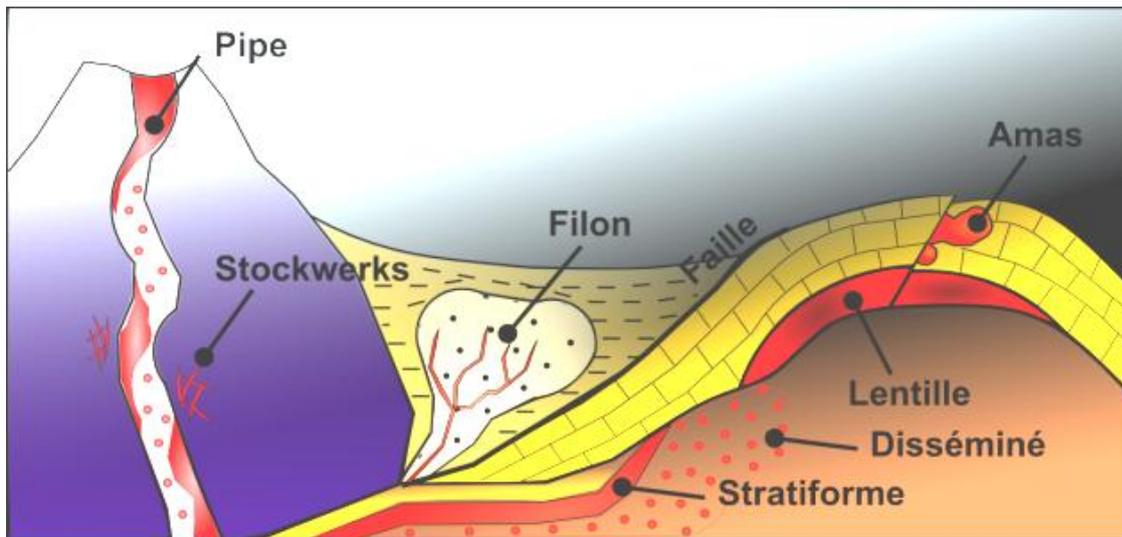


Schéma représente les concentrations minérales selon la morphologie

1. 2- PNEUMATOLYTIQUE

Parfois les minéraux se dégagent directement des gaz et vapeurs brûlants. Cette formation est dite pneumatolytique. . Ainsi se forment, par exemple, la tourmaline, la topaze et la wolframite. Au début du processus post-magmatique, les dissolutions résiduelles du magma, enrichies de matières volatiles (bore, lithium, fluor ...) jouent le rôle principal. Ces dissolutions brûlantes, accompagnées de gaz et de vapeurs, s'échappent en bordure de la masse magmatique et s'élèvent par les fentes et les crevasses des roches vers la surface. En même temps, elles se refroidissent et donnent naissance à de nouveaux minéraux qui recouvrent les parois des fractures. Cette formation de minéraux est dite hydrothermale. De cette manière, peuvent naître le quartz, la dolomite, et la calcite. Quand il existe des éléments de métaux lourds dans ces dissolutions, on assiste à la formation de filons métallifères.

Si les gaz et les dissolutions agissent tout en se refroidissant sur les roches voisines, on assiste à la naissance de minéraux de contact métasomatiques tels que la vésuvianite, la pyrrhotite, la magnétite, ...

Si le magma parvient à la surface du sol lors d'une activité volcanique les conditions de solidification sont très différentes de celles qui règnent à l'intérieur de la Terre. La lave se fige très rapidement car elle subit un refroidissement brutal, un abaissement de la pression et la disparition des substances volatiles. Si le magma se solidifie à proximité de la surface, une partie cristallise d'abord en forme de protubérance, le reste cristallise ensuite très rapidement en petits cristaux. Si le magma arrive jusqu'à la surface, le refroidissement peut être si rapide qu'il se forme une masse vitreuse. Les gaz peuvent se former parfois dans le magma en voie de solidification, les cavités qui en résulte, peuvent ensuite être remplies par différents minéraux comme la calcite, le quartz, la calcédoine, ... De même, les émanations de gaz dans les fumerolles et les solfatares donnent naissance à un grand nombre de minéraux comme le soufre, la sassolite, l'alunogène, le salmiac, ... Les eaux thermales volcaniques jaillissent sous forme de sources minérales, en particulier d'eau gazeuse. De ces eaux chaudes ou froides s'éliminent des minéraux tels que l'aragonite, la calcite, la calcédoine, le cinabre (schéma suivant)

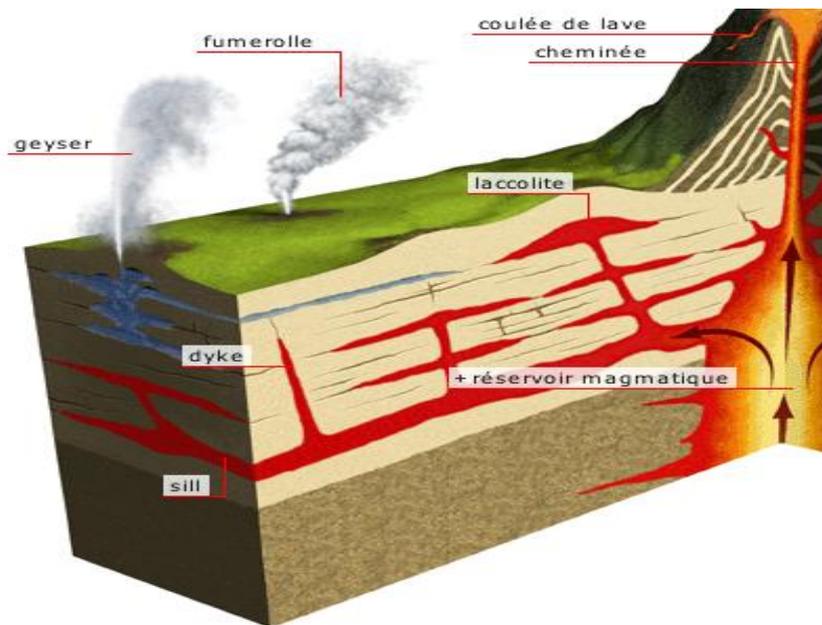


Schéma représente quelques type des concentrations minérales hydrothermales

1. 3- SÉDIMENTAIRE

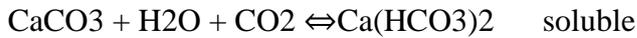
Tous les minéraux de la surface terrestre sont constamment exposés à l'influence de l'atmosphère (O₂, CO₂), de l'hydrosphère (H₂O), aux variations de température ou à l'action des organismes vivants qui les décomposent ou les transforment en nouveaux minéraux, stables dans les conditions données. Ce processus est lent, mais ininterrompu et l'on appelle altération (voir par exemple l'Altération du granite. L'accumulation consécutive des minéraux utiles décomposés ou nouvellement formés aboutit à des gisements sédimentaires.

Les variations de température (soleil, gel) et les effets destructifs du froid (eau, glace) provoquent une décomposition mécanique des roches en minéraux différents. Ils peuvent se concentrer directement sur place, ou bien, sous l'action de la pesanteur, ils glissent sur les pentes (alluvions métallifères). L'or, le platine, la cassitérite, la wolframite, la magnétite, le grenat et d'autre encore se concentrent de cette manière ; il s'agit donc surtout de minéraux insolubles et qui s'oxydent difficilement.

Les minéraux résultant de la décomposition d'une roche peuvent encore être transportés par l'eau et le vent et déposés dans des endroits souvent très éloignés de leur lieu d'origine ; en même temps se produit un classement progressif des particules selon leur taille et leur poids spécifique. Les dépôts des minéraux par les cours d'eau donnent naissance aux gisements alluvionnaires. C'est là que se déposent les minéraux lourds, durs et résistants à l'abrasion et aux chocs. Le dépôt de minéraux utiles peut se produire également dans les lacs et les mers où les ont transportés les cours d'eau. Ainsi naissent différents gisement lacustres ou marins. C'est le cas, par exemple, des gisements d'or, de monazite ou de diamant. Des minéraux sensiblement plus légers tels que le quartz ou le feldspath peuvent également constituer des dépôts exploitables.

L'action de l'eau et des gaz atmosphériques, en même temps que l'érosion mécanique et la décomposition biologique aboutissant à l'altération chimique. Les minéraux se transforment ou se dissolvent pour donner naissance à des minéraux secondaires.

Cependant, d'une manière générale, c'est surtout la dissolution de la silice et du calcaire qui intervient dans les processus géologiques. En effet, contrairement à une idée répandue, la silice est aussi soluble que le calcaire dans l'eau pure. C'est l'apport de gaz carbonique (par l'eau de pluie mais surtout en traversant le couvert végétal) dissout dans l'eau qui augmente considérablement (quasi 200 fois) la solubilité du calcaire. Il forme alors un bicarbonate instable par la réaction :



C'est le processus responsable de la formation de karsts dans les roches calcaires, mais également des poches « déconsolidées » au sein des sables calcaireux. »

Par le lessivage de certains gisements de minéraux utiles, sous l'action des eaux de surface, il arrive qu'une partie des minéraux solubles soit entraînée, les minéraux non solubles restant sur place. Ainsi se forment des gisements résiduels. On peut prendre pour exemple les concentrations de minéraux qui naissent de la latérisation dans les régions chaudes et tropicales, où peuvent se constituer des dépôts de limonite, de nickel, de silicates, ... On range dans les gisements résiduels les gisements de kaolinite résultant de l'altération chimique des roches feldspathiques. D'autres exemples de gisements résiduels sont ceux de phosphate, de gypse, ... C'est le cas d'un grand nombre de gisements de fer, de cuivre, de manganèse, de vanadium, d'uranium, de phosphates, ... Les deux types de gisements, gisements résiduels ou gisements d'infiltration sont souvent étroitement liés ; ce qui apparaît dans les nombreux exemples de certains regroupements de minéraux. Lors de l'altération des roches de surface (zone d'oxydation) se produit la transformation des combinaisons sulfureuses (pyrite, chalcopyrite, galène, sphalérite) en sels oxygénifères (malachite, azurite, goethite, cérusite).

Les produits d'altération chimique des minéraux entraînés dans les lacs et les mers peuvent, à la suite d'autres processus chimiques, précipiter et donner naissance à de nouveaux minéraux et à de nouveaux gisements. Ainsi se produisent non seulement la décomposition des minéraux à la surface sous l'influence des racines des végétaux (acide humique) avec production de phosphates, de pétroles, de charbons, ...

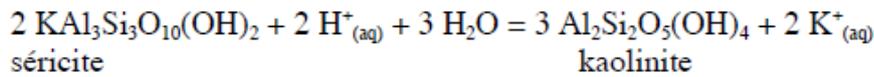
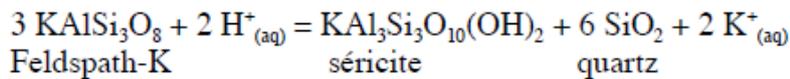
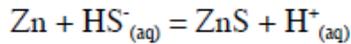
L'altération hydrothermale

Les altérations hydrothermales sont un métasomatisme chimique qui résulte d'un déséquilibre chimique entre la roche encaissante et le fluide hydrothermal. On observe deux types extrêmes:

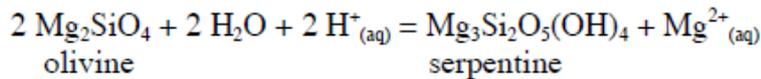
1) canalisé, d'extension locale et généralement discordante, généralement contrôlé par une porosité de fracture;

2) pervasif, souvent d'extension régionale, discordant ou concordant, résultat de la perméabilité de la roche encaissante.

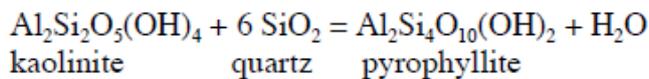
a) Réactions d'hydrolyse : impliquent l'ion H^+ , la neutralisation de fluides acides et le lessivage des alcalis



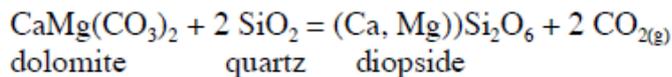
b) Réactions d'hydratation : extraction d'eau moléculaire à partir d'une phase fluide



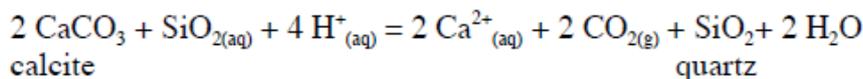
c) Réactions de déshydratation : libération d'eau moléculaire dans une phase fluide



d) Réactions de décarbonatation : volatilisation de CO₂ à partir d'un carbonate



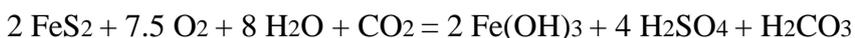
e) Réaction de silicification : ajout de SiO₂ sous forme de quartz ou ses polymorphes



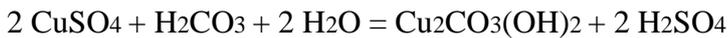
Gossans ou chapeau de fer

Les gossans ou chapeau de fer forment une croûte rougeâtre dominée par des oxydes ferrugineux résultat de la météorisation des sulfures. Ils se forment dans l'ancienne nappe phréatique par l'oxydation des sulfures. La percolation gravitationnelle des eaux météoriques oxydées et riches en métaux vers les sulfures primaires provoque la précipitation des métaux sous diverses formes, parce que l'environnement devient de plus en plus réducteur. Cela provoque une zone enrichie en métaux, appelé enrichissement supergène, et qui est souvent été minée car elle est enrichie en métaux, peu indurée et parce qu'elle affleure.

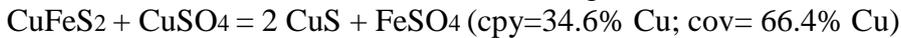
Oxydation des sulfures:



Ces réactions génèrent les acides 2H₂SO₄ + H₂CO₃. Le Fe est fixé sous forme d'hydroxyde alors que le Cu, le Zn, le Pb sont soluble sous forme de sulfates dans le milieu oxydant. Dans la zone oxydée, il peut y avoir précipitation de malachite et autres minéraux secondaires :



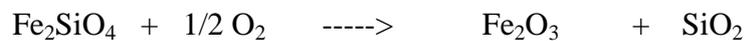
Les métaux en solutions percolent jusqu'à la nappe phréatique où un changement brusque de l'état d'oxydation provoque la précipitation des sulfures secondaires:



Dans le cas des formations de fer, l'hydroxyde de fer étant insoluble en milieu oxydant, il demeure sur place alors que la gangue de silicate ou de carbonate peut être dissoute ce qui produit une formation de fer résiduelle avec, par exemple, un enrichissement de 20-35 % Fe à 64-66% Fe dans le bassin Hamersley (Australie).

Les oxydations concernent surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique.

Exemple pour un minéral d'olivine : olivine + oxygène -----> oxyde ferrique + silice.



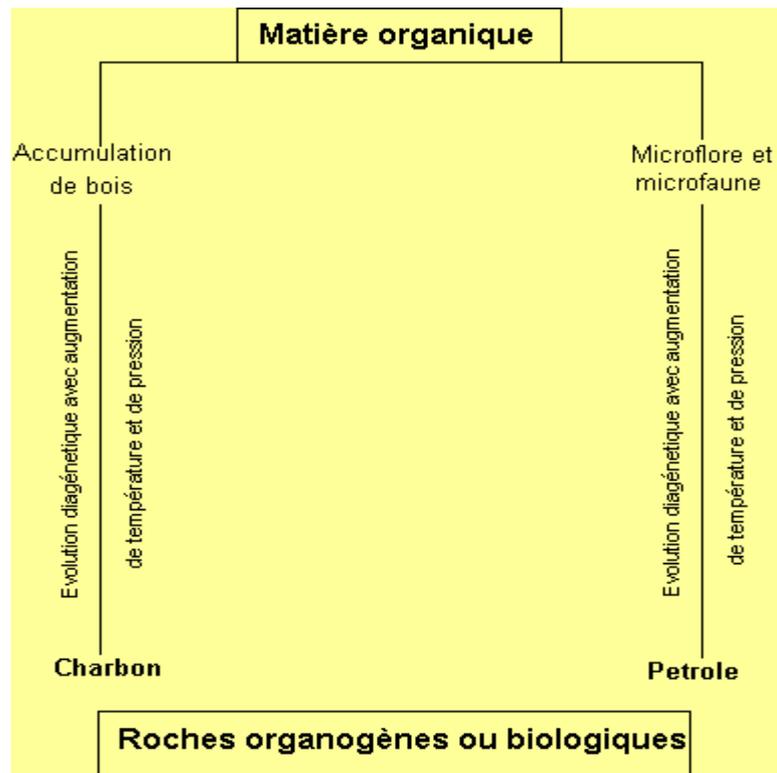
Altération hydrothermale liée à du métamorphisme de contact, bien développé surtout dans les carbonates. Caractérisée par le développement de minéraux calc-silicates tels diopside, hedenbergite, wollastonite, grenat (grossulaire, andradite), actinote.

Tourmalinisation, carbonatation, pyritisation, etc

Assemblage d'altération dominé par un minéral particulier.

Les roches organogènes ou biologiques : sont des roches issues de la transformation et l'évolution de la matière organique sous les effets de l'augmentation de la température et de la pression lors de l'enfouissement poussé des séries sédimentaires.

Les plantes accumulent des matériaux carbonés par photosynthèse et sont directement à l'origine du charbon. D'autres types de sédiments carbonés comme les schistes bitumineux, sont générés par des bactéries, le pétrole peut dériver soit de bactéries, de microflore et/ou de microfaune (voire schéma suivante).



1. 4- MÉTAMORPHIQUE

Les minéraux, après leur formation, se modifient sous l'influence de conditions internes ou externes. Ces modifications peuvent se produire par exemple dans les gisements sédimentaires par déshydratation des oxydes, carbonisation ou silicification de restes organiques. Ces transformations sont dites diagenétiques. Elles se produisent à la surface du sol, à la température normale.

Des modifications profondes ont lieu sous l'action de conditions physico-chimiques dans les profondeurs de la croûte. Ce sont surtout des roches sédimentaires qui subissent des modifications, sous l'action de la température et de la pression et également des réactions chimiques. Leurs aspects ainsi que leurs propriétés chimiques sont modifiés, on voit naître de nouvelles paragenèses de minéraux. Ce processus constitue le métamorphisme.

On distingue un métamorphisme de contact qui touche les roches en contact immédiat avec les roches éruptives. Le degré de modification donne de nouvelles espèces minérales.

Parmi les substances utiles les plus utilisés on cite le marbre et l'ardoise.

2- DURÉE DE FORMATION DES GISEMENTS

On observe des époques particulièrement favorables aux dépôts de certains minerais: la quasi-totalité des gisements de fer rubané est Protérozoïque tandis que la majeure partie des gisements pétroliers provient d'horizons d'âge Crétacé. De nombreux gisements d'or se sont mis en place vers 450 Ma (Ouest américain, URSS, Australie) et 320 Ma (Europe, Tien Shan).

C'est il y a 360 à 290 millions d'années, au carbonifère (qui veut dire « apporteur de charbon »), que les conditions ont été les plus favorables à la formation du charbon. Mais de moindres quantités ont continué à se former à certains endroits de la Terre, à toutes les époques qui ont suivi, notamment au permien (290-250 millions d'années) et pendant toute l'ère secondaire (ou mésozoïque, 250 à 65 millions d'années).

3- MODE DE DÉPÔT DES SUBSTANCES MINÉRALES

La formation d'une concentration nécessite une source, un transport et un dépôt (Routhier, 1963). Plusieurs conditions doivent être réunies: les éléments et le fluide qui les transporte doivent présenter une mobilité optimale, ce qui dépend notamment de la perméabilité. Il faut disposer de sources d'éléments et d'énergie adaptées. Le volume de fluide doit être suffisant; sa composition doit être adéquate pour permettre un transport; le site du dépôt doit agir comme un entonnoir (Péllissonnier, 1962); enfin, le dépôt doit être conservé durant suffisamment de temps. L'eau constituera l'agent de transport principal des éléments métalliques du fait de son abondance dans la partie superficielle de notre planète: les océans représentent 6% de la masse des continents et la lithosphère contient des minéraux hydratés jusqu'à plus de 40 km de profondeur. Cependant, certains éléments très peu solubles dans l'eau tel le chrome ou le nickel sont mieux concentrés dans des magmas silicatés et formeront alors des concentrations à caractère magmatique.

L'origine des éléments est tantôt familière (locale), tantôt étrangère (Routhier, 1967). Une minéralisation est syngénétique si elle se met en place en même temps que son encaissant; elle est épigénétique si elle est lui est postérieure. La situation peut être plus ambiguë si la minéralisation est formée au cours de la diagenèse, ou qu'il n'y a pas un âge, mais des âges... Sur le site de dépôt, quatre notions géographiques peuvent être distinguées: exogène c'est-à-dire déposé à la surface de la lithosphère, endogène déposé au sein de la lithosphère, supergène déposé dans la zone d'altération météoritique et enfin hypogène déposé sous la zone d'altération météoritique.

4- MÉTHODE D'ÉTUDE DES GISEMENTS MINÉRAUX

L'étude des gîtes minéraux fait appel à l'ensemble des disciplines des Sciences de la Terre, aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Sur le terrain, les principales questions posées sont la nature et la géométrie des minéralisations, leurs relations spatiales avec l'encaissant, l'établissement de chronologie dans une histoire géologique orientée sur la reconstitution des paysages. Il n'y a donc pas de méthodes spécifiques, mais un effort vers la mise en œuvre des méthodes géologiques les plus adaptées. On retiendra toutefois que la cartographie à une échelle détaillée (1/1000 à 1/10 000) constitue presque toujours une étape essentielle.

En laboratoire, les méthodes utilisées devront répondre à des besoins de description détaillée des objets géologiques et miniers et à une compréhension de la genèse des concentrations. La partie descriptive s'appuiera en particulier sur une minéralogie détaillée des sulfures (minéragraphie) afin d'établir la position des substances économiques et l'évolution des paragenèses minérales. La nature des altérations peut être reconnue par des bilans de masse, basés sur des analyses (majeurs, traces, densité), par les assemblages minéralogiques (Corbett et Leach, 1995), et par des études

détaillées des minéraux (Meunier et al., 1988). Les relations chronologiques entre minéralisations, altérations et encaissements constitueront également un élément fondamental à éclaircir, en utilisant par exemple les textures de dépôt.

La reconstitution de la genèse des minéralisations portera sur les conditions de dépôt, de transport et la nature de la source des éléments. On devra d'abord déterminer l'âge de la minéralisation, par rapport à l'encaissement et à l'évolution géologique, puis d'une manière absolue (chronomètres isotopiques). Les conditions de transport et de dépôt pourront être approchées par l'étude des inclusions fluides, les équilibres minéralogiques des minéralisations et des altérations, la géothermométrie isotopique et l'analyse microtectonique. La recherche des sources reste une entreprise difficile, faisant appel à la géochimie des éléments en trace, la pétrologie et la géochimie isotopique. L'élaboration d'une synthèse pourra s'effectuer au sein d'un modèle descriptif (Cox et Singer, 1986) ou d'un modèle génétique à caractère systémique exprimant les processus génétiques. La mise au point de guides de prospection et la découverte constituent in fine les éléments décisifs qui permettent de valider les résultats de la recherche.

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.
- 6- G. Beaudoin, géo., PhD : Manuel de gîtologie et métallogénie, Univ Laval, Canada, 2007.