

Département de Géoressources

Licence de Géosciences Appliquées

COURS DE GITOLOGIE

Pr: BEN AISSI Lakhelifa

AU: 2019 -2020

CHAPITRE I

I. Généralité et Définition

1. Généralité

Dans la société, on connaît seulement cinq sources de richesses nouvelles, des sources qui créent une richesse quelconque. Ce sont:

- la procréation
- la chasse et la pêche
- les forêts
- l'agriculture et l'élevage
- l'exploitation des mines.

Toutes les autres activités ne font que transformer des choses mais elles ne créent rien de nouveau.

Dès le début des civilisations, des métiers de base ont fait leur apparition. Nous pouvons dire qu'historiquement, l'homme a d'abord été chasseur et agriculteur (pour la nourriture) et mineur (pour se procurer des outils). On peut affirmer que l'exploitation des mines remonte aux temps les plus anciens et représente l'un des plus vieux métiers du monde.

Au cours des âges, les produits de l'exploitation des mines ont eu suffisamment d'impacts et continuent d'en avoir pour modeler les civilisations et affecter les modes de vie de nations entières. Par exemple:

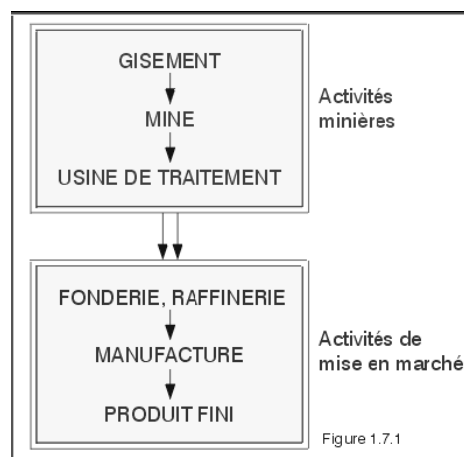
- les âges au cours des temps;
- l'âge de pierre (exploitation du silex)
- l'âge du bronze (alliage de métaux)
- l'âge du fer (techniques de trempes)

L'exploitation des mines est un des secteurs importants de l'économie mondial et marocain (phosphate) parce que le pays est avant tout un producteur de matières premières.

Pour répondre à une demande grandissante et par suite de l'épuisement des gisements au cours des temps, l'exploitation des mines a dû progresser sur le plan technologique de manière à augmenter sa productivité. De ce fait, la métallurgie, qui fut durant longtemps un art, a évolué progressivement vers la science qu'elle est devenue aujourd'hui primordiale pour le développement des pays.

L'activité minière consiste essentiellement à:

- rechercher des concentrations particulières de minerai dans la croûte terrestre;
- extraire le minerai de la croûte terrestre;
- libérer le minerai tout-venant de la plus grande partie possible des matières inutiles (la gangue) qu'il contient, produisant un concentré dont la pureté varie beaucoup d'une substance à l'autre.



On peut représenter ces étapes par le schéma ci-contre:

2. Définition

- **La gîtologie** c'est une science à la fois naturaliste (descriptive) et statistique. Elle est basée sur une approche descriptive des gîtes minéraux et leur contexte géologique.

- **La métallogénie** : Au fur à mesure du développement de la gîtologie, elle a fait appelle à d'autres sciences (sédimentologie, volcanologie, minéralogie, hydrogéologie, structurale, pétrologie, géochimie, géophysique, mécanique de roches,... ect) aptes à l'exploration des autres gisements. De ce fait, la métallogénie est une science de synthèse à la fois fondamentale et appliquée qui cherche l'application des concentrations anormales en un métal ou une substance minérale donnée et par conséquence fournit à l'explorateur minier des guides de prospection.

- **Indice minéral** : il s'agit d'une indication de la présence d'une concentration minérale sans qu'elle représente obligatoirement une valeur économique.

- **Gîte minéral** : concentration naturelle d'un ou plusieurs minéraux valorisables dans laquelle un (des) élément(s) chimique(s) se trouve(nt) en teneur très supérieures au Clarke. Définition est uniquement liée au facteur de concentration par rapport au tableau d'abondance relative des éléments sur Terre (Clarke).

Tableau: Concentrations métalliques et facteurs de concentration

élément	teneur moyenne dans la croûte Continentale (clarck)	teneur d'exploitation	facteur de concentration	taille des gisements géants (Mt)
Al	8.1%	30%	4	
Cu	0.005	0.5-2	100-400	
Ag	0.1 ppm	150 -300 g/t	1500-3000	
Fe	7,40%	60%	8	
Ti	0,54%	35%	65	
Ni	0,01%	3%	270	>5,8
Zn	0.007 %	4%	600	
Pb	16 ppm	10%	1 250	>1.6
Sn	2,5 ppm	1%	4 000	>0,25
Au	0,3 ppb (0.003ppm)	10 g/t (=10ppm)	30 000	>0,00034

- **Gisement minéral:** gisement du minerai est une accumulation de matière minérale dans l'écorce terrestre, formée sous l'influence de divers processus géologiques, qui peut être exploitée, au point de vue quantité (tonnage) et qualité (teneur), dans des buts industriels. Les corps géologiques qui méritent l'appellation de gisement montrent des concentrations beaucoup plus élevées que leur clark.

Un gîte minéral devient un gisement lorsqu'il est exploitable économiquement.

- **Minerai :** Roche, naturelle ou résidu de l'activité humaine, contenant 1 ou plusieurs minéraux, dont certains contiennent 1 ou plusieurs éléments chimiques, et dont les conditions économiques et technologiques du moment permettent leur exploitation avec profit.

- **Minerai métallique :** tout minéral ou association minérale pouvant être exploitée de façon rentable pour obtenir un ou plusieurs métaux.

- **Tout venant :** matériaux qui sortent de la mine (galerie ou open-pit), abattage très peu sélectif (on prend le tout, on trie ensuite), contenant le minerai et la roche encaissante (la gangue et/ou le stérile).

- **Stérile :** tout ce qui est rejeté après chaque étape de traitement.

- **Gangue :** minéraux associés au minéral utile.

- **Paragenèse :** association de minéraux ayant une origine commune, elle révèle les conditions de genèse puisqu'elle dépend des processus géologiques:

- succession minérale : ordre de dépôt des minéraux dans une paragenèse.

- séquence paragénetique : ordre de dépôt des différentes paragenèses dans un gisement.

Très souvent, les espèces minérales ne se présentent pas à l'état isolé (état natif) et s'associent les unes avec les autres (paragenèse). On trouve, par exemple, fréquemment ensemble :

- Au, Fe, S, As (gisements aurifères arsenicaux) ;
- Zn, Pb, Ag, quelquefois Cu, Au, Cd, In, Ge (gisements polymétalliques) ;
- Ag, Co, Ni, Bi, U quelquefois Cu, Fe, As (gisement d'uranium de la formation à cinq éléments) ;
- Au, Ag, Te, Se (gisements des tellures d'or et d'argent) ;
- Hg, Sb, S, F, quelquefois As (gisements d'antimoine et de mercure, avec du spath fluor).

- **Métallotecte :** Ensemble des processus ou facteurs géologiques (liés à la tectonique, au magmatisme, au métamorphisme, à la géochimie, à la sédimentation, et/ou à la lithologie... ect) qui favorisent ou qui conduisent à la formation d'un gisement ou d'une concentration minérale.

- **Réserve :** masse minérale connue pouvant être exploitée dans un avenir à déterminer. Cette définition implique la connaissance du volume ou cubage du gisement ainsi que de sa

teneur moyenne. plusieurs classifications des réserves existent, nous donnons ci-dessous la classification la plus utilisée:

Réserve certaine : c'est la quantité de minerai dont la localisation, les caractéristiques dimensionnelles, minéralogique et géochimiques sont précisées grâce aux travaux d'exploration.

Réserve probable : c'est le volume de minerai dont la reconnaissance n'est achevée, dont les travaux d'exploration réalisés permettent d'effectuer une estimation approximative de réserves sans que ces calculs ne soient pas certains.

Réserve géologique : ce sont des réserves supposées existantes en se basant sur des données géologiques acquises au cours de la calcul des réserves certaines.

- **Teneur** : pourcentage d'un métal contenu dans un minerai, gisement, gîte.... Elle est représentative pour être fiable.

- **Teneur moyenne (tm)** : calculée à l'échelle d'un gisement, ex gisement à 33% de Fe, 700g/t Ag.

- **Teneur limite d'exploitabilité (tle)** : teneur en dessous de laquelle l'exploitation n'est plus rentable.

- **Teneur représentative (Cutoff)** : teneur limite d'extraction qui tient en compte des parties pauvres qui peuvent être compensées par des parties riches

- **Teneur limite de coupure (tlc ou tc)** : teneur quelconque, afin de démarquer deux lignes de conduites: soit exploiter ou laisser en place un gisement – tient compte de la TLE et du cutoff.

- **Tonnage (T)** : -Unité de mesure servant à calculer la quantité de minerai contenu dans le sol ou le taux auquel le minerai est extrait.

$$\text{Quantité de métal (Q)} = \text{Tonnage} * \text{la teneur moyenne}$$

3. Morphologie des corps de minerais

La forme des gisements, leurs dimensions, dépendent fortement de leur origine. Elles influent aussi très nettement sur les méthodes d'exploitation du minerai. Les colonnes minéralisées ont naturellement 3 dimensions dans l'espace. Suivant les rapports de ces 3 dimensions, on peut distinguer trois types de formes :

- **corps isométriques** dont les 3 dimensions sont à peu près égales (amas et nids, poches et boules, lentilles) ;
- **corps ayant la forme de colonnes**, dont l'une des dimensions est beaucoup plus grande que les deux autres (longueur dépasse largeur et puissance). Ils se rencontrent assez rarement et se sont toujours formés après les roches encaissantes ;

• **corps ayant la forme de dalles**, dont deux dimensions sont grandes (longueur et largeur) et la troisième (puissance) est petite. Les filons, les couches et les lames en font partis.

Filons (veines) (Fig. 1 & 2)

On parle de filon, lorsque la masse minérale remplit une fente de roche. Il est encaissé dans des roches formées antérieurement au phénomène de remplissage de la fente, de la fissure et de la cavité par la matière minéralisée.

Couches (Fig. 3)

Une couche est un corps minéralisé en forme de dalle, d'origine sédimentaire, qui est séparé des autres roches par les surfaces planes de stratification, les épontes. Les couches sont des formations qui se sont constituées en même temps que les roches qui les contiennent, ce qui les différencie des filons.

Amas (stock) (Fig. 5) : le corps minéralisé est plus ou moins isométrique homogène ou presque homogène. Il s'agit des imprégnations des roches magmatiques, métamorphiques et la substitution des roches sédimentaires.

Stockwerk (Fig. 4) :

On parle de stockwerk, lorsque la masse rocheuse est anastomosée par des fines veines chargées par de dissémination de substance minérale. Il s'agit généralement de la zone d'alimentation située à la périphérie des amas (stocks).

Disséminé (Porphyry copper) (Fig. 5): Il s'agit d'une substance minérale disséminée dans la roche encaissante sous forme de petits grains (mouches);

4. Aires de distribution des corps minéralisés

Dans l'espace, la répartition des corps minéralisés est également très inégale. On distingue des unités métallifères à des échelles différentes (**Fig. 7**).

- **Une aire ou province métallifère**, est une vaste zone (au-delà de 100 km²) à concentration élevée en gîtes: elle peut prendre la forme d'une ceinture.
- **Un district**, regroupe plusieurs champs; ses dimensions varient de 10 à 100 km².
- **Un champ**, correspond à l'assemblage de plusieurs corps; les dimensions varient de 1 à 10 km².
- **Un corps minéralisé**, correspond à une continuité des travaux miniers; sa plus grande dimension est généralement inférieure au kilomètre.

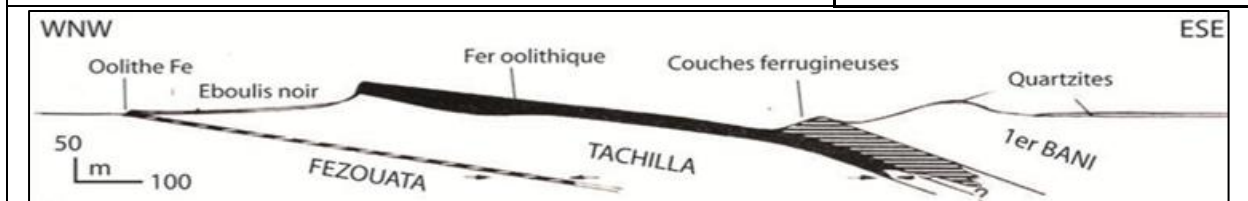
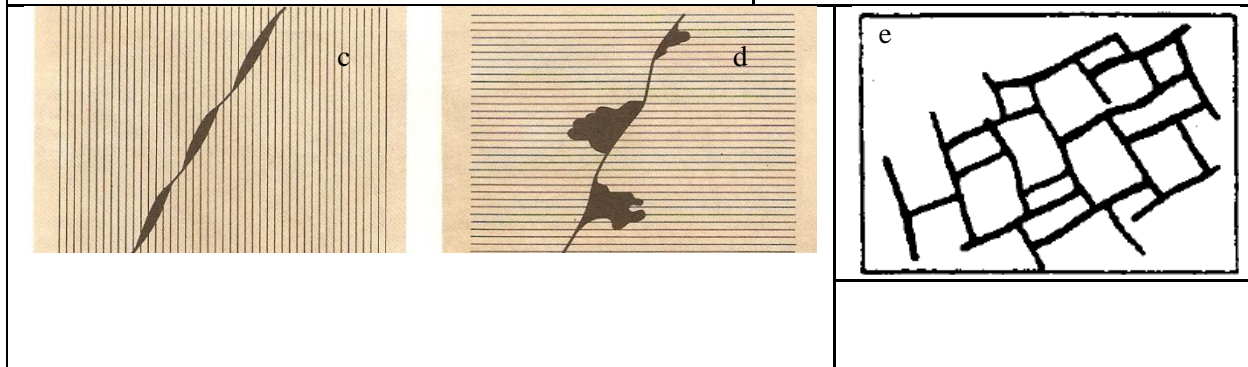
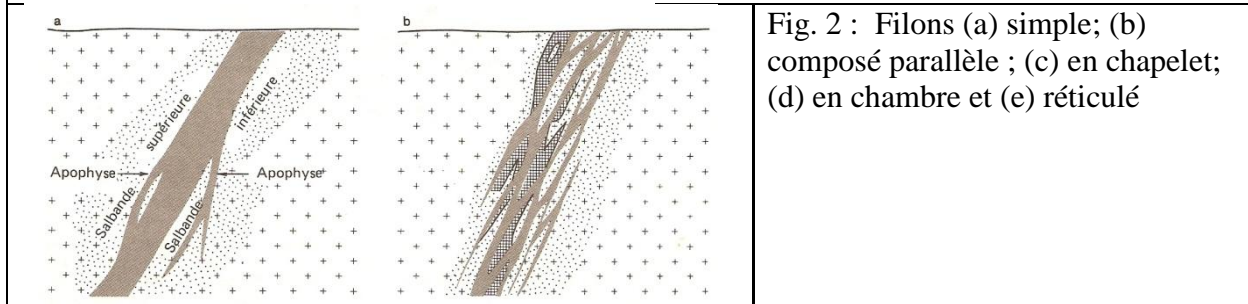
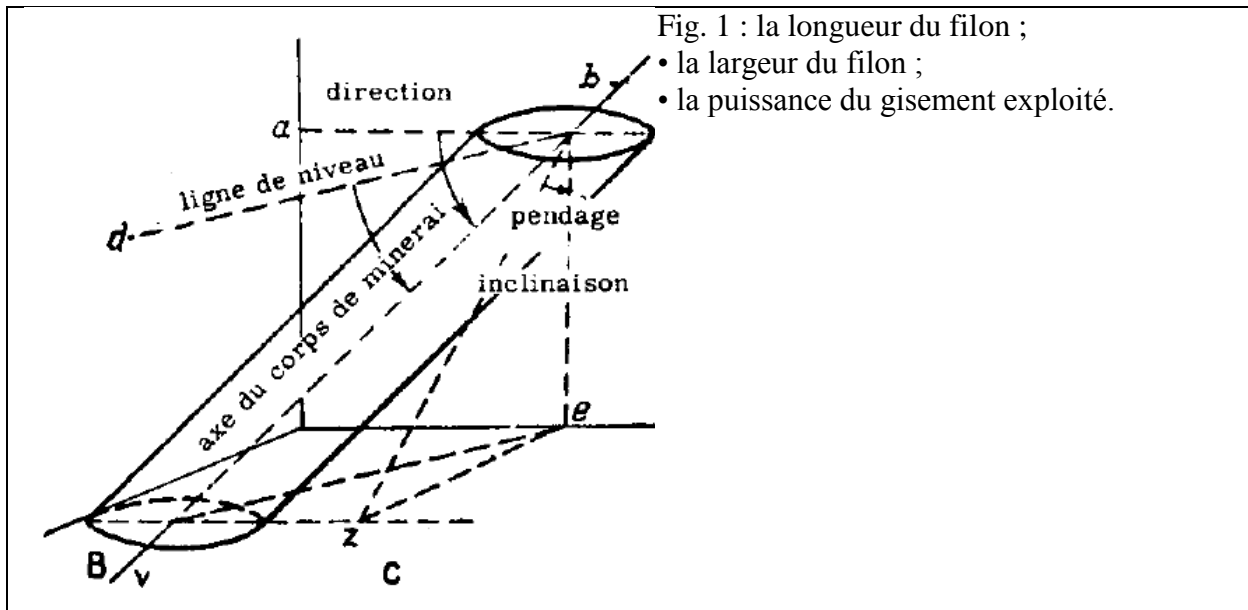


Fig. 3. Couche de fer oolithique du gisement d'Imi n'Tourza, Alnif.

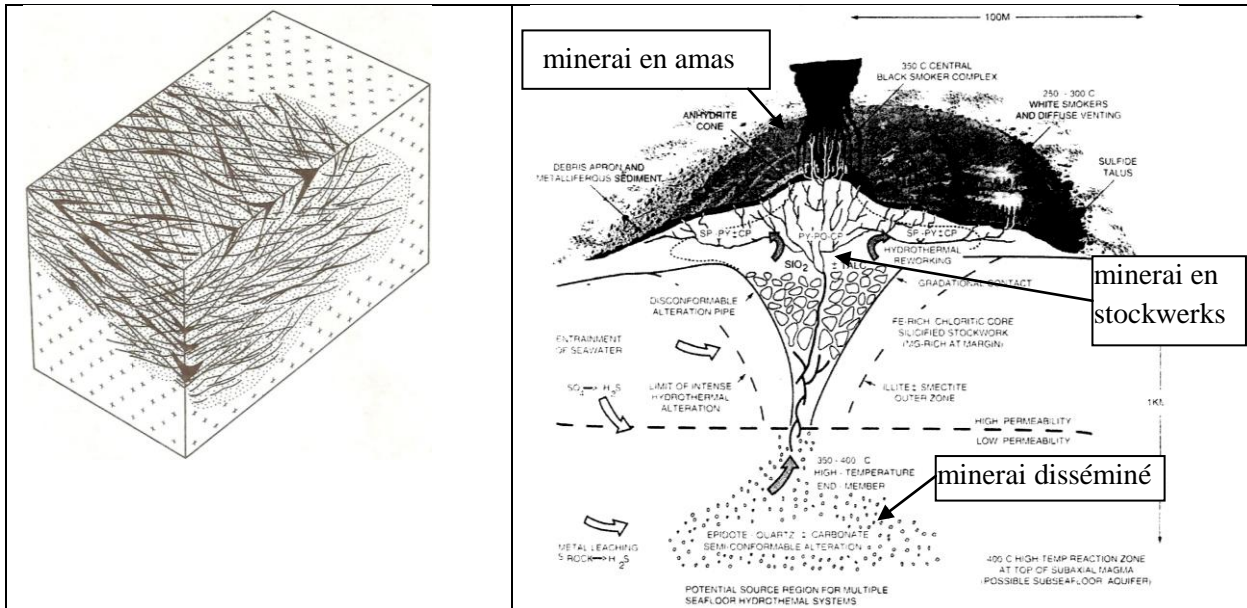


Fig. 4: Stockwerk

Fig. 5: amas (stock) de mineral polymétalliques avec une zone d'alimentation du mineral en stockwerk et disséminé.

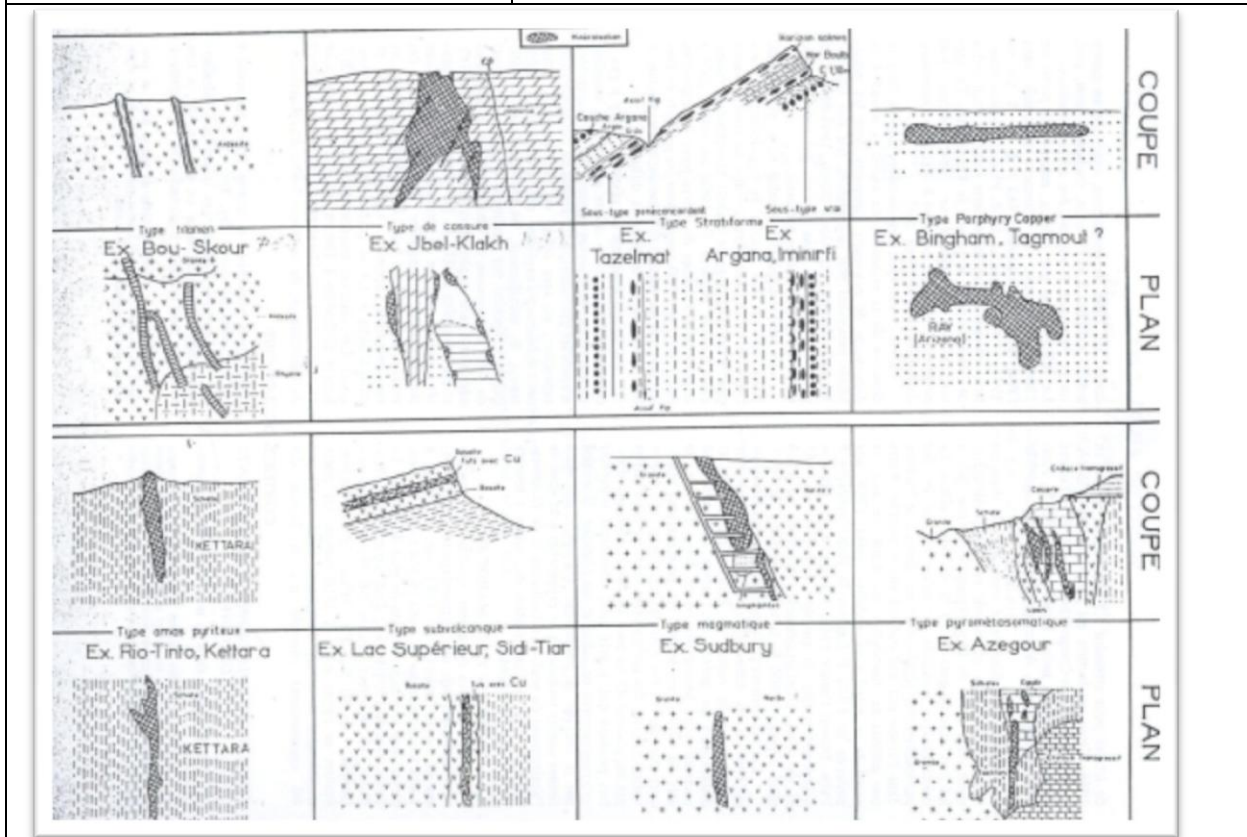


Fig. 6: Types morphologique des gisements de cuivre au Maroc

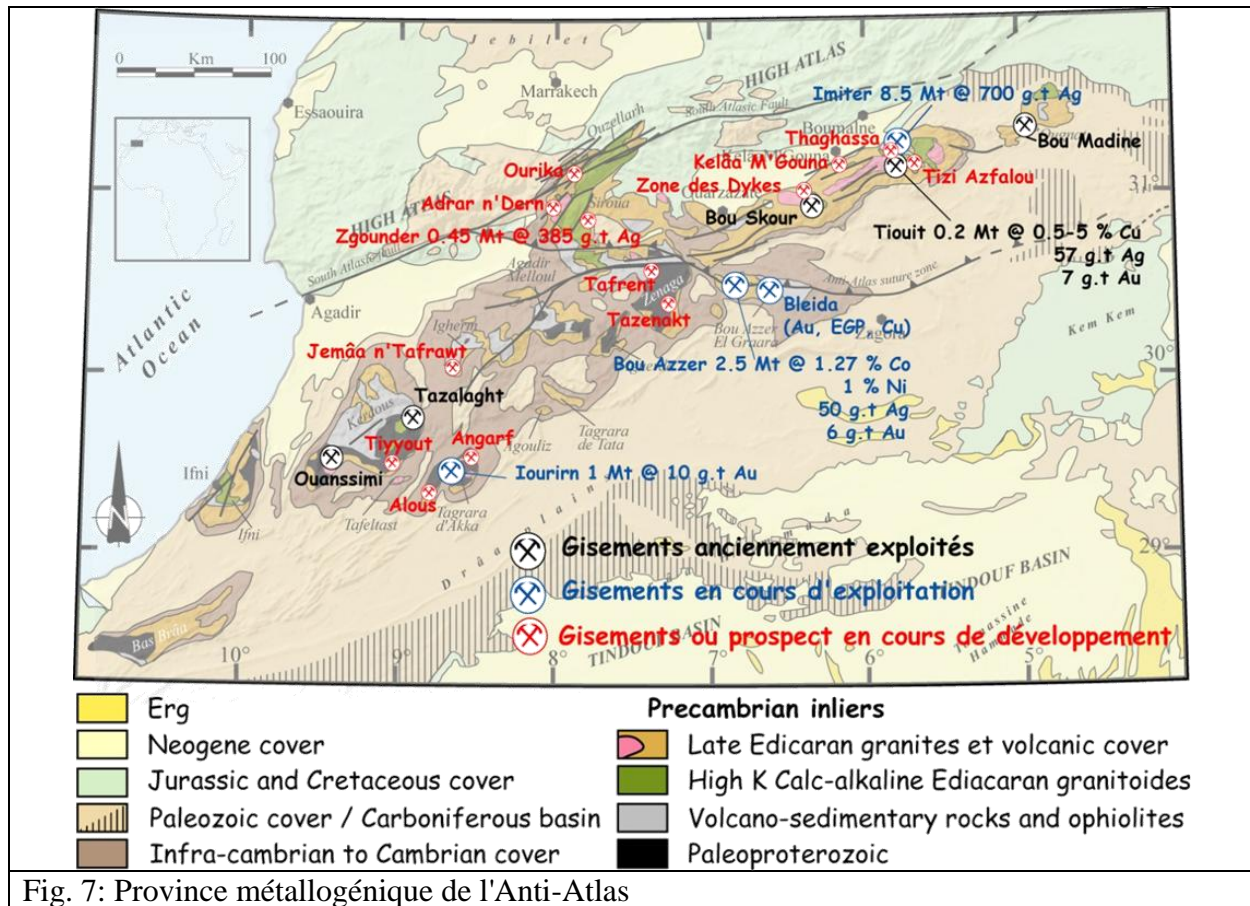


Fig. 7: Province métallogénique de l'Anti-Atlas

CHAPITRE II

La genèse des gisements métallifères

Source, Transport et Dépôt

Introduction

La formation d'une concentration minière 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; un site de dépôt doit renfermer les éléments; 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 terre et la lithosphère contient des minéraux hydratés jusqu'à 40 km de profondeur. Cependant, certains éléments très peu solubles dans l'eau tels le chrome ou le nickel sont mieux concentrés dans des magmas silicatés et formeront alors des concentrations à caractères magmatique.

Trois facteurs sont ainsi importants dans la connaissance d'un gisement : la source des éléments métalliques, le transport de ces éléments ou la migration des fluides minéralisateurs et enfin le mode de dépôt des minéralisations.

I. La source

C'est le paramètre le plus délicat à définir dans un gisement métallifère puisque les éléments métalliques peuvent avoir des sources diverses.

Pour les gisements orthomagmatiques liés aux roches ignées (**Figure. 1**), les éléments métalliques arrivent avec les bains magmatiques des profondeurs de la terre et peuvent avoir une source sous l'écorce terrestre, on parle dans ce cas d'origine juvénile des éléments.

Dans les gisements tardi- à post - magmatiques (**Figure. 2**) tels que les pegmatites, pneumatolytes et hydrothermalites, les sources de substances peuvent être très variées:

- juvéniles magmatique apportées par la fusion ou dégazage depuis les parties les plus profondes de la croûte ou le manteau supérieur de la terre;

- digérées par la fusion des roches environnantes suite à la formation des magmas d'anatexie;

- empruntées par lessivage en cours de migration par les fluides minéralisateurs liquides ou gazeux.

Dans les gisements d'origine sédimentaire ou métamorphique, les substances minérales peuvent être autochtones ou allochtones. Les gisements métamorphosés se forment à partir d'une source locale (Figure. 4), les gisements métamorphogènes sont due à la mobilisation et au redépôt à une certaine distance de substances issues de roches soumises à la transformation

métamorphique. Pour les gisements sédimentaires, la source autochtone correspond aux concentrations résiduelles, alors que l'apport de substances sous forme mécanique ou de suspensions ou de solutions évacuées à partir de roches plus anciennes est à la base des gisements dus à l'accumulation mécanique ou à la précipitation chimique (**Figure. 5**).

II. Le transport

Le transport peut également être multiple puisqu'il peut se faire en phase solide, ou en phase liquide (en solution ou en suspension) ou gazeuse.

Afin de comprendre la localisation des gisements métallifères, il est nécessaire de comprendre la nature des milieux de transport. Comme les minéralisations sont directement **liées à des magmas**, ou **associées à des phénomènes métamorphiques**, à **des eaux souterraines** ou à **des processus sédimentaires**, elles sont intimement associées aux mouvements des fluides. Ces fluides minéralisateurs peuvent être subdivisés en quatre catégories :

- les magmas et les fluides magmatiques;
- les eaux météoriques;
- les eaux connées (eaux fossiles);
- les fluides métamorphiques.

Ces différents fluides peuvent être chauds ou froids et être rencontrés en profondeur ou près de la surface. Toute fois s'ils ont été chauffés et à l'état liquide, chaque type peut être considéré comme une **solution hydrothermale** parce que ce terme concerne tout fluide chaud et aqueux quelle que soit son origine. Si le fluide est **sous forme gazeuse**, il est appelé pneumatolytique.

III. Migration des fluides minéralisateurs

En milieu perméable et de basse pression, le transport des éléments métalliques se fait par sécrétion latérale à la faveur de phénomènes de diffusion à travers une solution : le solvant est stationnaire et les transferts de matière se font du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré.

En milieu de très haute pression, le transport des éléments métalliques peut se faire par des phénomènes de diffusion à l'état solide (diffusions des éléments métalliques à travers les minéraux sous l'effet de phénomènes de haut température et haute pression).

Les fluides minéralisateurs peuvent circuler le long des joints de grains qu'ils peuvent corroder ou altérer permettant aux solutions de circuler plus facilement (**Figure. 3**). Les fluides sous pression peuvent aussi créer des systèmes de fractures et de microfractures leur permettant de circuler plus librement vers des zones les plus basses pression.

les circuits convectifs représentent d'importantes circulations de fluides autour d'une intrusion magmatique ou autour d'une zone volcanique (**Figure. 1 et 2**). les fluides entrent en

mouvement grâce à la source de chaleur assurée par l'intrusion ou le volcan ou une chambre magmatique sous-jacente, et à la présence de conduits pour ces circulations (fractures).

Les travaux de Kesler, 2005 ont montré qu'on peut reconnaître les différents types de fluides sur la base de leur compositions chimiques assez distincts (voir aussi Tableau. 1) :

- le fluide météorique à sulfates alcalins et sels bicarbonatés. Son pH est neutre, avec un faible contenu en soufre. L'eau météorique peut être chauffé jusqu'à 350°C dans des systèmes volcanique;

- le fluide marin-océanique, riche en chlore, avec des sels de type halite (NaCl), carnalite ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et/ou anhydrite (CaSO_4). Ces eaux peuvent être chauffées jusqu'à 400°C dans les systèmes hydrothermaux des fumeurs noirs;

- le fluide fossile (conné) à chlorure de calcium et sylvite (KCl), parfois à halite et hydrocarbures. Il s'agit des saumures de bassins présentes dans presque tous les bassins.

- le fluide métamorphique, issu de la déshydratation des roches. Le fluide est alors riche en bore et CO_2 , avec iode, ammoniacque, hydrocarbures, et, habituellement, plus pauvre en chlore; il est souvent confiné à la zone ductile cassante.

- le fluide magmatique juvénile, reconnu dans de nombreux types de gisements, montrant souvent une concentration en chlore;

- le fluide mantellique, avec CO_2 , H_2O et hélium.

NB: la distribution de ces différents fluides peut être très complexes: ainsi, le volcan Mauna Loa à Hawaii montre des alternances d'eaux douces, saumâtres, puis douces, en nappes épaisse de 100 m, avec de l'eau de mer en profondeur.

IV. Le dépôt

Le dépôt de minéralisations eut être dû à des processus magmatiques, métamorphiques, hydrothermaux, sédimentaires, ou d'altération (Figure. 6&7).

Certains dépôts de minéralisations se font par gravité : un cristal de chromite précoce peut se déposer dans un magma (processus magmatique) ou un grain d'or peut se déposer à la base d'une couche dans un sédiment agité (processus sédimentaire).

D'autres minéralisations peuvent se déposer à la suite de changement chimiques comme:

- un changement de pH (qui résulte de réactions entre les fluides minéralisateurs et les roches encaissantes);

- un changement des conditions d'oxydo-réductions ;

- un changement de la composition de fluide transporteur de métaux;

- une chute de la température, de pression ou de la vitesse du milieu transporteur, ou le mélange avec un autre fluide;

L'endroit du dépôt peut dépendre de la perméabilité, de la structure, de la fracturation, de la rhéologie et de la chimie de la roche encaissantes.

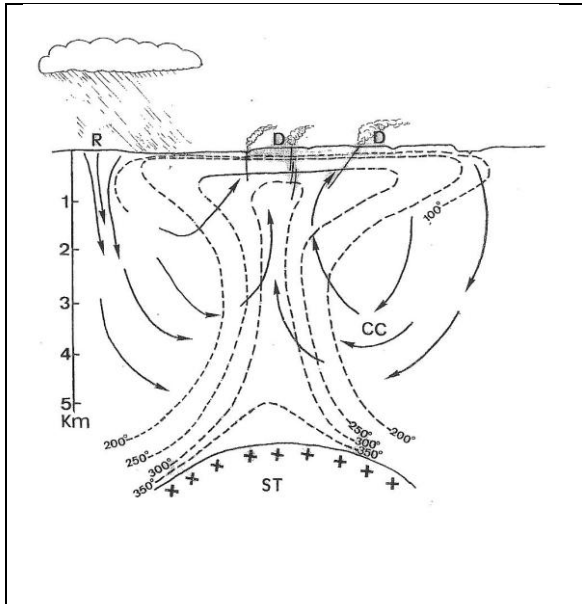


Fig. 1: schéma de la distribution de la circulation fluide convective et des isothermes dans un système hydrothermal en contexte continental: (R = recharge (Pluies) ; CC = circulation convective; D = décharge (sources chaudes); ST : source thermique. En tirets, isothermes; flèches = directions de flux.

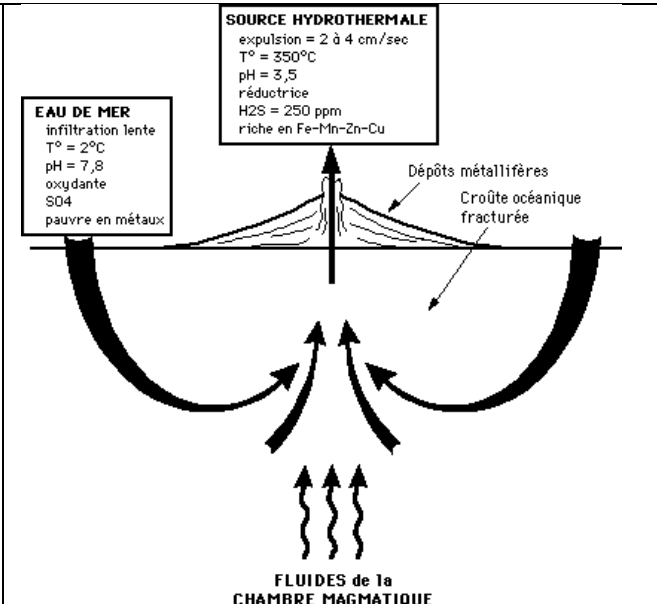


Fig. 2: schéma de la distribution de la circulation fluide convective dans un système hydrothermal en contexte océanique (ride médio-océanique).

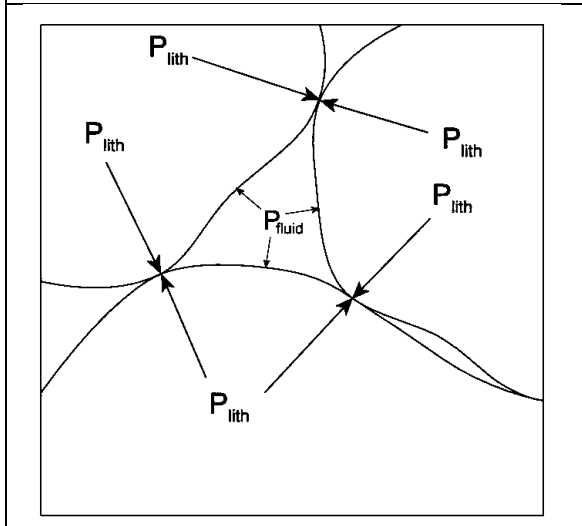


Fig. 3: Pression lithostatique > P fluide A 10 km prof (ou T° 300°C) dissolution des minéraux au niveau des bords et précipitent dans l'espace vide occupé par le fluide, = augmentation de la pression à l'intérieur de la roche.

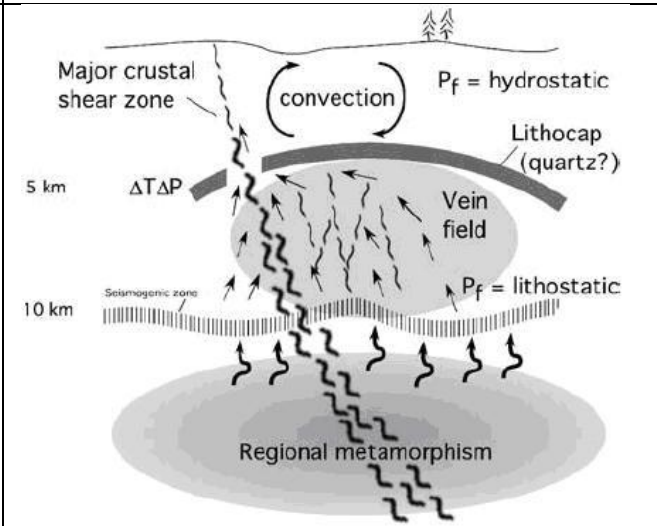


Fig. 4: Modèle conceptuel démontrant la circulation des fluides générés par le métamorphisme régional (Beaudoin et al., 2005)

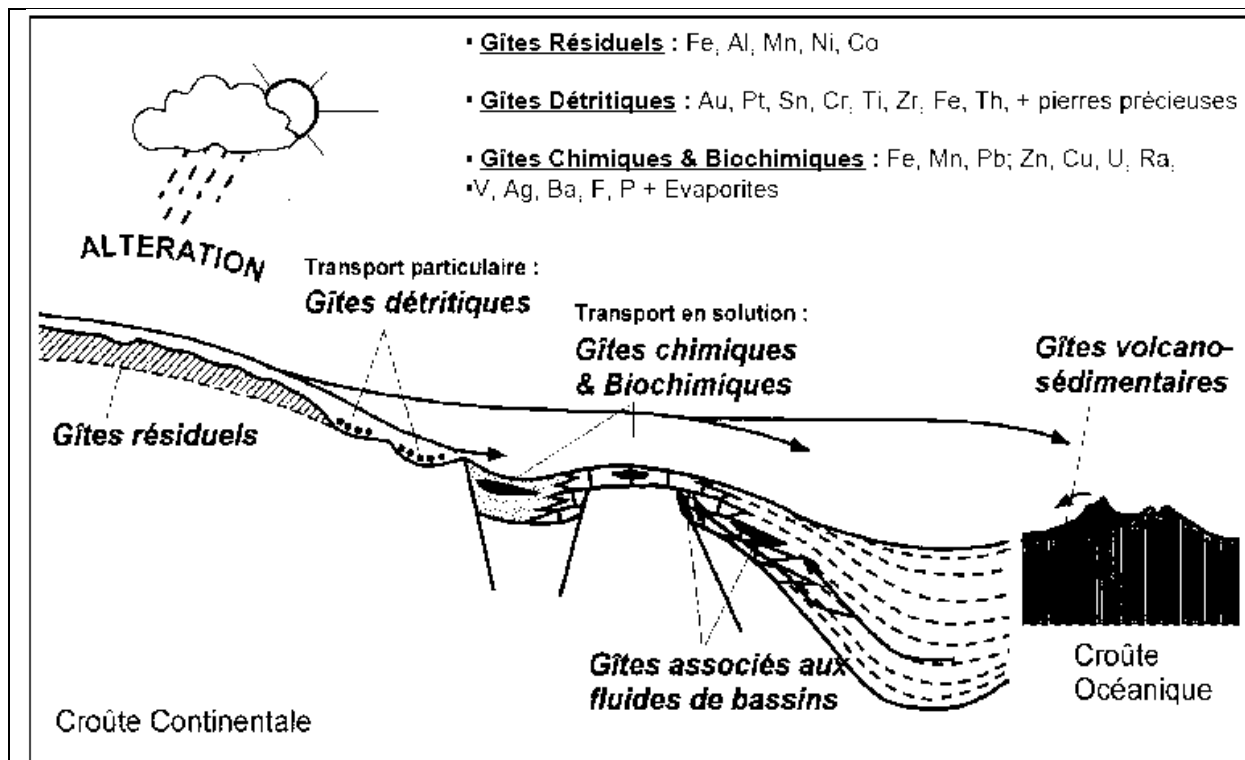


Fig. 5: Les processus sédimentaires de dépôts de minéralisations.

Tableau.1 : Origine et caractéristiques des fluides hydrothermaux minéralisateurs

Types de fluides	Origine	Salinité
Fluides hydrothermaux-magmatiques	("eaux juvéniles")	salinité modérée à très élevée
Fluides métamorphiques	Déshydratation minérale	salinité basse
Fluides météoriques peu évolués	par migration superficielle	salinité basse
Saumures de bassins "basinal brines"	Fluides météoriques (et marins) fortement évolués pendant leur migration profonde	salinité modérée
Eaux fossile ("connate waters")	piégées dans les pores des sédiments marins	salinité modérée à haute
Eaux marines	Eaux météoriques	salinité Modérée
Eaux météoriques	précipitation de surface: pluie ou neige	basse salinité

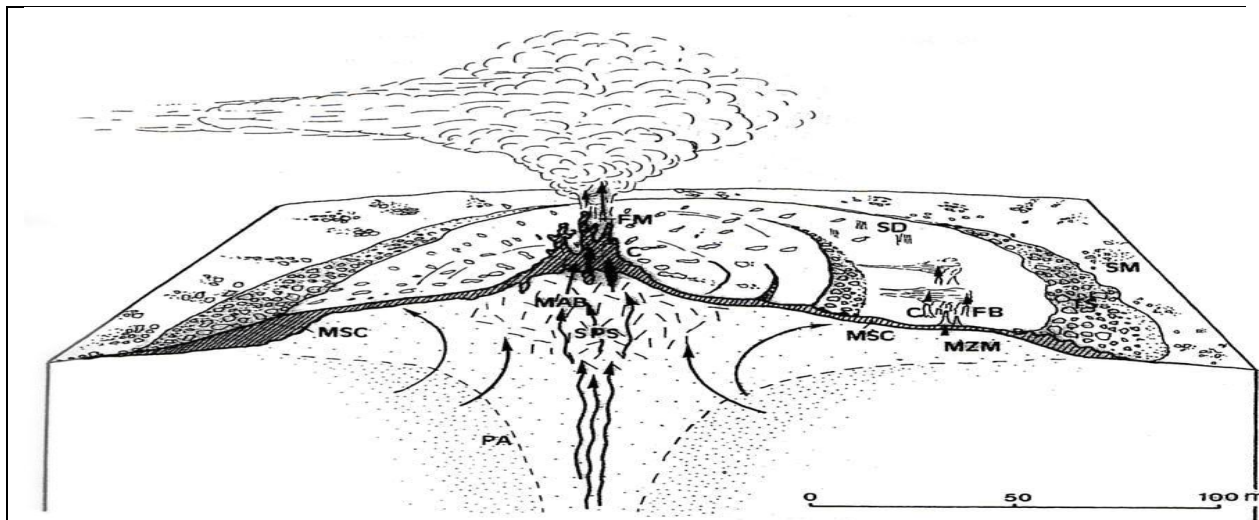


Fig. 6: Texture des dépôts minéralisés liés à un corps magmatique au niveau de la ride médio-océanique : FM = fumeur noir ; FB = fumeur blanc ; SD = suintement diffus ; C = cheminée ; TS = talus sulfuré ; SM = sédiments métallifères ; MSC = minéral sulfuré compact ; MAR = minéral à anhydrite bréchique ; MZM = minéral zincifère marginal ; SPS = stockwerk pyriteux silicifié ; PA = pipe d'altération chloriteuse.

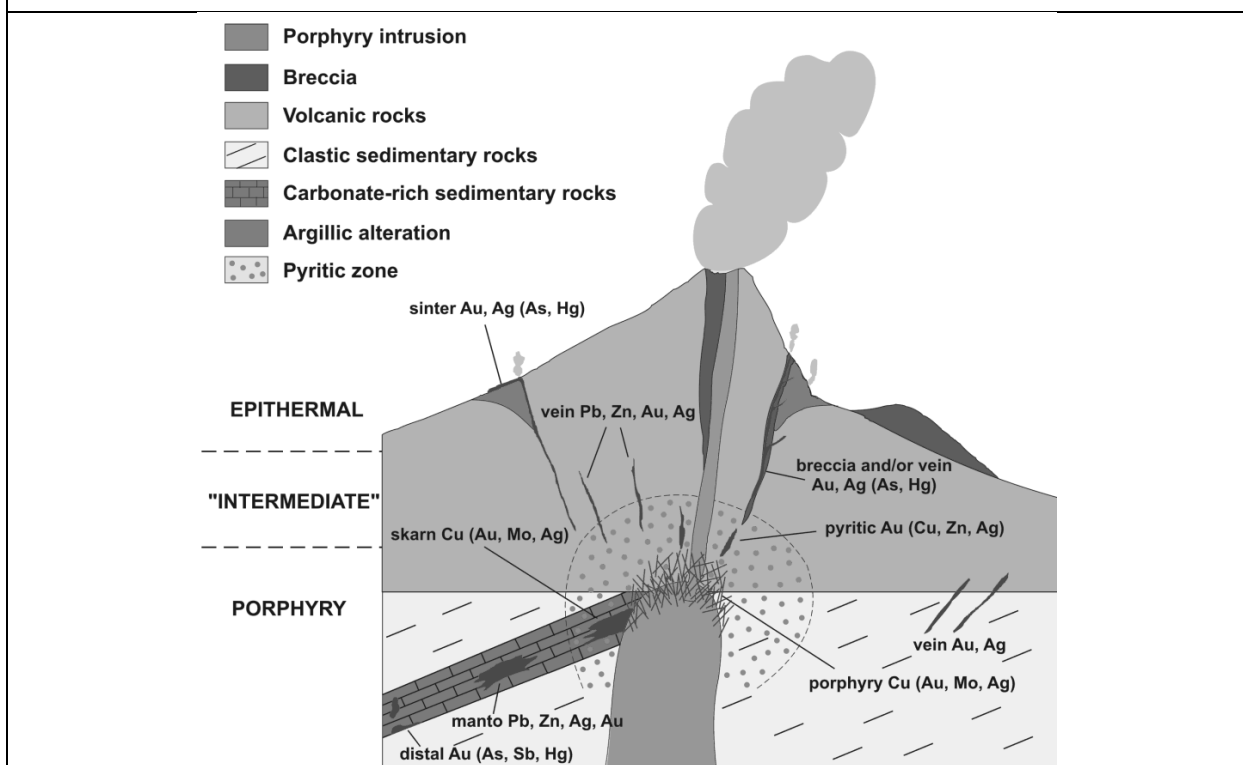


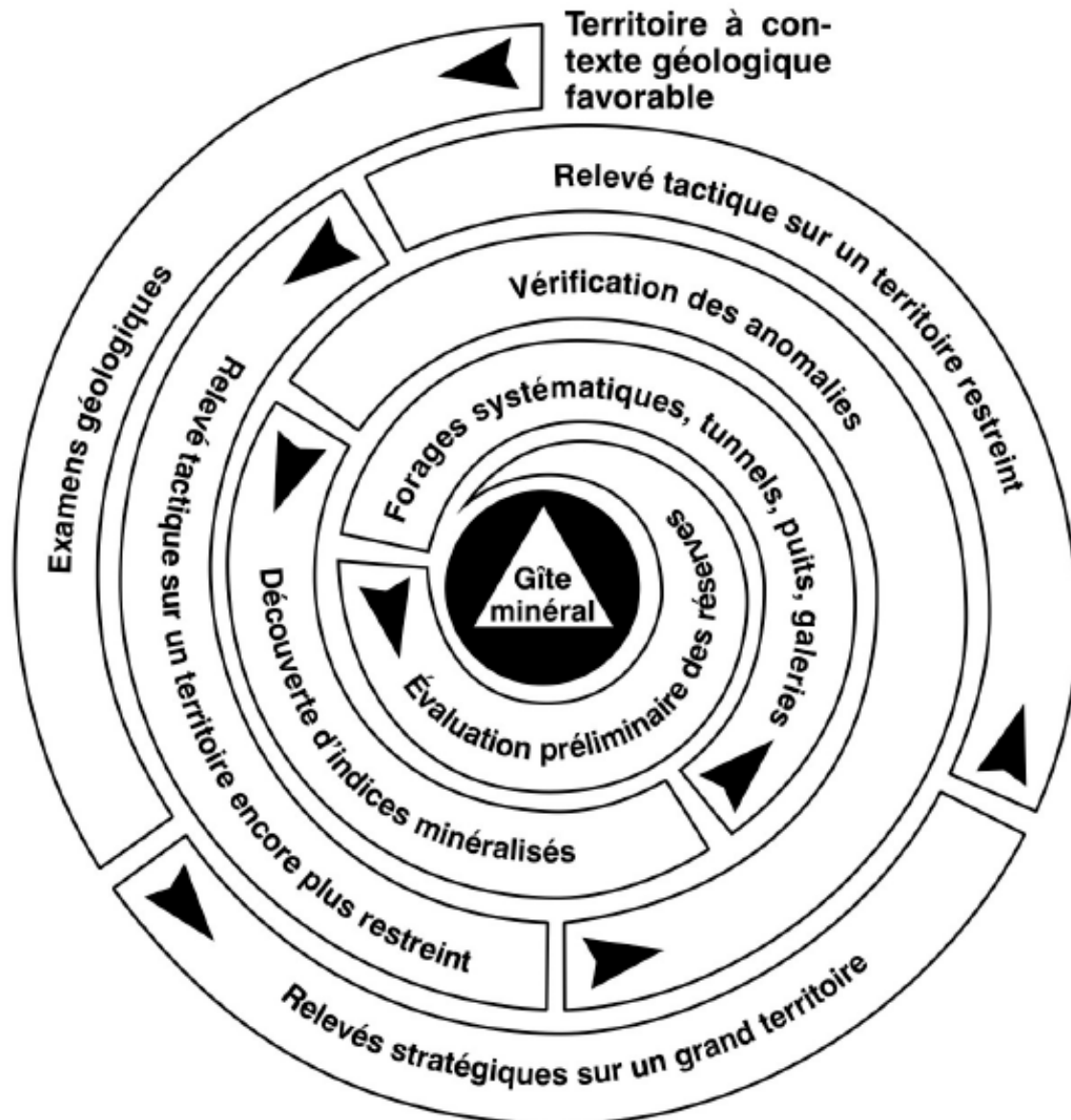
Fig. 7: Texture des dépôts minéralisés liés à un corps plutonique, domaine continental

ROSPECTION

La prospection est définie comme étant l'activité reliée à la recherche des concentrations de minéraux. Les étapes reliées à la prospection sont:

- 1- Recherche bibliographique (rapports des ministères etc.);
- 2- Analyse des cartes géologiques et topographiques disponibles;
- 3- Analyse des photos aériennes et des images satellite (lumière visible, infra-rouge, radar etc..)
- 4- Synthèse de l'information recueillie en 1, 2, et 3;
- 5-Travaux de relevés géophysiques aéroportés des zones étudiées;
- 6- Amorce d'une campagne d'exploration au sol afin d'étudier plus en détail les anomalies géophysiques par cartographie pétrologique, structurale géophysique et géochimique, si applicables.
- 7- Assemblage et analyse des données recueillies.

PROGRAMME TYPE D'UNE CAMPAGNE D'EXPLORATION MINIÈRE



But: mise au jour d'un gîte minéral
Durée d'un programme: deux à cinq ans

Source: Rapport annuel de SOQUEM 1972

Chapitre IV

Classification des gisements et des minéraux utiles

La classification des gîtes a pour objet d'une part de former des groupements des concentrations minérales présentant des analogies entre elles et d'autre part d'orienter l'exploration minière dans d'autres provinces ayant des phénomènes géologiques similaires. Les classifications scientifiques sont d'ordre génétique et permettent de tenir compte de l'ensemble des phénomènes géologiques et physico-chimiques qui ont contribué à la mise en place de la minéralisation.

Les classifications des concentrations minérales les plus utilisées peuvent être :

- en fonction de la forme du dépôt, on parle de dépôt concordant ou stratiforme;
- en fonction de la situation du dépôt dans le temps, on parle de : (1) syngénèse, c'est processus dans lequel le minerai et son encaissant (roche) support se mettent en place en même temps; et (2) épigénèse, correspond au dépôt du minerai dans un encaissant (consolidé) support se met en place antérieurement;
- en fonction de la situation du dépôt dans l'espace (par rapport à la dynamique terrestre), on parle de : (1) dépôt exogène (formé à la surface de la terre); (2) dépôt endogène (formé dans la lithosphère); (3) dépôt supergène et/ou hypergène (formé à la surface dans la zone d'altération météorique) et (4) dépôt hypogène (formé en dessous de la zone d'altération météorique);

Cette dernière classification est la plus utilisée pour la classification des concentrations minéralisées. Il faut noter que plusieurs concentrations minéralisées étaient au départ syngénétiques, puis sont devenues épigénétiques par l'intervention de plusieurs phénomènes remobilisateurs et reconcentrations (diagenèse, métamorphisme et hydrothermalisme,...).

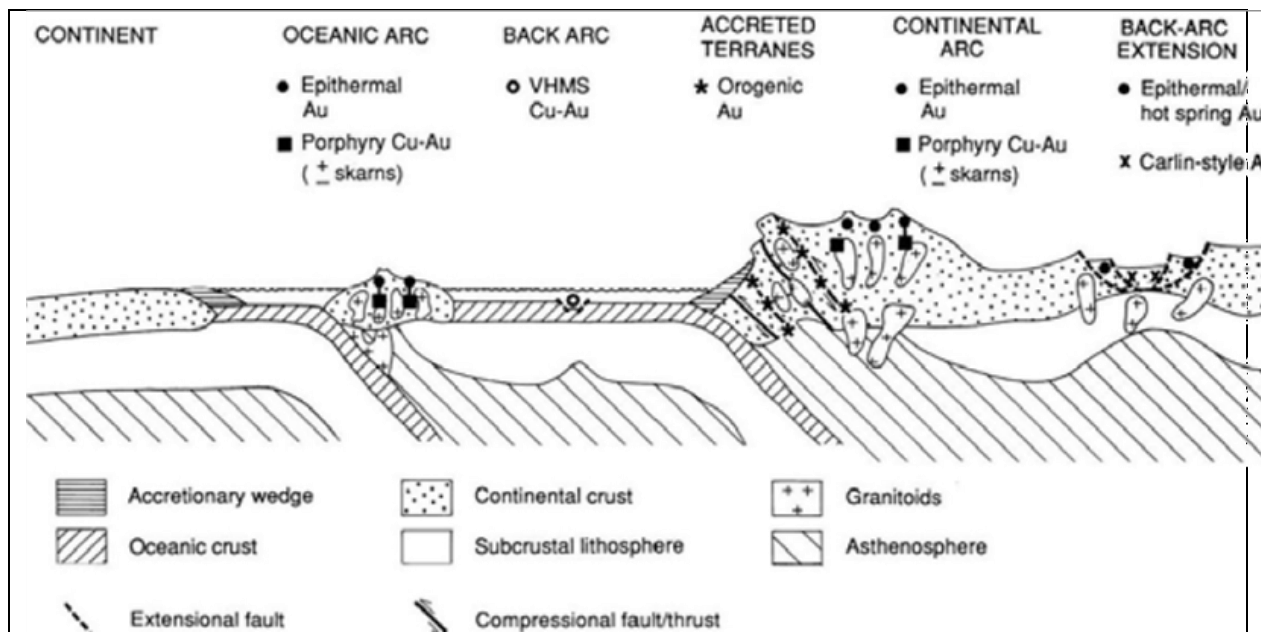


Fig. 1: Schémas montre les contextes géologiques favorable pour la formation des types de gisements

I. Les gisements orthomagmatiques (liés aux roches mafiques et ultramafiques)

1. Introduction

Les roches mafiques et ultramafiques correspondent à un magmatisme à composante mantellique. Le manteau représente 83% en volume de la terre. Il est composé de dunite (olivine), d'harzburgite (olivine, orthopyroxène et spinel) et de lherzolite (olivine, clinopyroxène et spinel). Au voisinage de la surface, le manteau cristallise sous forme de gabbros, basaltes, andésites,... ect. Les fluides magmatiques sont éventuellement contaminés par le soufre ou par de la silice lors de leur ascension dans la croûte.

Ainsi, les concentrations minéralisées orthomagmatiques se forment au cours de la différenciation du magma métallifère directement dans le bain de fusion de composition mafique à ultramafique ou alcalin. Lors de refroidissement de ce bain de fusion, l'accumulation des minéraux métallifères peut se faire par deux voies principales:

- Dans le magmas, les métaux peuvent appartenir à des minéraux de première cristallisation, ils y concentrent lors de la cristallisation fractionnée, avant la solidification complète de la partie restante du bain de fusion et engendrent les gisements de ségrégation ou d'accumulation;

- Le magma en se refroidissant se sépare en deux liquides non miscibles : un liquide sulfuré-oxydé métallifère dans un bain silicaté, dont la cristallisation séparée conduit à l'isolation de gisements dits de liquation (séparation de la fraction immiscibles).

Les métaux concernés sont des éléments intermédiaires : principalement le Titan, le vanadium, le chrome, le nickel (70% de la production mondiale dans ce groupe), le cuivre (2% mondial) et les platinoïdes (99% mondial). Fer, manganèse, étain, soufre, et cobalt constituent parfois des sous produits, mais ne sont pas économiques à eux seuls.

Une concentration orthomagmatique métallisée peut constituer la mase entière de la roche ou une couche dans cette roche, ou peut correspondre à la présence de minéraux accessoires de grande valeur dans une roche.

Exemples de gisements

2. Gisements d'inclusion

Le minerai est disséminé à faible teneurs dans les roches support. L'exploitation rentable n'est possible que pour les minerais de grande valeur tels que le platine et le diamant.

Ex: Le diamant est exploité à Kimberley (Afrique du sud) à partir d'une roche appelée Kimberlite (**Fig. 1**)

Les Kimberlites sont des roches ultramafiques potassiques, riches en éléments volatiles. Elles contiennent toujours de l'olivine, accompagnée suivant le cas, par de la monticellite (olivine calcique, Ca_2SiO_4), la phlogopite, le diopside, serpentine ou calcite, avec des minéraux (apatite, grenat, magnétite et diamant). Les teneurs en diamants sont très faibles et

varient de 0,5 à 5 carates/tonne (1 carate = 0,2 g); la proportion de diamants varie de 5 à 15% (Bardet, 1976).

Les kimberlites sont fortement altérées; en surface, l'olivine est remplacée par des serpentines. Des faciès de bordure plus oxydés sont fréquents.

Les diamant sous forme directement au sein du magma silicaté, (900 à 1600°C et 45 à 70Kb; 300 km de profondeur), dans des environnements réduits. Le magma doit remonter rapidement le long de cheminées ou "pipes" pour transporter les fragments et éviter la destruction de diamant (7 à 20 m/s). A la rencontre avec une nappe phréatique, le magma explose.

Parmi les 100 gisements de Kimberlites connus dans la région de Kimberly, seuls 20 sont productifs. Les Kimberlites sont la source endogène unique du diamant, mais toutes les kimberlites ne sont pas minéralisées en diamant.

3. Gisements de ségrégation

Les minerais se rencontrent en corps lenticulaires pseudostratiformes dans les complexes de roches mafiques et ultramafiques. Les oxydes et les sulfures de haute température s'accumulent localement lors de la différenciation magmatique rythmique sous l'influence de leur température de cristallisation et leur densité.

Ex : Le complexe de Bushveld (Afrique du sud) (**Fig. 2**); ce complexe est le plus grand complexes mafiques/ultramafiques stratifiés connus (12000 km²). Il date du protérozoïque inférieur (~ 2 MA), c'est la plus grande réserve mondiale de Cr, Pt, V, Palladium (Pa), Osmium (Os), Iridium (Ir),... ect (**Fig. 3**).

L'évolution de Bushveld est typiquement conditionnée par la cristallisation fractionnée et le fractionnement gravitaire, complexés par la réinjection plus ou moins périodique de magmas frais qui se mélange plus ou moins avec les liquides différenciés (**Fig. 4**).

La séquence magmatique comprend quatre ensembles de puissance kilométrique : une zone inférieure de dunites et de pyroxénites; une zone critique à différenciation magmatique poussée contentent les minéralisation chromifères et à Cu-Ni; une zone principale à gabbros, norites (variété de gabbro avec hypersthène dominant, parfois à cordiérite à grenat pyrope et à spinelle) et anorthosites et une zone supérieure à gabbros, anorthosites. On rencontre les chromitites ferrifères dans la zone critique ou différenciée inférieure où elles forment des horizons continus plusieurs dizaines de kilomètres, avec une puissance de 2 m. Elle produisent 75% du chrome dans le monde. Le chrome est sous forme de chromite (Cr₂O₃, FeO), et la teneur est de 50% de chromite. Dans la même zone apparaissent des niveaux métriques à platinoïdes associés soit aux chromites, soit à des niveaux pegmatoïdes très différenciés (Merensky Reef), avec une teneur de 10 g/t en platine. les sulfures sont peu abondants. Les associations minéralogiques varient suivant les niveaux. Le platine est à l'état natif ou sous forme d'un minéral platinifère principal, la braggite (PtPdNiS), associé à d'autres minéraux de platine, de l'iridium, de palladium, des minéraux d'arsenic, de cuivre et d'or. Les

faciès anorthositiques situés plus haut dans la séquence contiendront des niveaux de magnétite titanifère.

3. Gisements de liquation : séparation de fractions immiscibles

Exemple: Le complexe de Sudbury (Ontario, Canada)

Le complexe de Sudbury forme une dépression ovale de 60 km de plus grand diamètre. Ce complexe ne comprend qu'une seule séquence magmatique. Il se serait mis en place suite à la chute d'un astéroïde d'un diamètre de 10 km (Dietz, 1964; Pye et al., 1984). C'est la plus grande zone productrice de nickel du monde. Il est composé d'une séquence différenciée de norite de quartzifère à la base, puis de gabbros quartzeux et granophyres. La formation sus-jacente riche en clastes a été interprétée comme une brèche de retombée suite à l'impact. L'ensemble est recouvert de shales et de roches détritiques. Ce complexe contient des gîtes de Ni-Cu associés à des niveaux de norites à la base du complexe, ou à des dykes dans l'encaissant. Le minerai est massif, disséminé ou bréchique. L'assemblage comprend fer - nickel (pyrrhotite, pentlandite $(Fe,Ni)_9S_8$ et pyrite) d'une part et Cu-Fe (chalcopyrite, cubanite et bornite) d'autre part. Le quartz est parfois abondant. Les minéralisations pourraient être dérivées de la croûte précambrienne sous-jacente et concentrées du fait de la contamination du magma basique par la croûte continentale riche en soufre.

Mines de diamant et projets en développement dans le monde

Très peu de mines ; assez pour tenir sur une seule carte

37

stornoway
DIAMOND CORPORATION

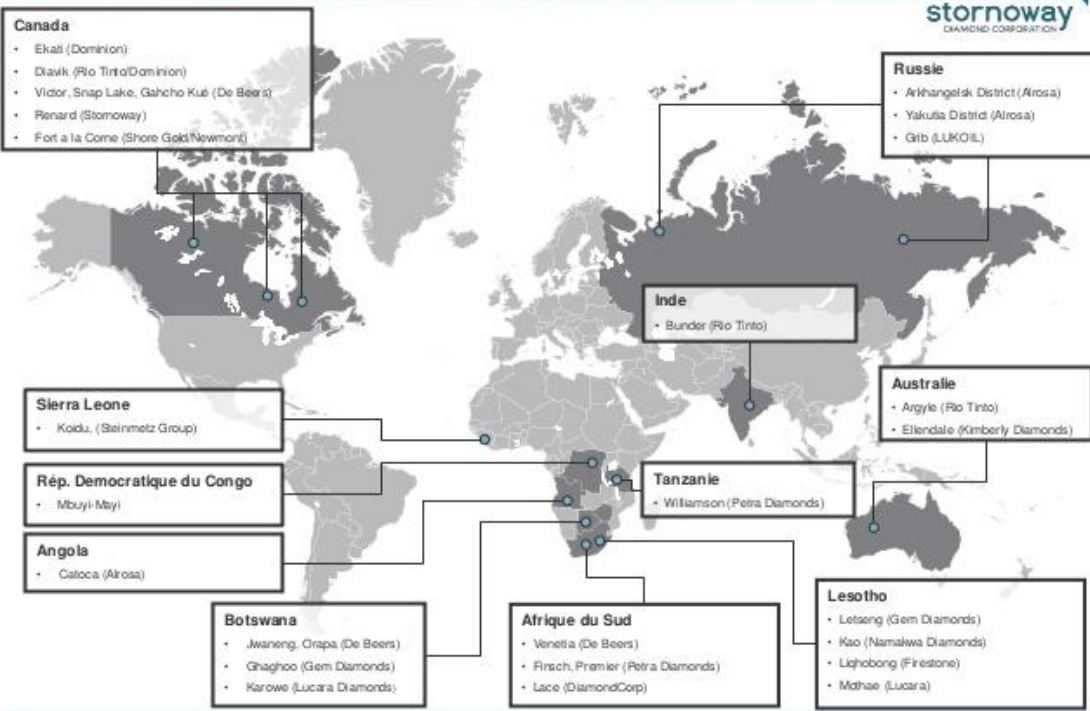


Fig. 1: Carte de répartition des Kemberlites et les gisements de diamant dans le monde

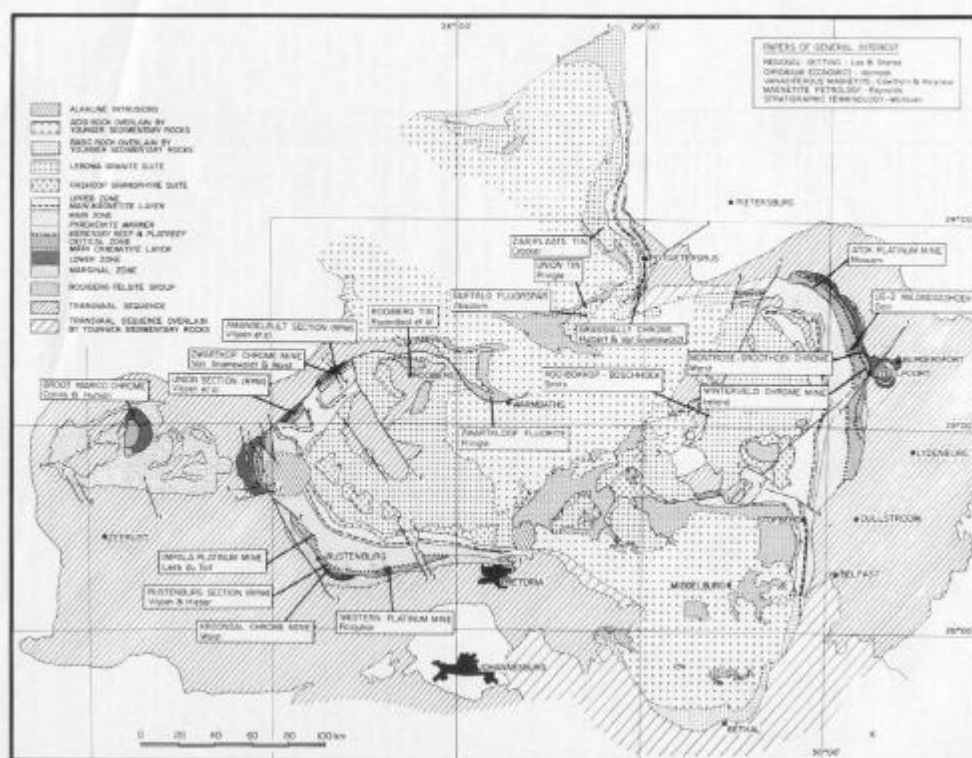


Fig. 2: Carte géologique simplifiée du complexe du Bushveld

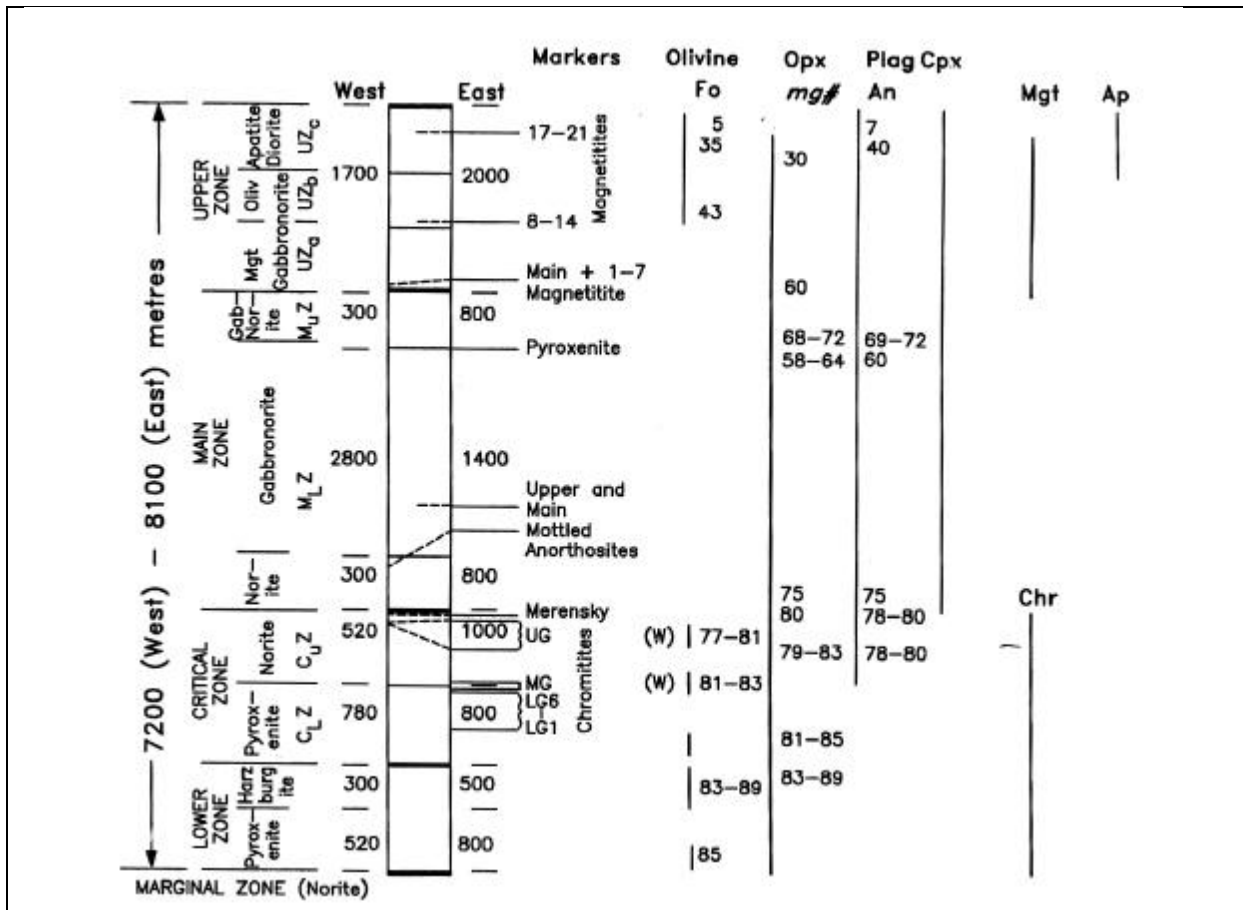
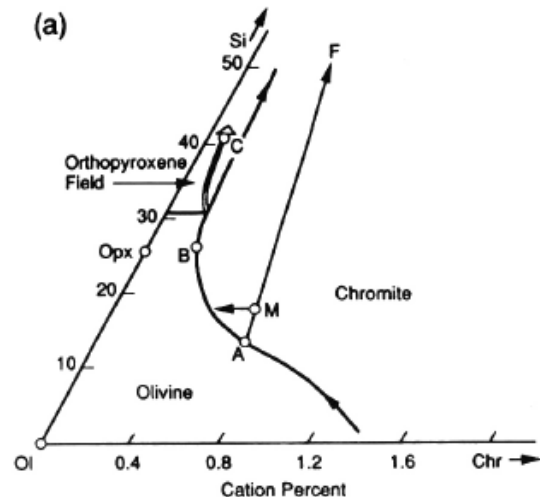
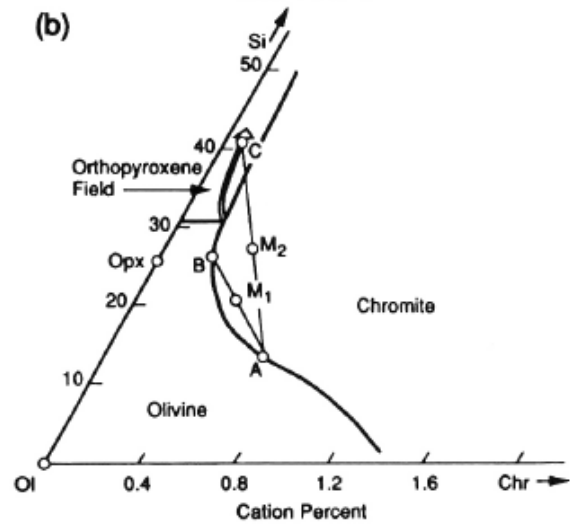


Fig. 3: Stratigraphie général du complexe du Bushveld, et composition des principales phases minéralisées

Fig.4: Précipitation de chromite lors de mélanges de magmas (Naslund & McBirney, 1996). Dans un diagramme SiO₂-Olivine-Chromite (notez les différences d'échelle sur les deux axes), le champ de la chromite s'élargit vers le pôle SiO₂, traduisant sa plus faible solubilité dans les magmas acides. Un magma A à gauche évolue sur le cotectique Ol-Cr, formant des péridotites à chromite. Si on le mélange à un magma felsique F, la composition M du mélange se trouve dans le domaine où la chromite est la phase au liquidus ; on précipite donc de la chromite, jusqu'à ce qu'on rejoigne le cotectique olivine-chromite et qu'on recommence à former des péridotites chromifères. On continue ensuite jusqu'au champ de l'orthopyroxène. On devrait alors suivre le cotectique orthopyroxène-chromite et former ces deux minéraux ; en réalité, on peut incorporer un peu de Cr dans le pyroxène, si bien qu'on se retrouve plutôt au point C. A droite, la même chose se passe si on mélange le magma primitif A avec du magma différencié C, ou même B : le



mélange M1 ou M2 se situe dans le champ de la chromite.



Gisements liés aux granitoïdes

(Gisements hydrothermaux)

I. Les minéralisations liées aux granitoïdes

1. Introduction:

La mise en place d'une intrusion magmatique conduit à une augmentation du flux géothermique autour de l'intrusion et donc le serrage de l'isogrades de température autour de celle-ci, ainsi, plus l'intrusion est proche de la surface plus les isothermes sont serrés. La formation des gîtes hypothermaux, méso et épithermaux ne dépend pas de la profondeur de mise en place de l'intrusion, mais de la température de formation du gîte autour du granite (**Fig. 1**).

Quand un magma se refroidit, les minéraux cristallisent suivant des suites et il reste des produits résiduels métallifères (**Fig. 6**).

Au stade orthomagmatique (950° à 800° C), les minéraux majeurs cristallisent, et dans le cas des magmas acides, ce stade n'est généralement pas accompagné de la concentration de minéraux métallique.

Au stade tardi-magmatiques (800° à 600° C), c'est à dire vers la fin de la cristallisation d'un magma granitoïde, il reste toujours des résidus magmatiques avec des minéraux très siliceux riches en volatils : P, B, Cl, F, CO₂, H₂O vapeur. Dans ces résidus, il y a aussi une concentration de métaux qui n'ont pas trouvé de minéral hôte dans les minéraux majeurs du granite. Ces résidus ont tendance à monter dans les batholithes granitoïdes à peu près cristallisés. Le processus de cristallisation comportant la différenciation et le dépôt de cristaux augmente graduellement la concentration des constituants plus volatils du magma. Si les substances ne trouvent pas de chemin pour s'échapper, les fractions volatiles les plus légères en plus des composants ayant une faible température de cristallisation s'accumulent près de sommet de la chambre magmatique et forment les constituants sources de deux lignées : pegmatitique (température de mise en place 600 à 500 ° C) et pneumatolytique - hydrothermal plus tardive.

Au stade post-magmatique, se mettent en place les concentrations pneumatolytiques (500 à 400° C) qui correspondent aux éléments transportés par de gaz qui s'échappent du batholite avec leur contenu métallifère. La condensation des gaz issus du magmas granitoïdiques va donner naissance à des solutions riches en éléments métalliques : solutions hydrothermales d'origine magmatique, qui peuvent éventuellement se mélanger avec des eaux d'autres sources non magmatiques (météoriques, métamorphiques) et donner les trois types de gisements hydrothermaux :

- 400 à 300° C : concentrations hydrothermales ou catathermales;

300 à 200 ° C : concentrations mésothermales;

200 à 100° C (voir 50° C) : concentration épithermales.

Eléments dominants dans les lignées

a). lignée pégmatisique : Al, K, Na, Ti, Li, Be, Rb, Cs, Zr, Nb, Ta, TR, les minéraux caractéristiques : Silice abondante, quartz, feldspath, micas lithinifère, Béryl, Tourmaline. En fin de cristallisation des pegmatites, on peut trouver des sulfures.

b). lignée pneumatolytique - hydrothermale

Si, Fe, Ba, S, As, Sb, Sn, W, Bi, Mo, Au, Cu, Zn, P, U,.....

Silice en excès: gangue essentiellement quartzeuse; sulfures, sulfoarséniures, tungstates, oxydes,... Dans la gangue des filons pneumatolytiques, il peut exister des minéraux des pegmatites, tels que les feldspaths, la tourmaline et l'apatite.

NB: la différence entre les deux lignées est purement quantitative.

2. Zonalité des minéralisation

a. Définition

Une minéralisation est rarement homogène à l'intérieur d'un corps minéralisé ou dans une zone minière (district minier). La répartition des éléments peut se faire d'une façon désordonnée. Elle peut au contraire s'organiser d'une façon précise en fonction de la forme du corps minéralisé ou de la répartition générale dans le district minier, on dit alors que la minéralisation suit une zonalité qui peut être observé à plusieurs échelles : régionale (province), du district ou du corps minéralisé.

Ce phénomène de zonalité peut être observé aussi bien au niveau des gisements sédimentaires, magmatiques, métamorphiques et hydrothermaux.

Remarque: toute détection d'un schémas de zonalité est importante pour la géologie économique parce qu'elle aide à prédire les changements dans le style et la teneur de la minéralisation.

b. Zonalité péribatholitique

Les gisements au magmatisme acide s'inscrivent très souvent au sein de zonalité régionale qui fossilise l'évolution en température, Eh, pH et/ou la composition chimique des circulations hydrothermales. Les métaux sont plus ou moins mobilisés selon la température. On distingue ainsi des métaux déposés à température élevée (>300° C : Sn, W et Mo), à température moyenne (Cu, Zn, Ni et Co) et à relativement basses température (100 à 200°C : Pb, Hg, U, Ba et F). Certains métaux, tels Au paraissent mobiles à des températures variées. La nature des minéraux peut également dessiner une zonalité pour un même élément, avec par exemple pour l'étain, cassitérite à haute température et stannite à plus basse température, ou l'évolution des espèces du fer (magnétite, pyrrhotite, pyrite, marcasite). Il peut apparaître des perturbations dans ces schémas de zonalité, en particulier par télescopeage entre différentes pulsations hydrothermales.

Remarque : Les zones géochimiques se recoupent entre elles et recourent le batholite, ceci est mis en évidence par la disparition de certaines zones avec la profondeur; par exemple, il n'existe pas de Pb en grande quantité associé aux granites dans les vieux boucliers car l'érosion a enlevé la zone géochimique où domine le Pb.

c. Exemple de zonalité périplutonique

- gisements de Sn-W-Cu de Cornouailles

Sn-W, Cu se trouvent au sommet de batholites acides hercyniens post-tectonique (300 Ma) encaissés dans des terrains schisteux du Dévonien.

Les granites sont à deux micas porphyroïdes, ils provoquent la formation d'auréoles de métamorphisme de contact avec des schistes micacés et des cornéennes.

La minéralisation est sous forme de filons et stockwerks à gangue quartzeuse qui recourent le granite et les schistes.

Cette minéralisation est très variée se modifie au fur et à mesure qu'on s'éloigne du granite et présente une zonalité centrée sur le granite. on exploite Sn-W-Pb-Zn.

Sn : très abondant dans le granite et dans l'auréole de métamorphisme de contact;

Cu : se palace à l'extérieur et domine dans l'auréole de contact;

Pb - Zn et Sb : se trouvent en dehors de l'auréole de métamorphisme de contact.

La répartition des minéraux dans les filons est comme suit:

Cassitérite SnO_2 : seule dans le granite (dans des filons encaissés dans le granite),
Wolframite $(\text{Fe, Mn})\text{WO}_4$ + Cassitérite : vers la limite granite - schiste;

Association cassitérite - chalcopryrite - wolframite : plus loin dans les schistes : zone de transition : zone cupro - stannifère;

Plus loin, la cassitérite disparaît complètement pour faire place à des sulfures, entre autres, la stannite $(\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4)$, ect ...

La répartition des éléments métalliques montre une zonalité qui peut être attribuée à un gradient thermique qui conditionne les migrations des éléments chimiques, on distingue différents domaines:

- domaines pneumatolytique : zone stannifère;
- domaines hyperthermal : zone cuprifère (HT°);
- domaine mésothermal : zone à Pb - Zn (MT°);
- domaine épithermal : zone à Sb (BT°).

Remarque : la succession zonale complète ne se trouve jamais dans un même filon, on trouve souvent des filons avec Sn-Cu, les filons à Pb-Zn ne sont pas en relation avec les filons à Sn.

II. Circulation fluides liées aux granitoïdes

1. Introduction - typologie des circulations fluides

La possibilité pour les fluides magmatiques de participer à la formation de gisements dépend des conditions dans lesquelles se produit leur séparation du magma (démixtion), et de l'existence ou non d'un réseau de fracture susceptibles de les drainer.

Intrusion subvolcaniques: la surpression est forte et la résistance mécanique des roches peut être dépassée, il y aura alors fracturation hydraulique et les fluides magmatiques s'échapperont facilement, donnant naissance à un système magmatique - hydrothermal.

Intrusion de moyenne profondeur : la surpression est moins importante et n'engendre généralement pas de fracturation de l'encaissant, mais elle est suffisante pour ouvrir les joints préexistants, les fluides magmatiques s'échapperont encore facilement.

Intrusion profondes : il n'y a pratiquement pas de surpression, la démixtion de la phase fluide à partir du magma n'engendre pratiquement pas d'effet mécanique (fracturation), les fluides magmatiques diffusent lentement dans l'encaissant et l'hydrothermalisme est très réduit ou absent.

2. Les systèmes magmatiques hydrothermaux : les gisements de type porphyre (intrusion subvolcanique)

Les intrusions correspondantes sont généralement microgrenues porphyroïde, d'où le nom de porphyre donné à cette classé de gisements.

Les fluides magmatiques responsables de la fracturation hydraulique sont riches en Cl, présentent un rapport K/Na élevé (~ de 1%) entraînent avec eux le soufre et les métaux (ex Cu, Mo, ...) présents dans le magma. La relaxation de la pression due à la fracturation hydraulique entraîne l'ébullition de ces fluides (saumures chauds + vapeurs) et leur refroidissement, ce qui conduit à la précipitation des métaux sous forme de sulfures (bornite, chalcopirite, molybdénite) (**Fig. 6**).

L'anomalie thermique causés par l'intrusion chaude met en circulation des fluides externes libres (eaux météoriques) avec une convection autour du pluton. Les fluides météoriques surimposent progressivement leurs effets à ceux des fluides magmatiques qui se tarissent peu à peu.

Les fluides hydrothermaux de différents générations développent dans et autour des plutons un système d'altérations emboîtées qui dessinent une zonalité, et dont le type et la zonalité sont typiques et caractéristiques des gisements de type porphyres cuprifères, molybdiques et stannifères (**Fig. 7**).

Exemple: Les porphyres cuprifères

Un porphyre cuprifère est un granitoïde spécialisé, ce véritable drain d'altération hydrothermale entraînant une concentration d'un facteur de 100 du Clarke du Cu. C'est un système plutonique de faible profondeur (1 à 5 km), avec des roches de texture porphyrique. Plus de la moitié de la production mondiale de cuivre provient des porphyres cuprifères. Des altérations très typiques zonées sur le pluton, caractérisent les porphyres.

3. Les gisements périlitholitiques à Sn-W : Intrusions de moyenne profondeur

Exemple : Gisements pneumatolytiques ou de départ acide

Définition : Ce sont des corps minéralisés à gangue quartzeux liés à des coupoles de granites aluminopotassiques (monzogranites-leucogranites) intrusifs dans les séries modérément métamorphisées, il s'agit des minéralisations apportées par des résidus vapeurs acides de haute températures. En 1973, les coupoles fournissaient environ 50% de la production d'étain, le reste provenant surtout de placers.

Position : les corps minéralisés se situent autour de petits apex granitiques et très près du contact avec l'encaissant. Les apex sont particulièrement favorables, c'est à dire qu'il faut chercher des petits plutons peu érodés. Les gîtes montrent une zonalité thermique qui contrôle le dépôt des minéralisations

Morphologie des corps minéralisés : Elle dépend du mode de drainage des fluides résiduels qui dépend de l'étanchéité de l'encaissant (possibilités de porosité et de perméabilité). Il y a plusieurs formes possibles : on rencontre essentiellement des dépôts disséminés, des stockwerks et des filons.

- dépôts disséminés : dans l'apex granitique sous forme de petites mouches ou sous forme de petites veinules. Les fluides n'ont pas pu sortir de l'apex granitique, ils procèdent à l'altération de celui ci et y déposent la minéralisation.

- Stockwerks : il s'agit de veinules quartzuses entrecroisées, très serrées et millimétriques à centimétriques. On exploite l'ensemble de stockwerks (exploitation en masse). Les stockwerks se trouvent soit à la limite de l'apex, soit légèrement dans l'encaissant près du contact avec le granite.

-filons : ils remplissent les fissures dans une roche perméable grâce à des structures du granite et de l'encaissant (failles, schistosité, diaclases, ...). Les filons peuvent avoir une taille métrique, ils présentent une texture rubanée symétrique.

Les dépôts disséminés et les stockwerks sont en général dans l'encaissant (exemple, Gisement d'Erzgebirge, Allemagne).

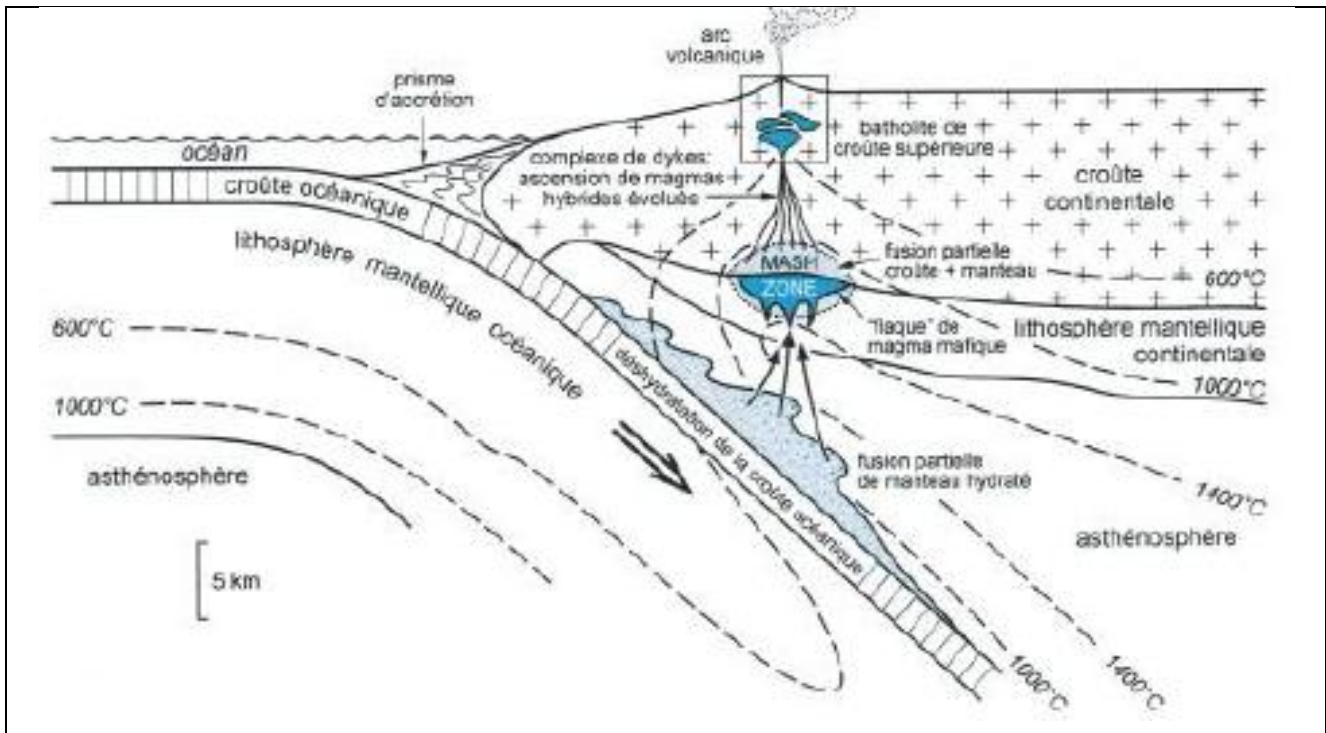


Fig.1 : Géodynamique de la minéralisation type porphyrique : zone de subduction, contexte continental et d'arc insulaire. Subduction : site de nombreux événements métallogéniques (porphyres, skarns épithermaux)
 - Fusion étagée crustale et mantellique: genèse de magmas hybrides à Cu – (Au-Mo); Sn-W et Cu-Pb-Zn-(Ag-U);
 - Profondeur : 1 à 5 km;
 - Température : 750 à 850 ° C;
 - Chimisme variable : en moyenne 60 à 68% SiO₂.

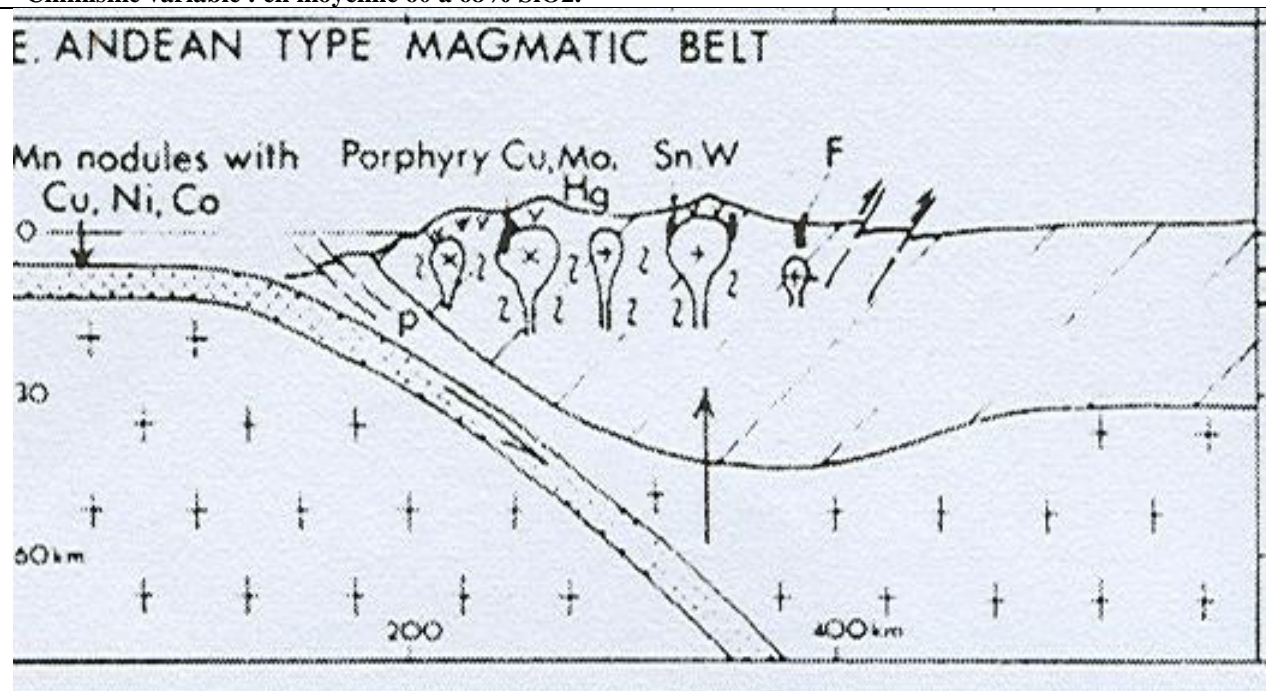


Fig. 2 : L'assemblage minéralogique au niveau d'une marge active
 1- Porphyres à Cu-Mo
 2- Skarns à Cu-W-Mo-Sn-Au

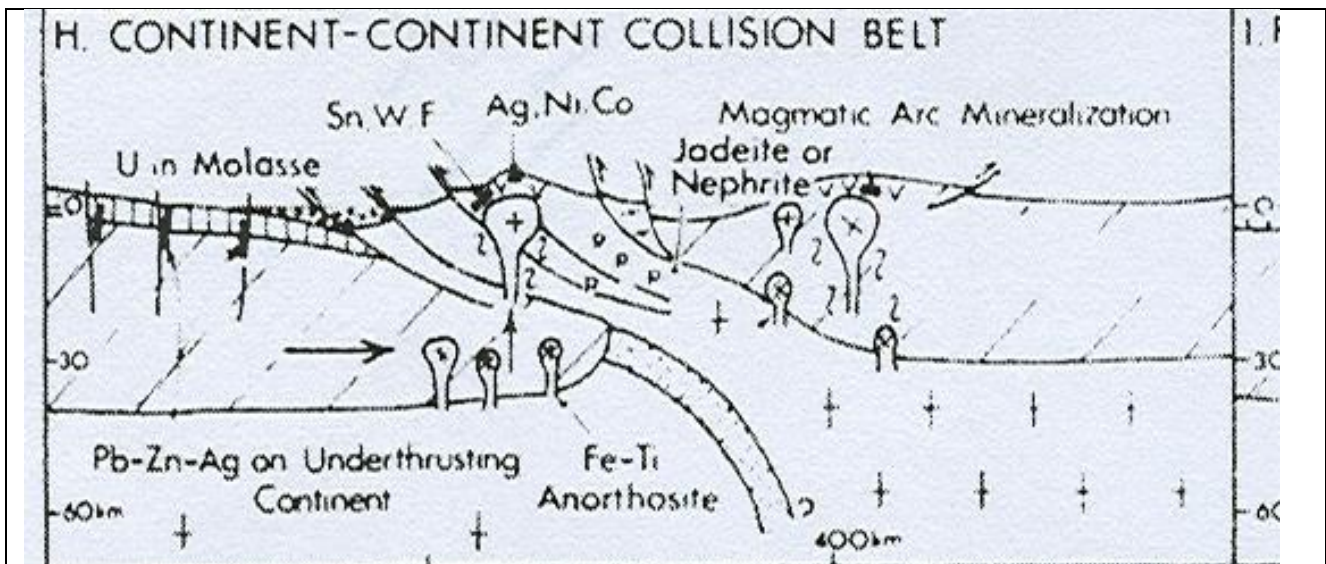


Fig. 3 : Gîtes porphyrique dans un site géodynamique de collision continentale

- 1- Skarns à Sn-W
- 2- Greisens à Sn-W
- 3- Pégmatis
- 4- Filons polymétalliques
- 5- Zones de cisaillements aurifères
- 6- Enrichissements liés au métamorphisme régional

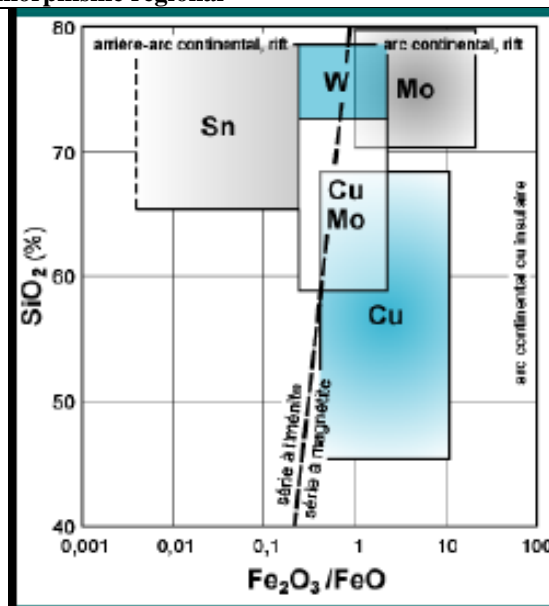


Fig. 4 : diagramme montre la répartition des éléments métallique liés aux plutons granitoïdes et les sites géodynamique

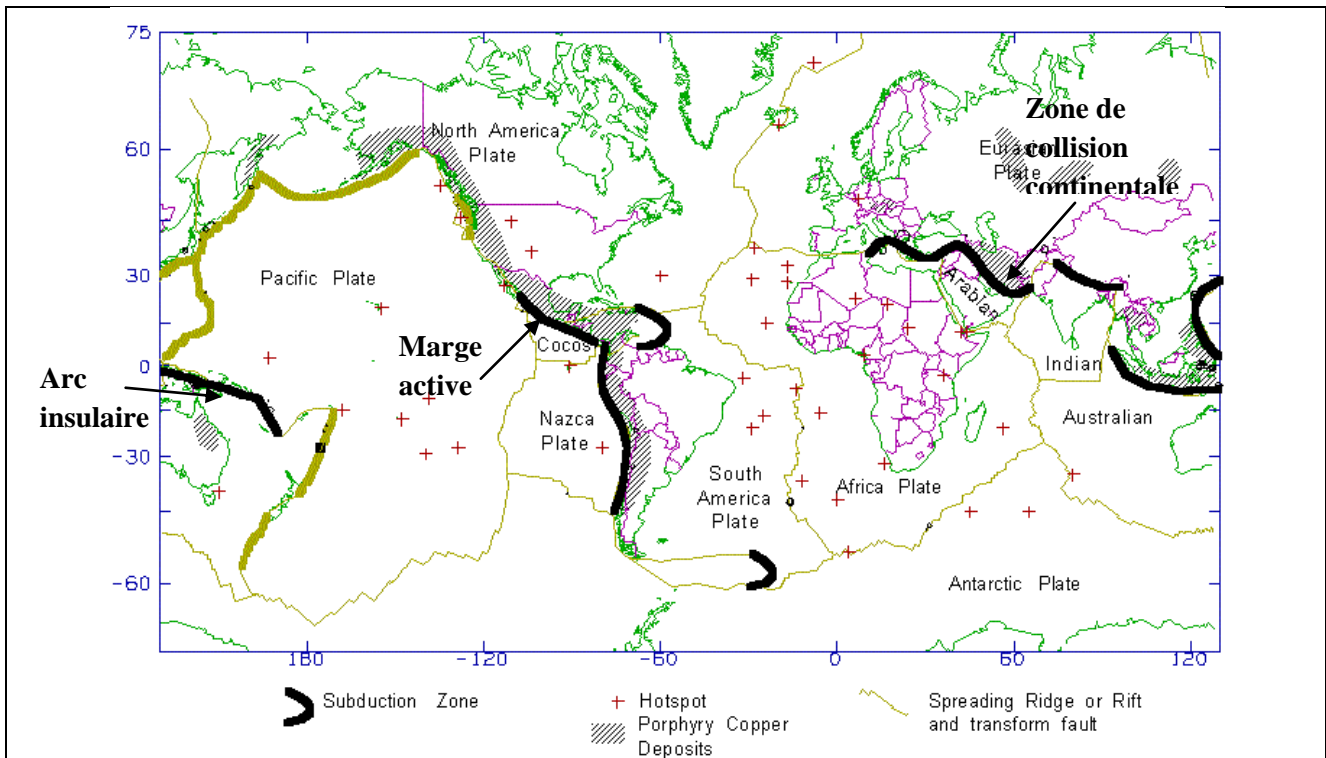


Fig. 5: La répartition spatiale des gisements porphyriques cuprifères.

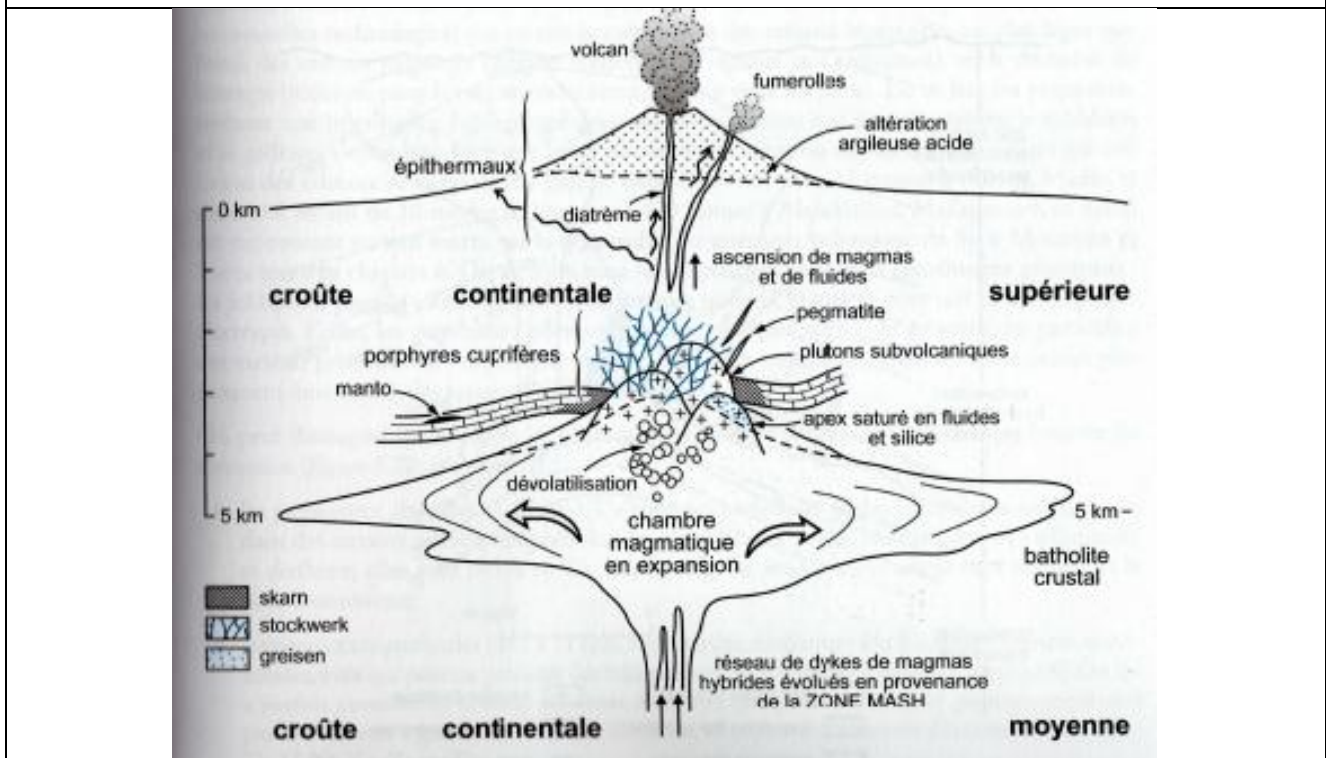


Fig. 6 : Module de genèse des porphyres cuprifères et leur morphologie (disséminé, stockwerk, pegmatite, greisen, skarn, manto, filon). On remarque la position des Porphyres à l'apex du batholite, en liaison avec des intrusions polyphasées et emboîtées. Les fluides et magmas qui s'échappent et atteignent la surface peuvent donner des gisements épithermaux.

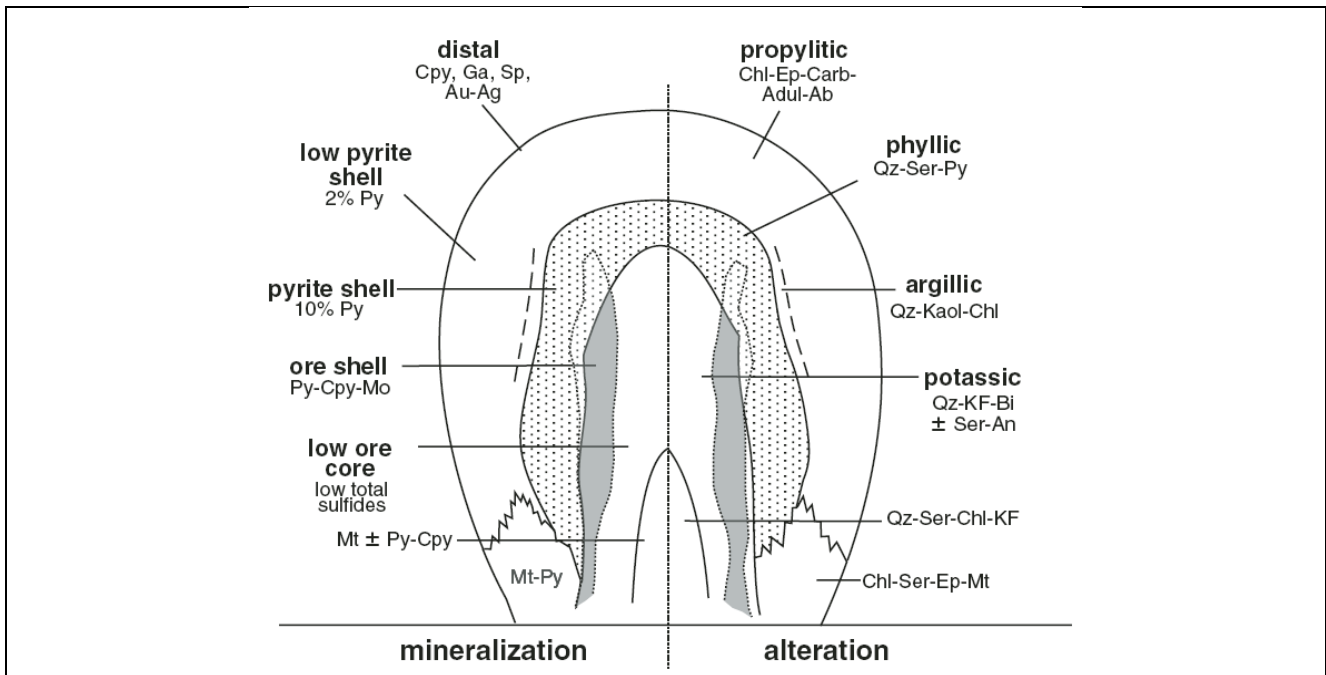


Fig. 7 : schéma montre la relation entre la minéralisation porphyrique et les zones d'altération autour d'un pluton granitoïde (Lowell and Guilbert, 1970).

Gisements liés aux volcanismes sous aquatiques

(Gisements hydrothermaux)

I. Introduction

Les amas sulfurés sont des gisements hydrothermaux en couche, amas ou lentilles encaissés au sein de formations volcanique, volcanosédimentaires ou sédimentaires. La puissance de ces corps minéralisés varie de quelques mètres à dizaines de mètres, avec une extension latérale allant à 1 km. Les amas sulfurés représentent les principaux gisements de métaux de base (Cu, Zn et Pb), des métaux précieux (Ag, Au) et de sous-produits de Sn, Cd, Sb, Bi..

II. Le contexte géodynamique

L'exploration des fonds marins depuis une vingtaine d'années a permis d'observer directement la formation de minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes (SMV et/ou VMS) sur ou près de la surface océanique (Rona, 1988; Herzig et Hannington, 1995; Ishibashi et Urabe, 1995). D'en est ressorti que l'activité hydrothermale associée aux SMV est présente dans plusieurs contextes volcaniques et géodynamiques différents comme les rides océaniques, les rifts de marge continentale et les systèmes de subduction et ce, à des profondeurs océaniques d'ordre kilométrique (Herzig et Hannington, 1995). Plusieurs études ont montré que les systèmes minéralisateurs reliés aux rides océaniques sont relativement homogènes (ex. TAG, Axial Seamount, EPR, Rona, 1988). D'un autre côté, les systèmes minéralisateurs situés dans les arcs et zones d'arrière-arc sont associés à plusieurs contextes géologiques différents selon la maturité de l'ouverture des bassins intra et arrière-arc (de rifting à création de croûte océanique; Parson et Wright, 1996) et la nature océanique ou continentale de la croûte subductante (Franklin, 1998; Herzig et Hannington, 1995; Ishibashi et Urabe, 1995).

Ces différents contextes géologiques associés aux zones de subduction incluent dans un premier temps les bassins d'arrière-arc matures (avec création de croûte océanique de type MORB) qui se développent dans une croûte océanique (ex. North Lau Basin, Fouquet et al, 1993; Manus Basin, Binns et Scott, 1993; North Fiji Basin), ou dans une croûte continentale (ex. Okinawa Trough, Halbach et al., 1993). D'autres contextes sont reliés aux zones de rift d'arrière-arc (début de l'ouverture de bassin) qui se développent soit dans une croûte océanique (ex. Southern Lau Basin, Parson et Wright, 1996) ou dans une croûte continentale (ex. Southern Havre Trough, Taupo, Parson et Wright, 1996). Enfin, il existe aussi des minéralisations de VMS associées aux zones de rift de volcans frontaux d'arc ou d'arc naissant qui reposent sur une croûte océanique (ex. Sumisu rift, Izu-Bonin, Iizasa et al, 1999; Southern Kermadec, Wright et al, 1998) ou sur une croûte continentale (ex. Kurile Arc, Ryuku Arc, Franklin, 1998). Les particularités de tous ces contextes géodynamiques différents influencent directement les caractéristiques des gisements de VMS qui s'y développent ainsi que leur environnement géologique immédiat.

III. Classification des amas sulfurés

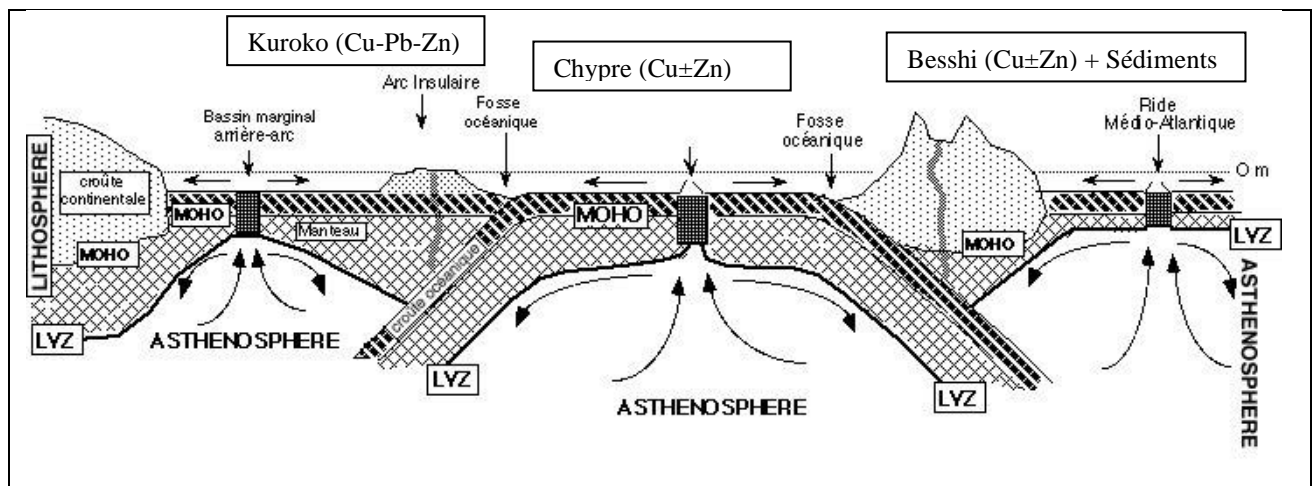
Pour arriver à décrire ces différents types de gisements de VMS dans des contextes anciens, plusieurs classifications basées sur le contenu en métaux (Solomon, 1976; Franklin et al, 1981; Large, 1992), le contexte tectonique (Sawkins, 1976; Franklin, 1998), les faciès volcaniques des roches encaissantes et l'altération (Morton et Franklin, 1987) ou la nature des roches encaissantes (Sangster et Scott, 1976; Barrie et Hannington, 1999) ont déjà été proposées. Dans les faits, la compréhension globale de l'environnement géologique associé à un gisement de VMS passe par la description de l'ensemble de ces caractéristiques lithologiques, volcanologiques, lithogéochimiques, hydrothermales, métallogéniques et gîtologiques. Une description synthétique de tous ces facteurs permet donc d'intégrer un gisement de SMV dans un contexte géodynamique particulier comme le fait la plus récente classification proposée par Franklin (1998).

1. sulfures massifs volcanogènes (VMS) (Volcanogenic Massive Sulfide)

Les gîtes de sulfures massifs volcanogènes (ou VMS pour Volcanogenic Massive Sulphides) se forment en même temps, que la roche encaissante dominée par des roches volcaniques, qui peuvent être accompagnées de shales ou de grauwackes.

On peut les subdiviser en 4 sous-types (**Fig. 1**):

- zones de convergence, bassins d'arrière arc insulaires : Précambrien d'Abitibi : (Cu-Zn), Rio-Tinto (Zn-Cu-Pb) (Paléozoïque);
- zones de convergence, bassins d'arrière arc insulaires: Kuroko (Cu-Pb-Zn);
- dorsales océaniques: Chypre (Cu±Zn);
- rift sur une marge continentale ou arrière arc: Besshi (Cu±Zn).



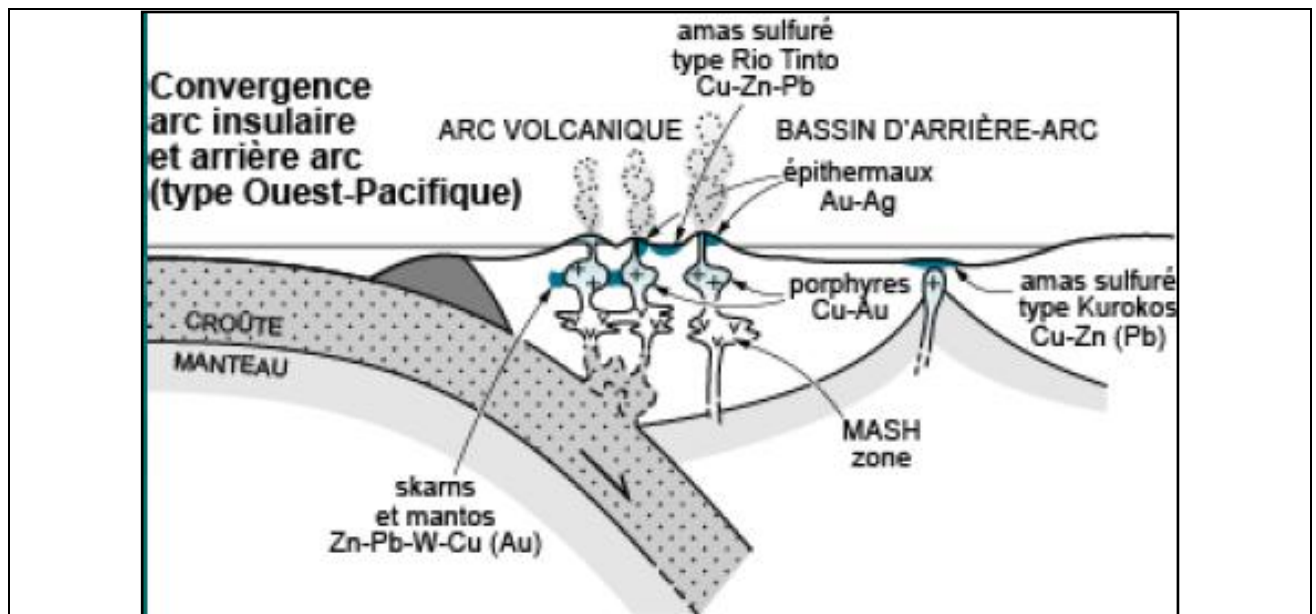


Fig. 1: Schémas montrant les différents sites géodynamiques de dépôt des amas sulfurés volcanogènes

2. Les gisements exhalatifs sulfurés "Sedimentary exhalative (SEDEX) "

Ce type de gisements sont les produits de l'hydrothermalisme sub-aquatique (océanique, marin ou lacustre), leur encaissant dominé par les roches sédimentaires (**Fig. 2**). Le volcanisme est souvent discret, parfois absent. Ils se distinguent des sulfures massifs encaissés par des roches sédimentaires « SEDEX », par leur assemblage de Cu-Zn-Pb et leur encaissant dominé par les roches volcaniques.

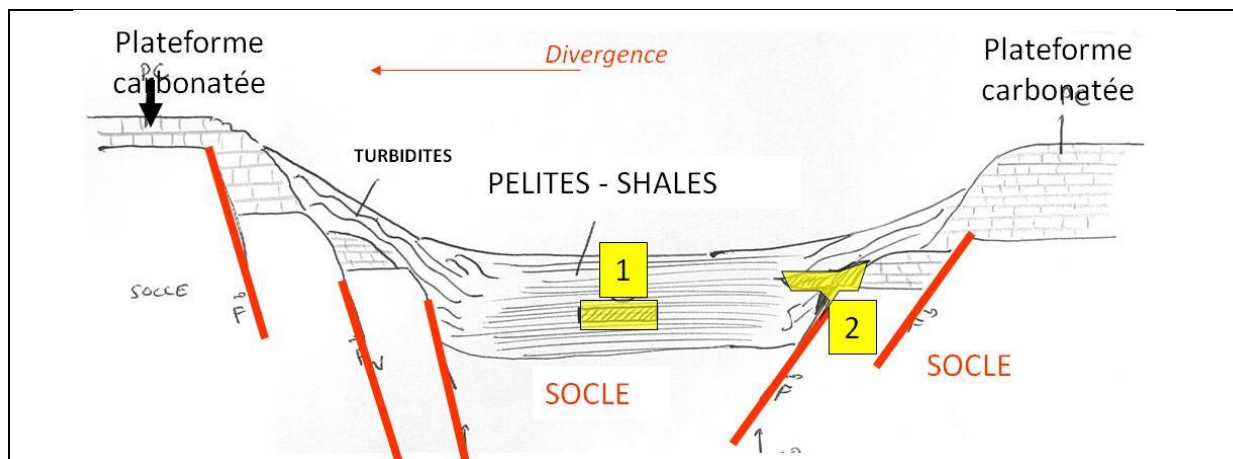


Fig. 2 : Contexte géologique de mise en place des amas sulfurés - type SEDEX:

- Contexte en distension obligatoire
- Origine : Fluides sous pression pendant la diagenèse
- Gisements Pb-Zn, les plus grands du monde

IV. Origine des composantes des amas sulfurés

- Les dépôts de sulfures massifs volcanogènes sont d'origine hydrothermale.
- Il est donc important de comprendre d'où proviennent les fluides hydrothermaux et comment ils circulent afin de former les amas minéralisés.

Il faut aussi connaître la source du soufre et des métaux pour produire les sulfures massifs et procurer une valeur à ces gîtes.

V. Source des fluides hydrothermaux

- Les fluides hydrothermaux proviennent essentiellement de l'infiltration de l'eau de mer dans les roches encaissantes (**Fig. 4**).
- En pénétrant celles-ci, l'eau de mer lessive les roches volcaniques et cause un échange des ions de magnésium et de calcium entre les fluides et le basalte (basalte enrichi en Mg et appauvri en Ca).
- Des rapports isotopiques de Pb et Sr témoignent également de l'interaction entre les fluides et les roches situées sous l'horizon sur lequel se sont déposés les sulfures massifs. Cela indique la présence de cellules de convection qui ont fait remonter les fluides après leur infiltration.
- La source de chaleur ayant provoqué cette remontée est expliquée par l'apport de fluides magmatiques qui sont indispensables à la formation des VMS.
- Ces fluides se mélangent à ceux provenant de l'eau de mer et sont remontés à la surface (le fond marin) à l'aide des cellules de convection. C'est la remontée de ce mélange de fluides sulfurés enrichis en Na-Ca-Cl avec des concentrations en ppm de Fe-Mn-Zn-Cu qui forment les sulfures massifs volcanogènes.

VI. Altération hydrothermale

Les fluides hydrothermaux circulant à travers le système altèrent les roches encaissantes (**Fig. 3**). Différents types d'altération sont associés à des gîtes de VMS. Il y a tout d'abord une distinction par rapport à l'étendue des zones d'altération selon le type de roches encaissantes. Lorsqu'il s'agit de coulées massives, l'altération n'est pas très étendue et le contact de cette zone est net avec les roches non-altérées. Par contre, dans le cas de roche volcanoclastiques, la zone d'altération est beaucoup plus prévasive et le contact est graduel. La zone d'altération peut également être appelée cheminée d'altération en raison de sa forme.

Deux types d'altération se développent dans les systèmes hydrothermaux des VMS :

1. En profondeur, dans la zone d'altération, les réactions (aux alentours de 400°C) correspondent à la formation des minéraux du faciès schiste vert (épidote, actinote). Les réactions sont de la forme basalte + eau = épidote + quartz + actinote + ions et

correspondent à un départ net de potassium, magnésium et fer (ainsi que des éléments géochimiquement proches) de la roche.

2. Plus près de la surface, directement sous le fumeur noir, d'altération est un peu différente et présente deux composants :

- Une altération qui progresse de faciès à séricite (perte de Na, Mg, Si et Ca) dans les zones les moins affectées, à un faciès à chlorite dans les zones plus altérées (allant jusqu'à des assemblages à Fe-chlorite qui ont perdu la quasi-totalité de Na, Mg et Ca, et une grande partie de leur silice puisqu'une chlorite a moins de 30% de SiO₂, à comparer aux 50% d'un basalte) ;
- Une silicification en place des roches, par remplacement et précipitation de la silice dissoute un peu plus loin (on peut obtenir par endroit des roches qui ont jusqu'à 80% de SiO₂).

Ce système d'altération a une géométrie en cheminée (avec les zones plus altérées, à chlorite, au centre), à l'aplomb des amas sulfurés, et est un très bon indice de terrain de la proximité d'un tel gisement.

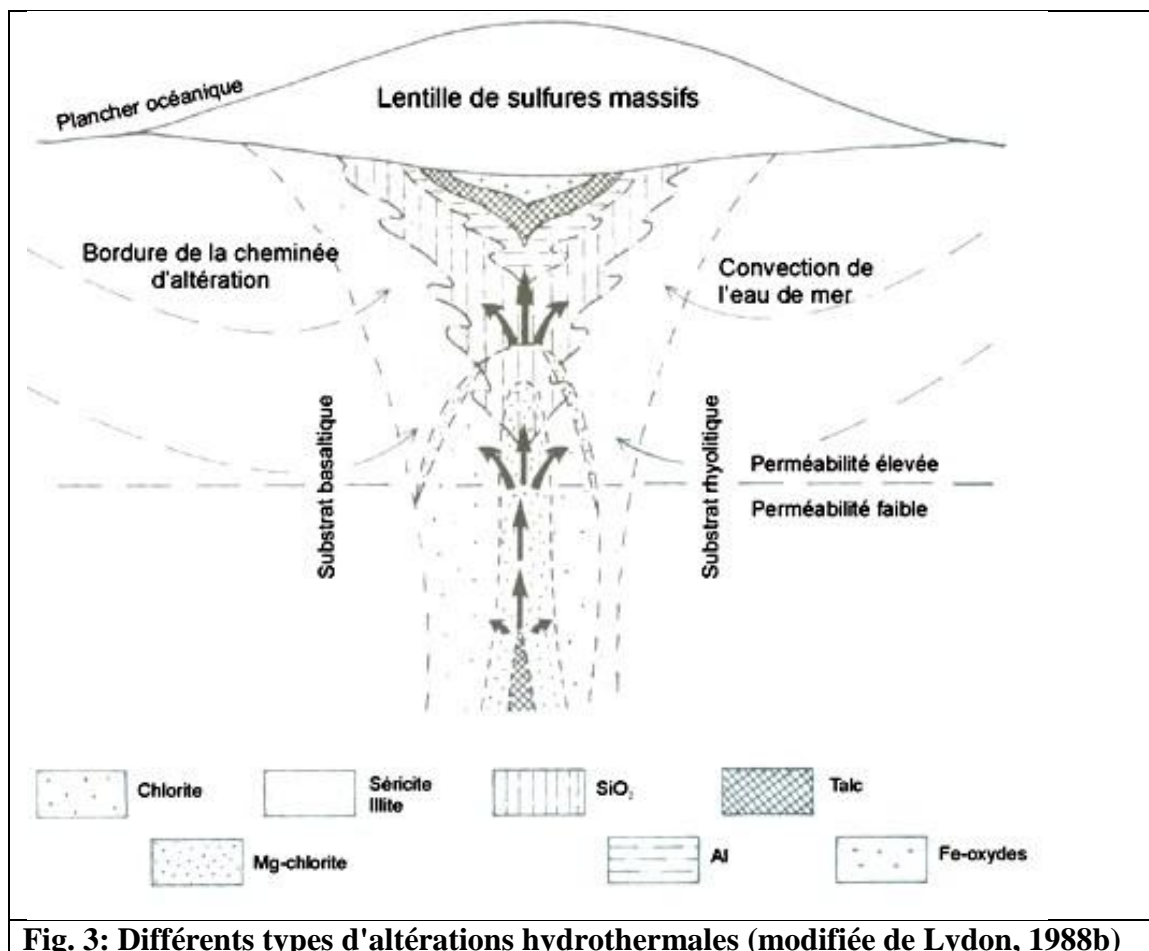


Fig. 3: Différents types d'altérations hydrothermales (modifiée de Lydon, 1988b)

Source du soufre

- La principale source de soufre provient de la réduction des sulfates présents dans l'eau de mer. Ces molécules de SO_4^{2-} s'infiltrent dans les roches encaissantes et procurent le soufre nécessaire à la formation des sulfures lors de la remontée des fluides hydrothermaux.
- Le rapport isotopique $\delta^{34}\text{S}$ (+0 à +20 ‰) présent dans les sulfures témoigne de l'origine de l'eau de mer où l'enrichissement en isotopes lourds du soufre est faible (Jébrak et Marcoux, 2008).

Sources des métaux

- L'apport des métaux est fait essentiellement par des fluides magmatiques qui viennent se mélanger aux fluides de l'eau de mer infiltrée (Fig. 4).
- Les métaux proviennent d'une source magmatique située à une profondeur relativement faible, soit moins d'un kilomètre (Jébrak et Marcoux, 2008).
- Cette source thermique peut être un pluton ou une intrusion felsique, un sill volcanique, une chambre magmatique ou encore par la présence d'un point chaud (Lydon, 1988b).
- Il s'agit généralement d'une concentration en ppm pour des métaux tels que le fer, le zinc, le cuivre ou encore le manganèse.
- Afin que les dépôts de VMS puissent être d'un intérêt économique, 1% d'apport de fluides magmatiques au mélange est suffisant, pour 99% des fluides provenant de l'eau de mer (Jébrak et Marcoux, 2008).
- La circulation à travers les roches encaissantes cause également un enrichissement en métaux des fluides. C'est pourquoi les zones d'altération sont généralement pauvres en métaux.

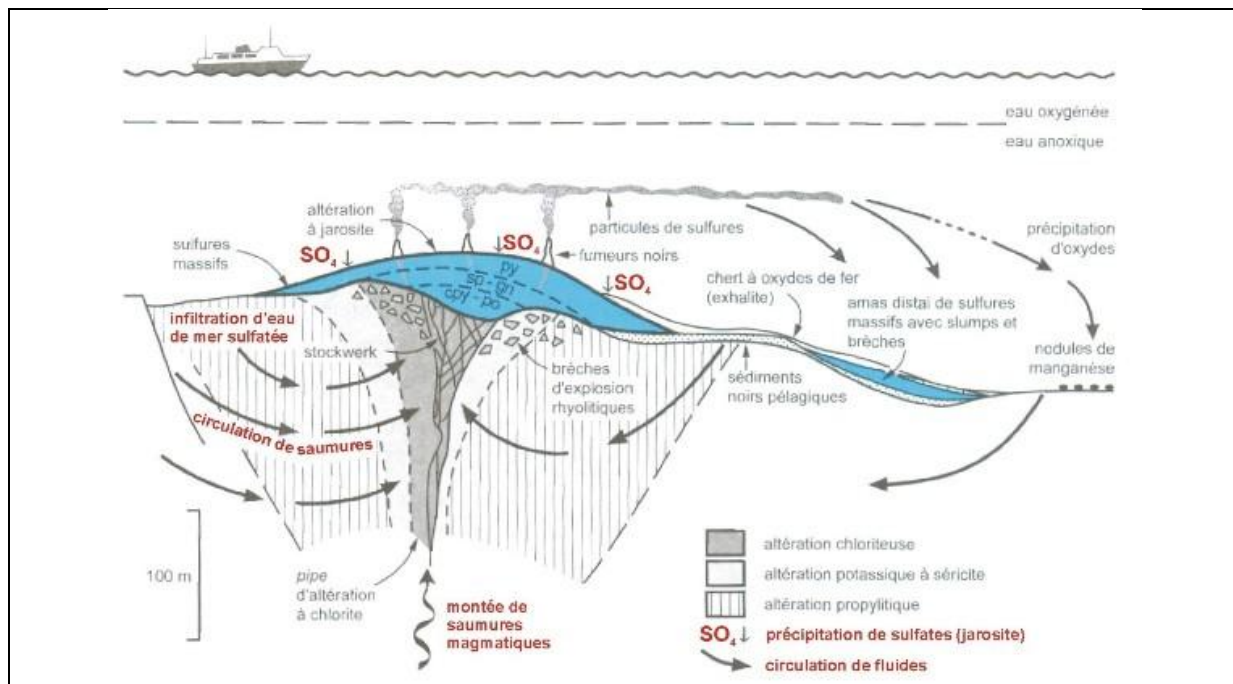


Fig. 4: Schéma illustrant les différentes sources des fluides hydrothermaux (tirée de Jébrak et Marcoux, 2008)

Exploration

- L'exploration minérale pour les sulfures massifs volcanogènes peut être faite avec différentes techniques.
- Généralement, on retrouve des levés géophysiques (gravimétrique, électrique et électromagnétique) et des levés géochimiques (roches et sédiments de ruisseaux).
- La signature géochimique est riche en Fe, S, Cu et Zn et les éléments traceurs peuvent être Au, Ag, Cd, Hg, In, Tl, Sn Pb, As, Sb, Bi, Se et Te.
- Certaines caractéristiques géologiques particulières sont également recherchées lors de l'exploration pour des VMS. Ces caractéristiques sont appelées des métallotectes. En voici quelques-uns :
 - Environnement volcanique sous aquatique ;
 - Présence de failles synvolcaniques ou de brèches;
 - Zone d'altération régionale appauvrie en métaux;
 - Zone d'altération à séricite (altération distale) et à chlorite (altération proximale);
 - Présence d'un stockwerk à veines de chlorite, quartz et sulfures ou encore de séricite, quartz et pyrite avec une présence plus ou moins importante d'alumino-silicates;
 - Horizon d'exhalite : couche de sédiments hydrothermaux d'une composition allant d'un chert à un tuf pyriteux, cette couche peut être présente de quelques mètres à quelques kilomètres de la lentille de sulfures massifs.

Département de Géoressources

Licence de Géosciences Appliquées

COURS DE SUBSTANCES UTILES & MATERIAUX DE CONSTRUCTION

AU: 2019 -2020

SOMMAIRE

CHAP I: ROCHES ET MINÉRAUX INDUSTRIELS

I. Les roches industrielles

I.1. Le sable

1. Définition

2. Géologie

3. Domaines d'utilisation du sable

I.2. Les argiles

L'argile commune

1. Définition

2. Géologie

3. Domaines d'utilisation de l'argile commune

I.3. La dolomie et le calcaire dolomitique

1. Définition

2. Géologie

3. Domaines d'utilisation de la dolomie

I.4. Les calcaires

1. Définition

2. Géologie

3. Les domaines d'utilisation du calcaire

I.5. Les phosphates

1. Définition

2. Géologie

3. Les domaines d'utilisation des phosphates

I.6. Les pierres ornementales

1. Définition

2. Géologie

II. Les minéraux industriels

II.1. Les feldspaths et les feldspathoïdes

1. Définition

2. Géologie

3. Domaines d'utilisations des feldspaths

4. Les principaux sites de pegmatites

II.2. Le talc

1. Définition

2. Géologie

3. Domaines d'utilisations du talc

III. Les matériaux de construction

III. 1. Les granulats (gravier, sable, et roche concassée)

1. Définition

2. Géologie

3. Les domaines d'utilisation des granulats

CHAP. II : EXPLOITATION DE CARRIERES

I- Conditions gisements

II-Exploitation et production

II.1-Extraction de la roche massive

1- Phasage de l'exploitation

- Cas de roches massives
- Cas de roche meuble

II.2-Transformation

- 1- Concassage
- 2- Criblage
- 3- Stockage
- 4- Chargement

Introduction

Quand on parle de richesses minières, on pense habituellement à l'or et aux métaux; rarement les substances utiles sont prises en compte. Pourtant, dans tous les pays du monde, ces substances jouent un rôle très important dans leur développement économique.

La pierre et l'argile, en fait les roches en général, constituent sans aucun doute les plus vieux matériaux de construction qu'ait connus l'Homme, qui les a utilisés dans ses premières habitations.

En effet, sans ces substances il n'y aurait pas de maison pour habiter ni de routes pour circuler, il n'y aurait pas des fertilisants pour l'agriculture, alors qu'on sait qu'une agriculture productive et durable est indispensable au bien-être de tout pays et une pierre angulaire pour son développement. Sans certaines substances utiles, il n'y aurait pas de verre, ni de ciment, etc. Pour ne citer que ces produits et leurs domaines d'utilisation parmi des milliers d'autres.

CHAP I: ROCHES ET MINÉRAUX INDUSTRIELS

I. Les roches industrielles

Ce sont des roches utilisées dans l'industrie après traitement. Ce sont des roches telles que la bauxite, la dolomie, les argiles, le calcaire, le kaolin, le quartz et les quartzites, les grès et les sables de fonderie et de verrerie, etc. ;

I.1. Le sable siliceux à usage industriel

1. Définition

La silice à usage industriel est différente des roches siliceuses meubles ou massives, parfois riches en silice, utilisées comme granulats dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics.

La silice ou dioxyde de silicium, de formule chimique SiO_2 , est présente dans la nature sous forme de quartz ou de calcédoine. Elle est utilisée en raison de sa dureté (7 sur l'échelle de Mohs), de son inertie chimique, de ses propriétés optiques ou piézo-électriques mais surtout de ses propriétés vitrifiantes. C'est la première source naturelle de silicium.

2. Géologie

A. Minéralogie

Sous sa forme naturelle, le dioxyde de silicium a trois expressions minéralogiques principales, chacune ayant une forme cristalline de haute température, dite bêta, dont la symétrie se réduit en donnant une phase alpha de basse température : le quartz, la cristobalite et la tridymite.

L'opale (variété hydratée amorphe) et la calcédoine sont fréquemment associées. La calcédoine est le constituant principal du silex.

B. Gîtologie

Les roches siliceuses pouvant constituer une ressource utilisable dans l'industrie se rencontrent :

-soit dans des gîtes primaires (filons) où la silice a été mise en place à partir de solutions hydrothermales :

Pour présenter un intérêt en tant que ressource en silice, ces filons doivent être "stériles" c'est-à-dire ne présenter ni minéralisation polymétallique associée, ni contamination supergène.

De la même manière, les altérations supergènes, le plus souvent liées aux eaux météoriques doivent être limitées dans la mesure où elles entraînent des dépôts d'oxyde de fer, parfois sur des profondeurs importantes. Dans la plupart des cas, les réserves minières valorisables ne constitueront qu'une partie des réserves disponibles.

La plupart des gisements exploités présentent les caractéristiques suivantes :

- une mise en place dans des roches massives très compétentes, quartzites, gneiss, leptynites ;
- une association fréquente avec des pegmatites, le quartz pur exploitable dans un tel contexte, correspondant le plus souvent aux stades ultimes de la "minéralisation" ;
- une absence de rejeu majeur de l'accident ayant contrôlé la mise en place du filon pour éviter la bréchification et percolation des eaux météoriques.

-Soit dans des gîtes d'altération :

Il s'agit des gisements de kaolin provenant de l'altération in situ des granites, le quartz est alors un sous-produit dont la qualité chimique ne permet le plus souvent qu'une valorisation dans le secteur du bâtiment.

-Soit dans des gîtes détritiques (sables et quartzites) :

La richesse en quartz des roches constitue une véritable concentration résiduelle à l'issue des phases d'altération, de tri et de remobilisation, incluant souvent des processus éoliens.

Les roches massives exploitées pour la silice sont habituellement des grès, des quartzites, ou des filons de quartz.

3. Domaines d'utilisation du sable

La silice à usage industriel est utilisée dans différents domaines à cause de ses propriétés suivantes :

- un caractère réfractaire marqué par une résistance pyroscopique équivalente à 1 500°C au minimum et une température de fusion de 1 600C ;
- une inertie chimique vis-à-vis de la plupart des acides à l'exclusion de l'acide fluorhydrique ;
- un pH neutre ;
- un pouvoir isolant élevé ;
- un coefficient de dilatation thermique très faible ;
- le quartz est également piézo-électrique, c'est-à-dire que, soumis à une contrainte, il présente des charges électriques sur ses faces cristallines. Réciproquement, par l'application d'un courant électrique, on engendre des oscillations de fréquences élevées qui, transformées en courant alternatif, sont mises à profit pour "mesurer le temps".

Les secteurs d'utilisation industriels traditionnels de la silice sont la verrerie, les sables de fonderie, les abrasifs et les produits spéciaux du bâtiment : mortiers, enduits, bétons spéciaux.

Il convient d'ajouter son rôle de matière première pour l'élaboration des silicones ou des puces électroniques.

La silice naturelle utilisée dans l'industrie est représentée par deux catégories de matériaux :

- **les sables siliceux**, roches meubles sédimentaires d'origine détritique dont les grains sont en majorité compris entre 1/16 mm (62,5 µm) et 2 mm. Selon leur degré de pureté chimique et donc le cortège minéralogique accompagnant la silice, on distingue communément :
 - les sables siliceux purs ou extra siliceux ($\text{SiO}_2 > 99\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,02\%$) utilisés pour les usages les plus sophistiqués nécessitant des puretés chimiques élevées, ils sont destinés à la fabrication de verres techniques, de la cristallerie, ou de certains verres plats ;
 - les sables siliceux ($\text{SiO}_2 > 99\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,2\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,02$) qui trouvent des emplois en verre creux, verre plat, en fonderie, en céramique, comme abrasifs et comme charge dans les produits spéciaux du bâtiment ;
 - les sables siliceux maigres (SiO_2 variant de 95 à 97 %), consommés en fonderie pour les verres colorés, la filtration et comme charge dans le domaine du bâtiment ;
 - les sables silico-argileux dont la teneur en silice varie de 75 à 92 % essentiellement utilisés en fonderie, dans le secteur du bâtiment, comme charge dans l'alimentation animale, la filtration.

-les matériaux en blocs ou massifs

- quartz filonien ou pegmatitique qui correspond à de la silice "primaire" déposée par des solutions hydrothermales, il s'agit de matériau naturel plus pur chimiquement jusqu'à 99,9% de SiO_2 (quartz dit ultra pur). Ces matériaux interviennent dans la fabrication des verres techniques mais surtout en électrometallurgie ;
- quartzites qui sont des sables siliceux consolidés, en électrometallurgie et chimie ;

- Galets de quartz rencontrés dans les alluvions, ils constituent la matière première privilégiée de l'électro-metallurgie pour la fabrication notamment du silicium métal;
- Galets de silex récoltés notamment dans les formations littorales destinés aux secteurs de la céramique, du bâtiment et des peintures.

Tableau 1: Principaux domaines d'utilisation de la silice à usage industriel

Spécifications	Utilisations
Composition chimique : $\text{SiO}_2 \geq 98\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 0,5\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,01$ pour le verre blanc et $\leq 0,3$ pour le verre coloré. Pour les verres optiques spéciaux : $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10$ ppm, $\text{TiO}_2, \text{CuO}, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{NiO}, \text{CoO}, \text{MnO} < 10$ ppm ; $\text{Al}_2\text{O}_3 < 200$ ppm.	Verrerie, verre blanc, verre coloré, verres optiques spéciaux,
Granularité : Taille des grains entre 100 – 150 μm et 400 – 600 μm Absence de grains $> 0,85$ mm Coefficient de variation du passant à $D_{50} < 15$ %	
Pureté 2 à 3 % de fines argileuses tolérés ; Granulométrie : refus à 90 μm compris entre 5 et 10 % ; Teneur en silice > 80 %	Bâtiments et produits spéciaux : Fabrication de bétons cellulaires
Composition chimique : Céramique : $\text{SiO}_2 > 97,5$ %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,2$ %, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0,55$ % ; Céramique fine : $\text{SiO}_2 > 99$ %, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,03$ %, $\text{TiO}_2 \leq 0,05$ % ;	céramique, et céramique fine

Source: BRGM, 1998

I.2. Les argiles

Il faudra distinguer ici les argiles communes et le kaolin.

L'argile se compose généralement d'un mélange de différents minéraux et a donc une grande variété de propriétés. Pour cela il est difficile d'établir une définition générale. Il existe des définitions basées sur les aspects suivants:

- La taille des grains,
- Les propriétés,
- L'origine géologique
- Les domaines d'utilisation dans l'industrie.

L'argile est généralement définie comme

- Un matériau ayant une taille de grain $< 2 \mu\text{m}$, ou
- Un minéral ou un mélange de minéraux à grain très fin, terreux qui devient généralement plastique en présence d'eau (certains minéraux argileux ne sont pas plastiques, par exemple le silex argileux).

Les argiles constituent les matières premières minérales de base utilisées pour la fabrication de différents types de produits céramiques et de terre cuite.

Ce sont des roches sédimentaires ou résiduelles à grain très fin, contenant au moins 50% de minéraux argileux, (la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, la beidellite, la vermiculite, le chlorite, la palygorskite la sépiolite, etc.) auxquels peuvent s'ajouter divers autres minéraux. Ce sont des roches tendres rayables à l'ongle, fragiles à l'état sec, faisant pâte avec de l'eau, et durcissant à la cuisson.

on trouve :

- L'argile commune qui sert à la fabrication des produits de terre cuite tels que les tuiles et les briques et la poterie.
- Les kaolins ou argiles kaoliniques qui servent à la fabrication de différents types de produits céramiques tels les produits réfractaires, les céramiques sanitaires, les carreaux de revêtement de sols et de murs, la vaisselle (porcelaine, faïence).

L'argile commune

1. Définition

L'argile commune ou argile pour briques cuites, tuiles et adobe est formée à partir de mélanges d'une large gamme de minéraux argileux et d'autres minéraux en fonction de leur genèse. Elle est plus ou moins plastique proportionnellement à la teneur en minéraux argileux.

Le mot adobe est utilisé pour décrire divers matériaux et techniques de construction en terre, se référant généralement à briques d'adobe séchées au soleil.

2. Géologie

A. Minéralogie

Dans l'argile commune, il y a des minéraux argileux comme la kaolinite, et l'illite, ainsi que des minéraux non argileux comme le quartz et bien d'autres.

B. Gîtologie

Types génétiques des gisements

Argiles pour brique et les limons peuvent être formés soit de façon autochtone ou le plus souvent allochtone.

- **Les gisements autochtones ou primaires**

Les gisements résiduels se forment grâce au processus d'altération superficielle, hydrothermale des différentes roches au cours desquels il y a la modification et la dissolution ou la séparation des composants originaux à gros grains.

- **Les gisements allochtones ou secondaires**

Les gisements sédimentaires d'argile et de limon se forment grâce au transport et dépôt des gisements primaires par l'eau, le vent ou les glaciers. On en trouve d'origine lacustre, fluviale, marin, éolien et dans des moraines).

1.3. Domaines d'utilisation de l'argile commune

Les argiles pour briques sont utilisées pour la **production des briques cuites** creuses ou pleines, **des briques de parement, des tuyaux de drainage, de gouttières** etc. Ces argiles peuvent être **utilisées dans le clinker**. Les meilleures argiles peuvent être utilisées **dans la poterie**.

NB : les argiles ont subi trois (3) sortes de traitements :

- Les essais dits physiques consistent à rechercher les propriétés physiques de l'argile :
 - Le taux de récupération de matériaux argileux ;
 - Le taux de contraction de la briquelette du matériau argileux après séchage à 110°C, ce qui détermine sa plasticité;
 - La couleur du tesson après une cuisson à 1200°C, ce qui détermine le teneur en oxydes colorants.
- Les analyses chimiques qui déterminent la teneur en différents oxydes ;
- Les analyses minéralogiques pour déterminer les minéraux majeurs, mineurs ou de trace.
- Il convient de préciser que tous les échantillons d'argile récoltés dans plus de 200 sites ont subi les essais physiques. Seuls quelques-uns ont subi les analyses chimiques et minéralogiques.

1.3. La dolomie et le calcaire dolomitique

Outre les dolomies, prendre en compte les calcaires et les calcaires dolomitiques. Il y a également les phosphates dont il faudra faire mention

1. Définition

La dolomie est une roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50% de carbonate, dont la moitié est sous forme de dolomite (Ca, Mg) (CO₃)₂. Tous les intermédiaires existent entre les calcaires et les dolomies (calcaire dolomitique ou dolomie calcareuse) d'une part et les roches détritiques d'autre part.

2. Géologie

A. Minéralogie,

Les dolomies se rencontrent dans de formations carbonatées.

Les dolomies, de formule chimique théorique $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$ sont constituées du minéral dolomite, de même formule chimique.

- $\text{CaO} = 30,4 \%$;
- $\text{MgO} = 21,9 \%$;
- $\text{CO}_2 (= \text{LOI}) = 47,7 \%$.

Ou, si on ne tient pas compte de la perte au feu (LOI)

- $\text{CaCO}_3 = 54,28 \%$;
- $\text{MgCO}_3 = 45,72 \%$.

Les dolomies pures sont rares, elles contiennent toujours de la calcite ou des éléments détritiques, de la matière organique, des oxydes, etc.

Il existe donc tous les stades entre la dolomie pure et le calcaire pur : dolomies calcareuses, calcaires dolomitiques, et d'autres termes associés à la dolomie comme :

- **dolomie hautement magnésienne** qui généralement contient $> 20\% \text{ MgO}$ ou $> 42\% \text{ MgCO}_3$;
- **dolomie "hautement pure"** qui :
 - contient $> 20 \%$ MgO ou $> 90 \%$ de MgCO_3 combiné au CaCO_3 ;
 - contient au moins 40% de MgCO_3 et pas plus de 2% de SiO_2 .
- **calcaire magnésien** :
 - un calcaire contenant une quantité appréciable de magnésium, au moins 90 M.-% de calcite (CaCO_3) et pas plus de 10 M.-% dolomite ;
 - contenant 10 à 23 M.-% de MgCO_3
- **etc.**

B. Gîtologie

Les roches dolomitiques ont principalement deux origines, auxquelles sont liés des types de gisements différents :

-dolomies primaires, résultant d'une précipitation chimique de dolomite en milieu lagunaire ou marin très peu profond à tendance évaporitique ;

-dolomies secondaires de diagenèse, résultant d'une épigénisation plus ou moins complète dans des calcaires de la calcite par la dolomite, avec remplacement de Ca^{2+} par Mg^{2+}

Les dolomies secondaires sont beaucoup plus répandues. Elles ont été formées par substitution plus ou moins poussée d'ions Ca^{2+} par des ions Mg^{2+} lors de l'apport de solutions magnésiennes dans les roches calcaires. Cette dolomitisation peut intervenir de façon précoce et rapide dans des calcaires fins ou dans des formations récifales récente, en milieu de plateforme marine peu profonde ou de lagune, sous climat chaud.

Les dolomies secondaires sont cependant mieux cristallisées et plus pures que les dolomies primaires. Ce sont des roches généralement dures et compactes (densité 2,75 à 2,95), qui par altération météorique deviennent friables (sables dolomitiques).

Les carbonates peuvent par ailleurs subir plusieurs phases de dolomitisation et de dédolomitisation successives, qui rendent la roche homogène.

3. Domaines d'utilisation de la dolomie

La dolomie est généralement utilisée à l'état cru ou cuit dans de nombreuses branches de l'industrie ainsi que dans le domaine agricole.

A. Fabrication du verre

La dolomie apporte le MgO entrant dans la composition du verre. De plus elle abaisse la température de fusion et apporte certaines qualités au verre (résistance aux acides et bases, dureté, etc.).

Les dolomies utilisées dans l'industrie du verre doivent avoir des spécifications strictes en ce qui concerne les composants infusibles et les éléments colorants.

Leur teneur en ces éléments à 1300 °C (grenat, sillimanite, disthène, andalousite, staurotide, tourmaline, zircon, rutile) doit être au maximum de :

- 0,30 % pour une taille < 0,4 mm
- 0,05 % pour une taille < 0,1 mm

La teneur en éléments colorants (Fe surtout, Cr, Mn, V, Co, Cu) doit être < 0,04 % pour les verres très blancs, < 0,1 % pour verres blancs.

B. Agriculture et alimentation animale

Utilisation comme amendement, pour la nourriture animale et en sucrerie (précipitation des impuretés).

Les dolomies crues ou calcinées entrant dans la composition des amendements simples ou composés sont employées selon quatre catégories de granulométrie :

- concassé > 5 mm ;
- broyé 80 % < 5 mm ;
- pulvérisé 99 % < 1 mm, 80 % < 315 μm ;
- granulé (pulvérisé aggloméré)

Teneur en	MgO	MgO + CaO	
	17 %	40 %	dolomies
	16 %	70 %	chaux magnésienne vive
	12 %	50 %	chaux magnésienne éteinte

La valeur neutralisante de l'acidité des sols est proportionnelle aux teneurs en MgO et CaO, tandis que la rapidité de l'action des amendements est liée en grande partie à la granulométrie des produits.

Les produits magnésiens qui entrent dans la composition des aliments pour animaux ne doivent pas contenir d'éléments toxiques (Pb, Cu, Co, Sr, Cd...) et doivent être suffisamment fins (<100 μm).

La dolomie subit un broyage fin (<100 μm) pour être incorporé aux aliments, tandis que celle destinée à l'agriculture est livrée avec une granulométrie variable (5 mm à moins de 315 μm) selon la qualité du produit.

C. Environnement

Clarification des eaux et désulfuration des fumées d'usine.

La dolomie en lits filtrants servant à l'épuration des eaux usées doit avoir une granulométrie <100 μm , et les chaux dolomitiques utilisées pour le traitement des rejets de l'industrie textile ou pour éliminer les métaux lourds, doivent être exemptes de ces métaux et de SiO₂.

D. Bâtiments et les travaux publics

Les dolomies blanches utilisées pour la fabrication des agrégats, de terrazzo¹ et granito et de bordures réfléchissantes doivent posséder une bonne résistance à l'écrasement et aux chocs.

Les chaux dolomitiques pour enduit ou crépis doivent former une poudre homogène, exempte de surcuits qui s'hydratent et provoquent des fissures.

Dans les travaux routiers, les fillers dolomitiques (< 80 µm) sont moins appréciés que les calcitiques, et les granulats doivent posséder une bonne résistance mécanique aux chocs (Los Angeles 30 à 40 au maximum selon l'utilisation).

Les chaux dolomitiques utilisées pour stabiliser les sols argileux doivent posséder une granulométrie de 0-2 mm (90 % < 200µm, 50 % < 80 µm pour la chaux vive) afin d'avoir une action rapide.

De plus, la dolomie calcinée ou frittée entre dans la fabrication des réfractaires magnésiens pour les fours d'aciérie et de fonderie. Elle permet aussi d'obtenir de la magnésie à partir d'eau de mer ainsi que du magnésium.

Tableau 2: Principaux domaines d'utilisation de la dolomie

Dolomie	Caractéristiques	Utilisations
Dolomie	Dolomies blanches ou colorées possédant une bonne résistance mécanique aux chocs	Des agrégats, de terrazzo et de bordures réfléchissantes
	Teneur en colorants : (Fe surtout, Cr, Mn, V, Co, Cu) < 0,04 % pour les verres très blancs, < 0,1 % pour verres blancs	Fabrication du verre
	Tout dernièrement au Burkina il a été adopté de mélanger le clinker avec de la poudre de dolomie	Cimenterie
Chaux	former une poudre homogène, exempte de surcuits qui s'hydratent et provoquent des fissures	Enduit ou crépis

¹ Terrazzo est un mot italien qui désigne un ensemble de granulats de roches tendres, qui, mélangé avec du ciment, sert à couvrir les sols et les murs d'habitations.

Dolomie	Caractéristiques	Utilisations
dolomitique	Granulométrie 0 – 2 mm (90% < 200 µm, 50% < 80 µm pour la chaux vive) (stabilisation des sols)	Stabiliser les sols argileux
	Chaux éteinte	Industrie sucrière
	Exemptes de métaux lourds et de SiO ₂	traitement des rejets de l'industrie textile -élimination les métaux lourds
Dolomie	granulométrie variable (5 mm à moins de 315 µm) selon la qualité du produit	amendement des sols
	Ne pas contenir d'éléments toxiques (Pb, Cu, Co, Sr, Cd...) et être suffisamment fins (<100 µm)	nourriture animale
	Granulométrie <100 µm	Clarification des eaux
	Granulométrie <100 µm	désulfuration des fumées d'usine

Source: J.F. Pasquet/BRGM, 1996

I.4. Les calcaires

1. Définition

Le calcaire est une roche carbonatée contenant au moins 50% de calcite CaCO₃, pouvant être accompagnée d'un peu de dolomite, d'aragonite, de sidérite.

2. Géologie

A. Minéralogie

Le minéral le plus répandu du calcaire est la calcite (qui cristallise dans le système rhomboédrique). L'aragonite (orthorhombique) est plus rare (géologiquement moins stable).

La calcite se casse facilement selon les plans de clivages. La dureté de la calcite est de 3 dans l'échelle de Mohs, contre 3,5 pour l'aragonite, et 3,5 à 4 pour la dolomie.

B. Gîtologie

Les calcaires et les craies sont des roches sédimentaires déposées essentiellement en milieu subaquatique, marin ou lacustre.

- Les calcaires et les craies

Il existe de nombreuses variétés de roches calcaires dont les différences sont liées à l'âge et au milieu de dépôt ainsi qu'aux transformations physico-chimiques (diagenèse, métamorphisme) qu'elles ont subies. Ces facteurs ont des répercussions sur les possibles utilisations industrielles des calcaires.

Parmi les roches contenant plus de 50% de CaCO_3 , (calcaires au sens large), on distingue, selon l'origine :

-Les calcaires organiques qui résultent de l'activité d'organismes vivants. Ce sont d'une part les calcaires construits ou récifaux, formés par l'accumulation des coraux, de rudistes, de bryozoaires ou d'algues, et d'autres part les calcaires bioclastiques, résultant de l'accumulation de débris organiques carbonatés : coquilles de lamellibranches, de gastéropodes, ou de brachiopodes etc.

- La craie résulte pour sa part de l'amoncellement dans des mers peu profondes de microorganismes (10à 20 μm) à test calcaire, les coccolithes.

-Les calcaires d'origine bio ou physico-chimique, qui sont formés par précipitation du carbonate de calcium en solution dans l'eau. Il s'agit essentiellement de calcaires oolithiques et pisolithiques, constitués par l'accumulation de petites sphères de taille inférieure à 200 μm (oolithes) ou supérieure (pisolithes), ainsi que des concrétions de sources chaudes (tufs et travertins) ou de grottes (stalactites et stalagmites)

-Les calcaires d'origine détritiques, qui résultent de la cimentation des débris provenant de l'altération d'autres roches carbonatées : brèches des pentes, galets, graviers, sables calcaires.

- Les marbres

Le marbre provient du métamorphisme d'un calcaire, à pression et température élevées. La calcite recristallise à partir des éléments originels : sa couleur et sa texture dépendent donc en grande partie des caractéristiques de la roche d'origine.

3. Les domaines d'utilisation du calcaire

Tableau 3: Différents domaines d'utilisation de calcaire blanc pour charges

Propriétés	Domaines d'utilisation
<p>Chimisme : CaCO_3 : >98%, Al_2O_3 : <0,2%, SiO_2 : <0,5%, oxydes : <0,2%</p> <p>Pour charge :</p> <ul style="list-style-type: none"> - blancheur : 85 à 96% - indice jaune : 1,5 à 4,5 - granulométrie moyenne: 1,4 μm <p>pour couchage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - blancheur : 88 à 96% - Indice jaune : 1,5 à 3 - granulométrie moyenne : 0,7 μm - surface spécifique : 10m²/g 	<p>Les papiers</p>

Propriétés	Domaines d'utilisation
Abrasivité : 4 mg	
<p>PVC</p> <p>-blancheur (sur produit sec) 85 à 90%, Indice jaune : 1,5 à 4,5 -granulométrie moyenne : 2 à 6 µm ; Prise d'huile : 14 à 18g/100g de poudre, Prise de dioctylphthalate (D.O.P.) : 17 à 25 g/100 g de poudre Forme des particules : aciculaire ou aplatie</p> <p>Thermoplastiques</p> <p>-blancheur : 93 à 96 %, - indice jaune : 1,5 à 4,5 -granulométrie moyenne : 0,7 µm</p>	Plastiques et caoutchoucs
<p>Blancheur : 85 à 95 %, Indice jaune : 1,5 à 4,5, granulométrie moyenne : 2 à 6 µm Prise d'huile : 14 à 18g/100g de poudre, Prise de (D.O.P.) : 17 à 25 g/100 g de poudre</p>	Peintures
<p>Mastics :</p> <p>-granulométrie moyenne : 5 à 7 µm - Blancheur : 85 à 90% - prise d'huile : 14g/100g de poudre, Prise de D.O.P. : 17g/100g de poudre</p>	Mastics, enduits et les adhésifs
<p>Pharmacie</p> <p>-poudre blanche incolore, inodore pratiquement insoluble dans l'eau -teneur en CaCO₃ : ≥ 98,5%, -insolubles dans l'acide acétique : ≤ 0,20%, -chlorures : ≤ 330 ppm, -sulfates : ≤ 2 500 ppm,</p>	

Propriétés	Domaines d'utilisation
-arsenic : ≤ 4 ppm, -baryum : ≤ 200 ppm, -fer : ≤ 200 ppm, -magnésium et métaux alcalins : $\leq 1,5$ %, -métaux lourds : ≤ 20 ppm, -perte à 105°C : $\leq 2,0$ % Granulométrie : 0,5 à 2 μm	Pharmacie et cosmétiques
Granulométrie : 20 à 45 μm	Moquettes

Source: J.F. Pasquet/BRGM, 1996

Tableau 4: Calcaire pour ciment

Propriétés	Domaine d'utilisation
-Chimisme : $\text{CaO} \geq 45\%$, $\text{MgO} < 2\%$ -Moins de grains de silice grossier et arrondis pour faciliter la broyabilité -Réserves pour une production d'au moins 20 ans.	Production de ciment

Source : C. H. Spencer 1990

Tableau 5: Domaines d'utilisation des calcaires, craies, marbres à usage industriel et agricole

Caractéristiques	Domaines d'utilisation
Castines : -granulométrie : 40 à 100 mm (haut-fourneau). < 5 mm pour l'agglomération, 5 à 100 mm pour les fours d'aciérie. -résistance à la compression $> 400\text{kg/cm}_2$ -Teneur en CaO : $> 85\%$ Chaux :	Sidérurgie, fonderie

Caractéristiques	Domaines d'utilisation
-Granulométrie régulière 6-20 mm ou poudre < 500 μ -grande porosité et surface interne -teneur en CaO > 93% , MgO : 1 – 3 % , SiO ₂ 1 – 3 % , Al ₂ O ₃ :1 – 3 % , S: 0,05-0,1 % ,CO ₂ : 1-5%	
Chaux, carbonate de soude	Métaux non ferreux
Teneurs en CaCO ₃ : > 90%, MgCO ₃ : < 2%, SiO ₂ : < 3%. Granulométrie de castines : entre 30 et 250 mm, Chaux.	Industries chimiques
Chaux : Teneur en CaO : > 92%, MgO < 1,75 % , SiO ₂ < 2%, Fe ₂ O ₃ et Al ₂ O ₃ < 0,5%, S < 0,2%, Granulométrie identique à celle du coke	Carbonate de sodium Na ₂ CO ₃
Chaux	Carbure de calcium CaC ₂
Lait de chaux CaO > 90%, Fe ₂ O ₃ < 0,3%, MgO et SiO ₂ < 0,5% Granulométrie fine et grande réactivité	Hypochlorite de calcium (Ca (ClO) ₂)
Chaux, CaO > 97% SiO ₂ . oxydes métalliques (Fe ₂ O ₃ , Mn ₃ O ₄) : ϵ	Carbonate de calcium précipité (CCP)
Chaux, CaO > 97%, SiO ₂ < 0,3%	Produits organiques de synthèse
calcaire: granulométrie : 0,1 à 0,5 mm absence de minéraux infusibles à 1400°C ou fortement colorés composition moyenne : CaO :54,7%, CO ₂ :43,8%, MgO :0,6%, SiO ₂ : 0,7%, Al ₂ O ₃ :0,1%, Fe ₂ O ₃ : 0,075%, Mn ₂ O ₃ :0,001%. Chaux : mêmes caractéristiques que l'industrie chimique. Carbonate de soude : Pureté : 95% Granulométrie : < 1 mm	Industrie du verre

Caractéristiques	Domaines d'utilisation
<p>Chaux,</p> <p>CaO : 90%, ou CaO + MgO 93%</p> <p>En général il faut : MgO <1,5%, S < 0,1%, SiO₂ : ε</p>	<p>Environnement, dépollution</p>
<p>Calcaire en poudre et chaux</p> <p>-Sucreries, alimentation : calcaires très purs sans : Pb, Cu, Co, Sr, Cd...</p> <p>Granulométrie : 100 μm ou de 0,1 à 0,5 mm.</p> <p>-agriculture</p> <p>Granulométrie des calcaires :</p> <p>Concassé brut > 5 mm</p> <p>Broyé 80% < 5 mm</p> <p>Pulvérisé 80% < 315 μ</p> <p>Granulé : pulvérisé aggloméré</p> <p>Rapidité d'action déterminée par la solubilité carbonique.</p> <p>Teneur CaO (+ MgO) de 25 à 45% (marnes) ; 45 à 55% (calcaires); 45 à 55% (craie) ; 42,5% (maërl²) ; 70% (chaux vive) ; 50% (chaux éteinte).</p> <p>La chaux pour sulfatage :</p> <p>-Chaux 'en roche' : CaO > 90%, SiO₂ + Al₂O₃ < 4%</p> <p>-chaux 'en fleur' : Ca(OH)₂ > 90%, SiO₂ + Al₂O₃ < 3%, granulométrie : 100% < 800 μ, 95 % < 125 μ.</p>	<p>Agriculture et agro-alimentaire</p>
Chaux	Tanneries et mégisserie
Chaux, poudre calcaire	Sucrerie, gélatine, confiserie, boulangerie
Poudre de calcaire	Alimentation animale

Source: P. Marteau, 1988

- Définition des produits utilisés

² Le maërl est un sable calcaire marin, d'origine algaire et bioclastique.

Castines : éléments de calcaires crus concassés, puis broyés après criblage à des tailles diverses (- 5 à 100 mm) selon les utilisations (sidérurgie, verrerie).

Pierre à chaux : castines destinées à la calcination, de granulométrie compatible avec les différents types de four.

Poudres : granulats finement broyés utilisés en amendement, dans l'alimentation animale, etc...

Charges : poudres très fines obtenues par micronisation de calcaires blancs et purs dans des broyeurs sécheurs. Elles entrent comme constituant minéral principal dans certains produits (peintures, plastiques, papier...) où le liant est organique. Elles servent de support sans modifier les qualités, et même augmentent dans certains cas la résistance de matériaux, tout en abaissant leur prix de revient.

Filler : poudre à 96-97% CaCO_3 entrant dans la composition des enrobés routiers bitumineux et dans les revêtements étanches.

Chaux : la chaux peut être définie comme formant toutes les variétés de l'oxyde de calcium CaO (chaux vive) et de sa forme hydratée Ca(OH)_2 (chaux éteinte).

I.5. Les phosphates

1. Définition

Les phosphates sont des minéraux caractérisés par le radical $(\text{PO}_4)^{3-}$. C'est une roche sédimentaire contenant des minéraux phosphatés sous forme amorphe ou cryptocristalline ou sous forme finement cristalline.

2. Géologie

A. Minéralogie

Parmi les nombreuses espèces de minéraux, il y a :

- L'apatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ (OH, F, Cl) avec souvent le F prédominant (fluorapatite), du système hexagonal, à clivages imparfaits, à éclat vitreux etc...
- La turquoise bleue (Cu,Al) $(\text{PO}_4)_3$
- La vivianite bleue (Fe)
- La monazite (Ce, La,Th)
- Francolite (Ca, Na,Mg)
- Etc...

B. Gîtologie

Les phosphates dérivent de l'apatite des roches magmatiques mise en solution dans la mer et fixée par les végétaux et des animaux (os, déchets, dents, etc..).

Il y a cinq principaux types de gisements de phosphates exploités dans le monde :

- Les gisements marins ;
- Les gisements issus de roches ignées ;
- Les gisements métamorphiques ;
- Les gisements biogéniques ;
- Les gisements de phosphates produits d'altération.

Les roches phosphatées marines se forment sur la plateforme continentale, ou à son rebord (entre 50 et 200 m)

Les phosphates se trouvent également dans de nombreuses roches : craie phosphatée (à grains de phosphates), minerai de fer oolithique phosphaté.

Dans les roches phosphatées les phosphates se présentent sous divers aspects :

- Le plus souvent en grains de quelques millimètres, arrondis (pseudo-oolithe), ou non, de teinte brun clair à jaune ;
- En débris épigénisés (os, écaille de poisson, coprolites, etc..) pris dans un ciment ou (gangue) souvent crayeux ou argilocalcaire, lui-même imprégné de phosphates ;
- En plages finement cristallines cimentant des éléments variés ;
- En nodules concrétionnés de 1 à 5 cm, jaunes ou parfois noirs (nodules chargés en matières organiques dans des terrains paléozoïques) souvent remaniés et correspondant alors à des galets regroupés dans certains horizons.

3. Les domaines d'utilisation des phosphates

Le principal domaine d'utilisation des phosphates est l'agriculture.

Tableau 6: Domaine d'utilisation des phosphates

Caractéristiques	Utilisations
Phosphates broyés	Agriculture
Phosphates broyés mélangés au fumier organique	
superphosphates	
Triple superphosphates	
Phosphates mono et di- ammonium	

Source : Peter Van Straaten, 2002

NB : Les superphosphates, les triples superphosphates, et les phosphates mono et di- ammonium sont des phosphates traités chimiquement pour faciliter l'utilisation des phosphates dans l'agriculture.

II.6. Les pierres ornementales

1. Définition

Les pierres dimensionnelles ou pierres de taille ou encore pierres ornementales sont des roches, qui découpées en blocs ou en panneaux plus ou moins épais, polies ou pas, servent dans l'industrie de construction.

Ces roches proviennent de diverses origines : magmatique, métamorphique et sédimentaire. Elles peuvent être acides, basiques ou ultrabasiques.

A. Terminologie

Le terme **Pierre** est souvent confondu avec **roche** qui, en géologie, est n'importe quel agrégat de minéraux naturels constituant la partie essentielle de l'écorce terrestre.

En mécanique des roches, le terme **roche** décrit tout matériel de la croûte terrestre solide et consolidé qui ne peut être désagrégé par remaniement mécanique de faible intensité ou excavé par des méthodes manuelles seules.

La **roche** devient **Pierre** après son extraction de la carrière. Le terme pierre de taille est appliqué, sur le plan commercial, à tout matériau rocheux extrait d'une carrière et susceptible d'être taillé et poli pour être utilisée dans l'industrie de construction.

Les pierres dites dimensionnelles ou de taille sont des pierres de construction qui ne prennent pas de poli et qui sont utilisées pour leurs aspects décoratifs. Elles sont utilisées comme pierres massives de construction, découpées (taillées) à dimensions (« dimension stones » en anglais ou pierres de taille »).

Quand elles peuvent être utilisées comme pierres de revêtement en dalles lorsque leurs résistances mécaniques aux attaches le permettent, elles sont dites « pierres ornementales ».

2. Géologie

A. Gîtologie

Les gisements de pierres ornementales sont généralement de quatre (4) types différents, liés à l'origine géologique de la roche. Au Burkina, peuvent être aussi utilisées comme pierres de taille les latérites qui sont d'origine pédogénétique.

- roches sédimentaires ;
- roches magmatiques ;
- roches métamorphiques ;
- roches latéritiques.

- Les roches sédimentaires

Ce sont, entre autres, des formations calcaires ou gréseuses qui se sont déposées dans des bassins sédimentaires.

Ces bassins couvrent toutes les ères géologiques et les dépôts ont une caractéristique constante qui est la formation de bancs stratiformes d'épaisseur métrique sur des surfaces pouvant dépasser les 100 Km².

Cette caractéristique géométrique présente un grand intérêt pour l'exploitation d'un gisement de ce type. Un banc déterminé présente une homogénéité latérale très grande permettant de commercialiser un produit aux propriétés constantes. De plus, un front de taille recoupe plusieurs bancs de faciès différents, ce qui élargit la "gamme" des pierres commercialisables.

Autre avantage, l'extraction de couches dont l'épaisseur est voisine du mètre est techniquement facile, permettant la découpe de blocs marchands directement sur le banc.

- Les roches magmatiques

Ce sont en général des granites, roches grenues contenant des proportions variables de quartz (silice), des feldspaths calciques (plagioclases), de feldspaths potassiques (orthose) et de minéraux accessoires : biotite, muscovite, cordiérite...

Les intrusions granitiques ont en général la forme de dômes massifs ou batholites parfois recoupées par des filons de roche de nature différente (dyke).

Des roches basiques et ultrabasiques ainsi que des laves peuvent aussi être exploitées comme pierres ornementales.

La fracturation et l'altération peuvent fortement modifier un gisement en surface en le transformant en un chaos de blocs arrondis ou anguleux. L'extraction dans ce type de gisement est différente de celle d'un batholite massif peu fracturé.

L'homogénéité de teinte et de texture du granite est également recherchée, l'exploitant cherchant à localiser dans sa carrière les différents faciès de roche.

- Les roches métamorphiques

Le processus métamorphique peut modifier fortement la texture d'origine de la roche. L'exemple le plus commun de cette transformation est le marbre au sens géologique strict, c'est-à-dire un calcaire ayant subi un métamorphisme qui a amené une recristallisation plus ou moins complète de la calcite. D'autres roches métamorphiques comme les quartzites, les amphibolites, etc. peuvent aussi être utilisés.

II. Les minéraux industriels

II.1. Les feldspaths et les feldspathoïdes

1. Définition

Les feldspaths sont des minéraux formés de silice et d'alumine combinées en proportion variable avec du potassium, du sodium et du calcium. Ils sont du système monoclinique ou triclinique.

Les feldspaths forment un ensemble de minéraux majeurs qui entrent dans la composition de la plupart des roches magmatiques et de certaines roches métamorphiques.

Les feldspathoïdes sont des minéraux des roches éruptives sous-saturées en silice ($\text{SiO}_2 < 51\%$) mais très riches en soude et en potasse.

2. Géologie

A. Minéralogie

Les feldspaths se présentent en plaquettes ou en cristaux prismatiques de couleur très variable : transparente ou blanchâtre, grisâtre, rosâtre, rougeâtre, etc. ils montrent deux clivages et fréquemment des macles simples et multiples. Dans de nombreux cas, une zonation apparaît.

Leur classification et leur nomenclature sont liées aux compositions chimiques et aux arrangements des réseaux cristallins.

Les principales espèces minérales sont :

-Les feldspaths potassiques : orthose et microcline, sanidine (KAlSi_3O_8) avec parfois une très faible teneur en Na ;

-Les feldspaths sodi-potassiques: anorthose ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ;

-Les feldspaths sodi-calciques ou plagioclases qui constituent une série de six minéraux continus entre le pôle sodique de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et le pôle calcique de l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Les différents feldspathoïdes sont souvent difficiles à distinguer. Les plus fréquents sont :

- la néphéline, minéral des roches sodiques, $\text{Na}_3\text{K}(\text{SiAlO}_4)$, qui se trouve principalement dans les roches magmatiques grenues de type syénite (syénite néphélinique) ou des roches volcaniques de type phonolite ;
- la leucite K (Si_2AlO_6) qui est présente seulement dans les laves riches en potassium (phonolite, téphrite).

B. Gîtologie

Les roches éruptives susceptibles de constituer une source de feldspath pour l'industrie sont les suivantes :

- les roches leucocrates de la famille des granites : les leucogranites alcalins, les pegmatites, les aplites, les rhyolites... ;
- les roches sous-saturées en silice riches en alcalin : syénite néphélinique, phonolite ;
- les roches issues de transformations deutériques ou hydrothermales, roches "feldspathisées" telles que l'albitite, l'épisyénite.

Les roches granitiques leucocrates constituent deux types de gisements distincts :

- Des massifs de granite à muscovite, le plus souvent associés aux grands massifs granitiques communs à biotite ;
- Des lentilles ou des filons de pegmatite ou aplitite.

Ces roches sont constituées par un assemblage de quartz et de feldspaths alcalins (albite, microcline, orthose) fréquemment accompagnés par des micas alumineux (biotite, lépidolite...). La teneur en fer de ces minéraux est généralement faible, celui-ci étant contenu dans divers minéraux accessoires : tourmaline, grenat, biotite...

Les pegmatites peuvent constituer des amas atteignant plusieurs kilomètres de long sur plusieurs centaines de mètres de large. Elles sont associées à la mise en place de granitoïdes ou de migmatite. Elles sont zonées avec une différenciation dans la texture et la composition minéralogique du cœur vers la périphérie.

-L'aplitite présente les mêmes modes de gisement que les pegmatites, formant souvent des filons recoupant les autres formations.

3. Domaines d'utilisations des feldspaths

Les feldspaths alcalins, potassiques et sodiques ou plus rarement le mélange des deux, sont en général utilisés par l'industrie selon des préférences reposant principalement sur des critères économiques.

Les feldspaths alcalins et la syénite néphélinique sont utilisés principalement et concurremment dans les **industries du verre et de la céramique**. Ces deux domaines se partagent plus de 95% de l'utilisation des feldspaths.

Tableau 7: Principaux domaines d'utilisation des feldspaths

Feldspath	Chimisme (%)	Utilisations
Feldspath sodique	Na ₂ O (8-10)	Fondant en verrerie (influence du Fe ₂ O ₃ sur la coloration) et en céramique
Feldspath potassique	K ₂ O (8-9) Na ₂ O (2-3)	Emaillerie, électro-porcelainerie (isolateurs électriques ordinaires)

	K ₂ O (10-12) Na ₂ O (<2)	Porcelainerie, céramique ; isolateurs électriques spéciaux. Grès sanitaire
Feldspath sodi-potassique	K ₂ O (4 – 5) Na ₂ O (4 – 5) Al ₂ O ₃ (15 – 20)	Verrerie et céramique

Source : B.E. Odent, 1994

4. Les principaux sites de pegmatites

Les feldspaths utilisables se trouvent dans des pegmatites, une formation géologique qu'on trouve presque partout dans la partie Protérozoïque et hercynienne du pays. Mais, les sites de feldspaths les plus importants se trouvent principalement dans l'Atlas du Marrakech (pegmatite d'Azegour), dans le domaine mésitien: pegmatite de Sidi Bouatmane (Jbilet central), pegmatite d'Oulmes et d'Aaoum (Maroc central) ainsi que le domaine anti-atlasique (pegmatite d'Ighrem, pegmatite d'Imiter,...).

Dans les zones occupées par des granites leucocrates à biotite, de granites à biotite et amphibole, il y a importantes formations de pegmatites et d'aplites à muscovite et biotite qui accompagnent ces granites. Les pegmatites se présentent sous forme de filons plus ou moins épais, et sous forme de monticules de dimensions variables.

II.2. Le talc

1. Définition

Le talc est un silicate de magnésium hydraté de formule chimique $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, et la pyrophyllite, un silicate d'aluminium hydraté de formule $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$. Ce sont des minéraux phylliteux aux propriétés voisines, que l'on trouve dans des gisements en contexte métamorphique.

Ils sont rarement purs et forment avec d'autres minéraux (chlorite, antophyllite, trémolite, actinote, du groupe de talc, ainsi que de la dolomite, calcite, quartz, etc.) des roches très hétérogènes dont les appellations reflètent la diversité : stéatite, soapstone pour le talc, agalmatolite, pagodite, wonderstone pour la pyrophyllite.

Ils sont utilisés pour leurs propriétés particulières dans l'industrie, l'agro-alimentaire, les engrais, etc.

2. Géologie

A. Minéralogie

Le talc pur est un silicate de magnésium hydraté, de formule $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ contenant :

- 31,7 % MgO ;
- 63,5 % SiO₂ ;
- 4,8 % H₂O.

Sa structure est celle d'un phyllosilicate 2 : 1 trioctaédrique lamellaire, composé d'un feuillet de brucite et de deux feuillets de silice.

Le clivage basal parfait se fait par glissement des feuillets de silice. Ses autres caractéristiques sont :

- densité : 2,8 ;
- dureté : 1 sur l'échelle de MOHS ;
- fusion : 1 490 °C.

B. Géologie

Le talc forme des gisements hétérogènes ; il est souvent mélangé à des minéraux voisins, du groupe du talc (pyrophyllite, serpentine, chlorite, anthophyllite, trémolite, actinote) et à d'autres minéraux (dolomite, pyrite, quartz, calcite, magnésite).

Suivant le degré de pureté, les minerais présentent une coloration variable allant du blanc au noir, en passant par différentes nuances de vert.

Le talc se trouve dans deux principaux types de gisements correspondant à des contextes géologiques différents.

Altération de roches ultrabasiques

Par altération hydrothermale de silicates magnésiens (olivine, diopside, enstatite), les roches ultrabasiques sont transformées en serpentine $[Mg_3O_4(SiO_2)_2(OH)_4]$ qui, par métamorphisme (faciès schistes verts) se transforme partiellement en talc.

Les fortes concentrations se trouvent dans les zones fracturées et broyées où les circulations de fluides hydrothermaux ont été facilitées. Le talc de ce type de gisement est généralement impur.

Métamorphisme de calcaire magnésien

Le talc résulte de l'action d'un métamorphisme thermique faible sur des dolomies ou des calcaires dolomitiques. La silice est soit présente dans les sédiments, soit introduite par des solutions hydrothermales à partir de roches silico-alumineuses diverses (schistes, micaschistes, pegmatites, granites...) dans des zones fortement tectonisées : failles, fractures, chevauchements...

Dans ce cas on observe aussi la présence de chlorite, les impuretés liées aux roches d'origine, carbonatées et siliceuses, mais ces talcs figurent parmi les plus purs et les plus blancs. Quand le métamorphisme a été intense (températures et pressions élevées) avec formation de trémolite, le talc peut essentiellement résulter d'un rétomorphisme tardif.

3. Domaines d'utilisation du talc

Le talc a de multiples utilisations dans un grand nombre d'industries et en agro-alimentaire, en raison de caractéristiques physico-chimiques particulières :

Sa faible dureté : (1 sur l'échelle de Mohs) ;

Sa fluidité et son onctuosité, liées à sa constitution en feuillets ;

Sa faculté d'absorber les graisses liée à son état pulvérulent ;

Son inertie chimique lui permettant d'être insoluble dans les acides et les bases quand il est dans un état de pureté satisfaisante ;

Sa stabilité physique : fusion à 1490°C, absorption indépendante des variations de température, faible conductivité électrique et thermique insolubilité dans l'eau, pouvoir de dispersion dans l'eau et dans l'huile.

Papeterie

Le talc est utilisé pour charger le papier (jusqu'à 20% du poids du papier) de façon à :

- lui donner les qualités indispensables d'impression et d'écriture ;
- diminuer les déformations dues aux variations d'humidité ;
- abaisser le coût du papier

Une partie du talc livré en papeterie est broyée à une grande finesse ; ce talc spécial empêche les résines naturelles du bois de s'agglomérer sous forme de masses poisseuses qui gênent les différents circuits des machines et occasionnent des défauts dans le papier.

Céramique

Les produits dans lesquels le talc trouve son application sont ceux dont la cuisson s'effectue à basse ou moyenne température et dont le tesson est poreux (carreaux de faïence). Les teneurs utilisées sont élevées et atteignent 35%. Les utilisateurs trouvent comme avantages une diminution des déchets, un bon accord de l'émail et du tesson. Le gonflement à l'humidité du tesson est très réduit.

Les pâtes feldspathiques, à tesson fermé, n'admettent que des teneurs relativement faibles de talc (1-5 % dans les pâtes de grès, vitreous, porcelaine).

Peinture

Le talc, ajouté dans une faible proportion à de nombreux types de peintures permet de :

- Modifier les propriétés d'écoulement ;
- Améliorer la résistance aux intempéries et à la corrosion ;
- Renforcer le pouvoir couvrant.

Plastiques – Caoutchoucs

Le talc améliore les propriétés mécaniques et la résistance à la chaleur de certaines matières plastiques donnant en particulier une excellente rigidité à chaud au polypropylène chargé.

Le talc est utilisé en surface dans les caoutchoucs comme anticollant et dans la masse pour améliorer la solidité et l'isolation électrique (câbles).

Alimentation

Le talc, dont l'inocuité a été démontrée par de nombreuses expériences sur les animaux, est utilisé comme anticollant dans l'alimentation humaine (confiserie, riz) et dans l'alimentation du bétail (écoulement, antimottage).

Engrais - Insecticides - Phytosanitaires

Le talc permet d'enrober les engrais pour les empêcher de prendre en masse ; il sert aussi à diluer les ammonitrates et à éviter les dangers d'explosions correspondants. Dans les insecticides, et les phytosanitaires, le talc supporte les matières actives.

Feutres bitumineux et asphaltes

Le talc est incorporé à l'asphalte pour régler sa viscosité et améliorer l'adhérence sur le support ; il empêche le collage des feutres entre eux.

Produits pharmaceutiques et cosmétiques

L'absorption et l'onctuosité du talc en font un excipient courant des produits pharmaceutiques qui n'altère pas les matières actives et ne provoque pas d'usure des machines.

Tableau 8: Domaines d'utilisation du talc

Caractéristiques	Domaines d'utilisation
99,95 à 99,98% < 74 μ, blancheur > 80%, absence de particules abrasives,	Industrie du papier
99,5 % < 53μ, Mn + Cu < 0,1%, absence de particules abrasives,	Plastiques et caoutchoucs
Blancheur élevée (82 à 90%), absence de particules abrasives,	Peintures
SiO ₂ : 62.5 %; MgO : 31.2% ; CaO : 0.24 %; Fe ₂ O ₃ : 0.16 %; Al ₂ O ₃ : 0.25 %; TiO ₂ : 0.02 %; Na ₂ O : 0.4% ; K ₂ O : 0.2 %; Mn < 0.005% ; Pb : < 10ppm; Cu < 2ppm ; Co < 5 ppm; As < 1ppm; perte au feu: 4.82%, absences de particules fibreuses,	Pharmacie et bactériologie et cosmétiques
Teneur en Fe, Mn et Cu faible et une granulométrie très fine, blancheur > 80%,	Céramique et réfractaires
Mêmes spécifications qu'en pharmacie	Agro-alimentaire
Granulométrie : 95% < 325 mesh	Agrochimie et engrais

Source: P. Marteau, 1991

III. Les matériaux de construction

III.1. Les granulats (gravier, sable, et roche concassée)

1. Définition

Le mot granulats est une appellation qui englobe une gamme de produits constitués par "un ensemble de grains minéraux (inertes) de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations de base et de roulement des chaussées et des voies ferrées";

-dans les granulats on trouve le sable, le gravier et les roches concassées ;

-le gravier est pétrographiquement classé comme une particule naturelle meuble produite par l'érosion et ayant un diamètre compris entre 2 et 63 mm. On y inclut aussi les produits de concassage si moins de la moitié de la surface du grain est fracturée.

2. Géologie

A. Granulométrie et classements

Les granulats sont classés selon différents critères qui sont principalement : la granularité, la masse volumique, l'origine et le mode de préparation.

Classement par granularité

La granularité ou distribution dimensionnelle des grains est définie par la distinction entre les dimensions des grains. Les normes françaises distinguent :

- les fines (0.08mm soit 80 μm) ;
- les sables (de 0.08 à 6.3 mm) ;
- les gravillons (de 1 mm à 31.5 mm) ;
- les cailloux (de 20 mm à 80 mm) ;
- les graves (de 6.3 mm à 80 mm) ;
- les enrochements (très variables).

Les coupures granulométriques entre les différents produits se différencient selon les pays, les techniques d'utilisation et les origines de production.

Classement par densité

D'après leur masse volumique, les granulats sont dits :

- granulats légers lorsque la masse volumique réel du grain est inférieure à 2g/cm^3 ;
- granulats courants lorsqu'elle est comprise entre 2 et 3g/cm^3 ;
- granulats lourds lorsqu'elle est supérieure à 3g/cm^3 .

-Classement par origine et mode de préparation

Les granulats peuvent être classés en :

- produits naturels lorsqu'ils n'ont subi aucune opération de transformation autre que mécanique ;
- produits artificiels dans les autres cas.

B. Gîtologie

Les gisements de granulats naturels sont situés soit dans des formations détritiques meubles, soit dans des formations de roches massives.

-Les gisements de granulats détritiques meubles.

Ils se forment dans les alluvions des cours d'eau, les formations sédimentaires d'origine continentale, les dunes et les cordons littoraux, les arènes, les moraines, les éboulis de pentes (éluvions, colluvions, etc.), les dépôts marins, etc.

-Les formations de roches massives

Les gisements de roches compactes fournissent des matériaux pétrographiquement très diversifiés pouvant provenir :

- de formations sédimentaires consolidées (grès, calcaire, dolomie, conglomérats, etc.)
- de formations métamorphiques en général non schisteuses : quartzites, gneiss, cornéenne, marbre, etc.
- de formations éruptives intrusives (granite, diorite, gabbro,...) ou extrusives (basalte, tuf pyroclastique,...) non altérées.

3. Les domaines d'utilisation des granulats

Les granulats s'emploient principalement dans les bétons, les mortiers, en viabilité pour les différentes couches de chaussée et pour le ballastage des voies ferrées.

Tableau 9: Principaux domaines d'utilisation des granulats

Matériau	Caractéristiques	Utilisations
Sables	Grosseur de 0 à < 5 mm	Béton
Graviers	d > 2 mm et D < 20mm	Béton
Granulats	De 0 à < 2.5 mm	Mortiers (enduits)
	De 0 à < 5 mm	Mortiers (joints, chape)
Granulats	Ballast normal : 25 – 50 mm Ballast fin : 16 – 31,5 mm Gravillon (gravillon de soufflage) : 10 – 25 mm	ballasts
	-couches d'assise de chaussée : *graves (16mm < D < 60 mm) *sables (d < 6 mm) -couches de surface de chaussée souple :	

Matériau	Caractéristiques	Utilisations
granulats	*sable : ($d < 4$ mm) *graviers ($d > 2$ mm ; $D < 14$ ou 20 mm) -couches de surface de chaussée rigide : *sables : $0/d$ (= avec $d < 5$ mm) *graviers : d/D (avec $d > 2$ mm ; $D < 20$ mm) *cailloux D/D' (avec $D' < 40$ mm).	Couches de roulement de chaussées

Source : L. Galtier, 1993

NB : d : plus petite dimension, D : plus grande dimension.

CHAP. II : EXPLOITATION DE CARRIERES

I- CONDITIONS GISEMENTS

Un gisement doit répondre aux caractéristiques suivantes :

- réserve exploitable;
- bonne situation par rapport aux marchés (couts de transport);
- paramètres qualitatifs et quantitatifs acceptables;
- exploitation facile ;
- impact sur l'environnement maîtrisable.

I. 1-Situation

- accès facile
- proximité des centres de consommation qui peuvent être des agglomérations, ou un projet de génie civil (barrage, route, chemin de fer, etc....).

I. 2-Paramètres qualitatifs et quantitatif

-Paramètres quantitatifs

Il s'agit de moyens de prospection qui permettent de déterminer le volume potentiel rocheux exploitable. Ces moyens peuvent être :

- puits de reconnaissance.
- sondages carottés,
- moyens géophysiques,

Le calcul du potentiel rocheux peut se faire par de simples calculs classiques (méthodes de tranches), ou encore par des logiciels plus performants (recherches minières).

-Paramètres qualitatifs : qualité de la roche

Les spécifications sont nombreuses en fonction des produits finaux :

- matériau pour remblai;
- granulats ;
- ballast ;
- brique.

I. 3. Matériau naturel ou concassé destiné au remblai

Il s'agit des propriétés mécaniques que peut manifester un matériau après son extraction. La nature d'essais ainsi que les normes spécifiques varient en fonction de la roche mère et du type de projet (barrage, autoroutes...).

a)- Argile destinée pour remblai

Classement dimensionnel : qui peut être une granulométrie ou une sédimentométrie en fonction de la nature de la roche et de la taille des grains ($\pm 80\mu$).

Limite d'Atterberg : la teneur en eau d'une argile modifie complètement son comportement mécanique (consistance dure, plastique ou boueuse), ce qui a conduit à une étude expérimentale des conditions d'hydratation régissant de ces divers états.

La mesure du comportement de l'argile en fonction de son état hydrique est donné finalement par deux indices qui sont l'indice de plasticité (teneur en eau pour laquelle une argile passe de l'état solide à l'état plastique, et l'indice de liquidité (teneur en eau pour laquelle une argile passe de l'état plastique à l'état boueuse).

b). Sables

Les sables existent en grand nombre de variété du point de vue minéralogique, la plus répandue étant le sable quartzeux, mais on notera aussi la relative fréquence des sables calcaires, ou volcaniques.

Les essais réalisés portent sur la granulométrie.

c). Gravier (alluvions de l'oued)

Les alluvions de l'oued sont marquées par une variété pétrographique qui se manifeste par des valeurs de densité et de résistance variables. Les essais définissent :

- la granulométrie,
- porosité-densité ;
- résistance à l'attrition et pouvoir agglomérant ;
- solubilité dans l'eau.

I-4. Granulat

Les essais sur granulat les plus fréquents sont d'abord réalisés pour classer le produit selon :

- sa granulométrie :

Exemple une carrière de roches massives ouverte pour la production des enrochements destinés à être disposés en tapis pour protéger le talus doit livrer après essai de sautage un matériau de granulométrie désirée et de forme angulaire.

- sa résistance :

Les roches peu résistantes et qui se fragmentent trop seront écartés.

- Sa forme :

Les roches qui livrent après concassage des formes de granulats aplatis (par fréquence de lits micacés ou une stratification en petit bancs) seront rejetés.

1). Sables et agrégats pour béton ou pour chaussée (NF EN 12620)

-caractéristiques géométriques

- classe granulaire;
- granularité ;
- Forme ;
- teneur en élément coquiller ;
- teneur en fines ;
- qualité des fines ;

- caractéristiques physiques :

- résistance à la fragmentation (LA) ;
- résistance à l'usure (MDE) ;
- résistance à l'abrasion (pour les couches de forme) ;
- masse volumique.
- durabilité (résistance au gel, retrait au séchage)

- caractéristiques chimiques

- teneur en chlorures ;
- teneur en sulfates ;
- teneur en soufre.

2). Autres produits de carrière les plus fréquents

-Ballast pour voie ferrée

Conditions exigées :

- une bonne résistance à l'usure et à l'abrasivité ;
- une densité importante ;
- une faible teneur en sulfates et chlorures.

Ces conditions sont généralement regroupées au niveau des basaltes récents et des quartzites.

-briqueterie

- une plasticité importante
- une faible quantité de matière organique (perte au feu)

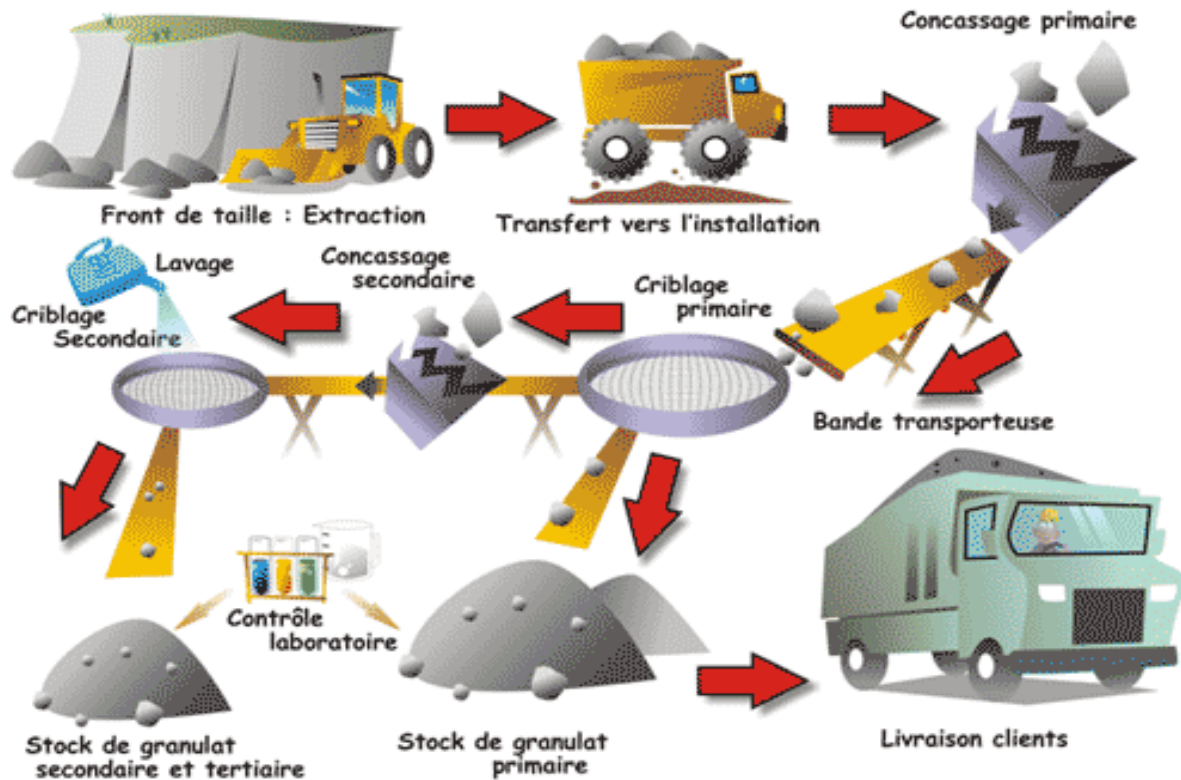
- marbrerie et pierres de construction

- une bonne résistance à la compression ;
- une surface polie livrant une bonne teinte.

II-EXPLOITATION ET PRODUCTION

Selon la qualité de la roche exploitable et la topographie du gisement divers modes d'exploitations sont à distinguer.

- Les granulats sont élaborés par le producteur à partir de gisements de roches massives d'origines géologiques diverses (calcaire, quartzite, grès...) ou de gisements de roches meubles (pliocène, alluvions...).
- Dans un premier cas, l'élaboration des granulats nécessite l'emploi maîtrisé d'explosifs pour détacher la roche de son massif et la fragmenter au maximum. Une succession d'opérations automatisées de concassage, criblage et lavage permet d'obtenir une gamme de granulats de différents calibres (granulométries) répondant aux diverses utilisations, jusqu'au plus petit "grain de sable".
- L'élaboration des granulats de roches meubles - familièrement appelés granulats roulés - ne nécessite pas l'emploi d'explosifs et très peu ou parfois pas de concassage. Par contre, leur lavage pour les débarrasser de la gangue argileuse qui les enrobe est une opération essentielle pour améliorer la qualité du granulat(sables du littoral ou de l'oued).
- Des granulats sont également élaborés à partir de gisements "dragués" au moyen de navires sabliers (Embouchure de l'oued Bouregreg) ou encore par recyclage des bétons de démolition.



II. 1-Extraction de la roche massive

Se fait à l'aide de tir à l'explosif pour le cas des roches massives, ou à l'aide de pelle ou chargeur dans les lits de l'oued.

1-Tir

L'utilisation du tir à l'explosif est précédée d'une étude spécialisée qui prend en évidence :

- la nature de la roche à exploiter ;
- le volume rocheux à extraire ;
- la granulométrie souhaitée
- la proximité d'infrastructure ou d'habitat.
- la présence de nappe d'eau.

2-Phasage de l'exploitation

Le phasage de l'exploitation est régi par plusieurs facteurs :

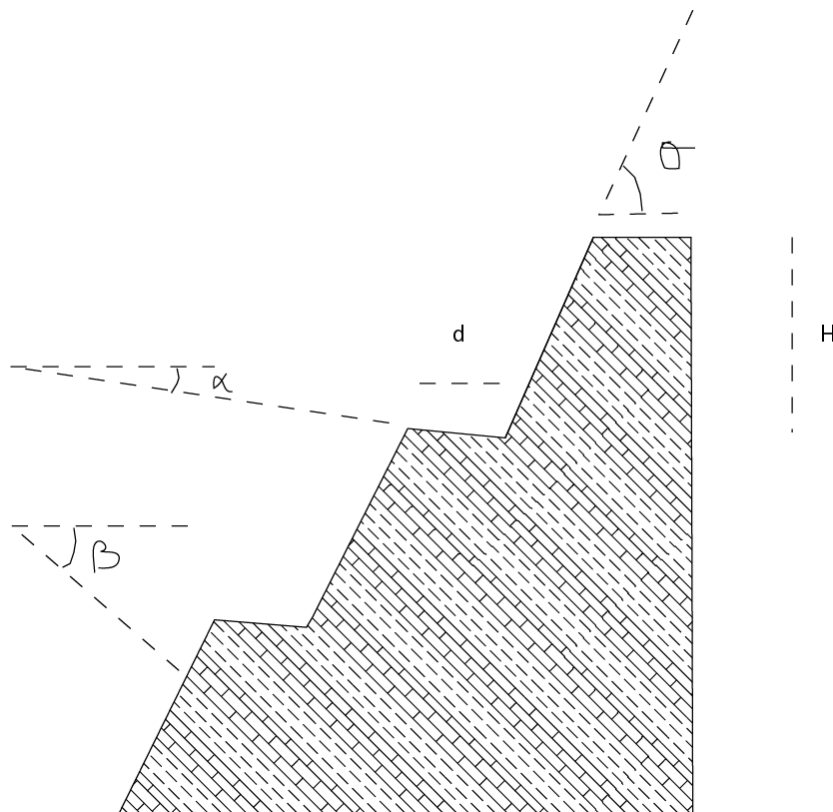
- assurer une exploitation facile et donc moins coûteuse,

-assurer une stabilité des paroi rocheuse afin d'éviter tout accident sur le chantier.

-Cas de roches massives

Plusieurs modes d'exploitations :

1-exploitation par gradins étagés : il s'agit du modèle le plus fréquent car permet d'atteindre des profondeurs importantes d'exploitation, et facilite l'accès et la circulation des engins.



D : largeur des gradins dimensionnée de telle manière à assurer le passage des engins (camions, pelles, chargeuses, foreuses)

H : hauteur des bermes dimensionnée pour assurer une stabilité générale du talus, cette hauteur peut être calculée en fonction de la résistance à la compression ou de la cohésion de la formation exploitée

α : pente des gradins est généralement de 7° vers l'amont et permet d'assurer un drainage des eaux pluviales vers le bas

θ : pente des talus, sa valeur varie en fonction de la nature lithologique de la formation exploitée afin d'assurer une stabilité générale du front de taille.

β : pendage des couches exploitées, doit être pris en considération pour orienter l'exploitation afin d'éviter tout risque de glissement général du talus, le sens de l'exploitation doit être généralement orienté vers celui du pendage des couches.



2-exploitation en fosse : est limité au niveau des carrière a volume du potentiel rocheux faible

3-exploitation mixte : rare et est consacrés aux exploitations de terrains hétérogène.

-Extraction de la roche meuble

Les alluvions de l'oued se situent généralement directement à la surface ou sont enfuies sous le sol au niveau de la zone de plaine alluviale. Pour les extraire, il faut tout d'abord ôter le sol en surface et le stocker puis dans un second temps, une excavatrice va progressivement récupérer la roche grâce à son bras muni de godets L'excavatrice se déplace progressivement et tourne autour du site d'extraction en l'élargissant à chaque passage.

Le phasage de l'exploitation doit respecter un plan bien déterminé tout en respectant les paramètres suivants :

1-profondeur totale de l'exploitation qui est fonction de la largeur de l'oued, la taille des galets et la profondeur de la nappe alluviale. De manière générale cette profondeur ne doit en aucun cas dépasser la profondeur H d'affouillement donnée par la formule suivante :

La hauteur d'affouillement généralisée est estimée par la formule de l'EDF.

D'autres formules peuvent être utilisés (LEVI, CONDOLIOS, LPEE). En fonction des formules utilisées, il faut tenir compte des niveaux PHE (des plus hautes eaux) et qui se rapproche du niveau du lit pour les oueds de grande largeur.

$$H + H_e = 0,730*(Q/L)^{2/3} *(D_{50})^{-1/6}$$

Avec :

H : hauteur d'affouillement ;

Q : Débit pris comme débit de la crue centennale ;

D₅₀ : Diamètre moyen du lit constituant le lit d'oued ;

2-Distance à respecter par rapport aux berges afin d'assurer une stabilité continue et éviter tout risque d'inondation.



Exploitation dans le lit de l'oued Feddal

II. 2-Transformation :

1-Concassage :

Les différentes étapes de concassage consistent en la réduction de la taille du granulat par des opérations successives pendant lesquelles la roche subit des chocs et un broyage au niveau de concasseurs.

On distingue divers types de concasseurs dont chacun sont destinés à un type de matériau ou à une granulometrie donnée

Concasseur à mâchoire :

Munis d'une mâchoire mobile et une autre fixe, permet de combiner un mouvement selon deux axes (choc + cisaillement). L'ouverture des mâchoires est adaptable à la granulométrie des blocs issus du tir à l'explosif.

Un concasseur à mâchoire présente les avantages suivants :

- La structure est simple
- La fonction est stable et fiable
- Facile à maintenir



Concasseur à percussion:Caractéristiques :

Le concassage du rocher est assuré par un processus de percussion : choc

Après l'écrasement, les matériaux se présentent cubiques.

La fonction est stable et fiable

Le coût du fonctionnement est bas



Broyeur à cône: Caractéristiques :

L'écrasement du matériau se fait à l'aide d'une cône mobile. Adapté pour une granulométrie moyenne ou faible. Ce type de concasseur se situe assez souvent dans la phase secondaire de la production.

- L'efficacité est haute;
- Il est facile à réajuster;
- Il est économique.



Broyeur à percussion:Caractéristiques :

1. Le granulat du produit se présente cubique;
2. Largement appliqué;
3. Le coût de fonctionnement est bas;
4. Facile à opérer et pratique à maintenir.



2-CRIBLAGE :



A l'aide de tamis superposés, de dimension d'ouvertures variable permet la séparation de produit concassé en différentes classes granulaires. Les mailles peuvent être en acier, ou en plastique, la forme peut être carré ou circulaire. De même la forme des mailles des cribles peut être adaptée en fonction des besoins d'un marché (forme spéciale du granulat).

La roche est secouée sur une série de tamis (ou cribles) dont les mailles sont de plus en plus petites. Le mélange de graviers est secoué et les éléments assez petits pour passer par les trous tombent à l'étage inférieur. Chaque couche de la colonne de tamisage retient donc des éléments d'une taille bien déterminée. Pendant ce tri, des jets d'eau arrosent continuellement la roche pour chasser l'argile dont la présence est indésirable. En effet, la présence d'argile fragiliserait le béton fabriqués avec des granulats mal lavés.

Les cribles sont remplacés périodiquement.

Les éléments les plus fins de la roche se retrouvent tout en bas de la colonne de tri et tombent dans un appareil qui va les séparer en fonction de leur taille de façon très précise .

L'eau qui a servi au lavage de la roche est très boueuse à sa sortie de l'usine. Elle est acheminée vers des bassins de décantation où elle va reposer pour que la boue (particules d'argile) tombe au fond. L'eau propre est pompée et retourne dans l'usine. L'eau est donc recyclée.



Le tri est effectué par un cribleur-laveur composé de tamis aussi appelés cribles qui sont des sortes de passoirs avec des trous de plus en plus petits. A la fin, il ne reste que du sable doux et très fin. Les plus gros éléments seront tous regroupés dans un autre



Sur cette photo se trouve un cribleur-laveur. La roche est placée sur de grands tamis. Elle est arrosée pour enlever l'argile et secouée pour trier les grains par taille. Si l'on n'enlève pas l'argile, le béton fait avec les granulats devient friable.



Lors du traitement de la roche, celle-ci est lavée. L'eau utilisée pour ce nettoyage n'est pas jetée, on la réutilise après qu'elle soit elle-même nettoyée. Ce nettoyage consiste en la séparation de l'eau et de l'argile qu'elle contient. On appelle cette séparation la décantation. La décantation se déroule dans de grands bassins situés près de la zone d'extraction. On y envoie l'eau sale, et l'argile tombe au fond. On pompe alors l'eau propre en surface

Les classes granulaires les plus fréquentes sont les suivantes :

0-2mm : sable ;

2-5mm : G0

5-8mm : refus de la maille 5mm.G1

8-16mm :

16-32mm :

32-50mm :

50-120mm :Ballast

3-STOCKAGE :

Les éléments triés et lavés vont enfin être acheminés par tapis roulant sur la zone de stockage, qui comprend d'immenses tas de granulats de différentes classes dont la taille des grains est homogène C'est à partir de ces tas que l'on va remplir les camions des clients.

Chaque tas peut être fait sur un tunnel, et les granulats sont prélevés par le dessous du tas.



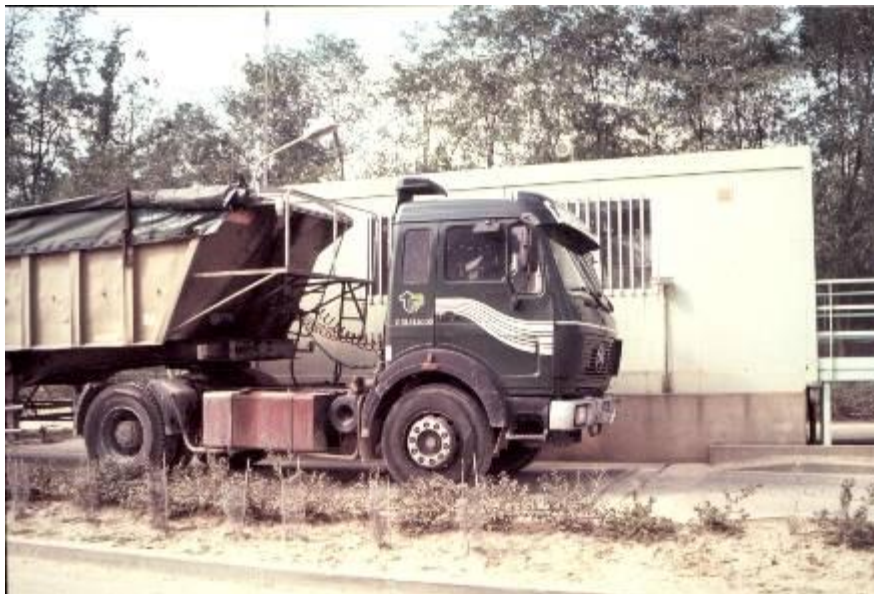


Ces immenses tas sont le résultat du traitement de la roche. Chacun d'entre eux est composé de grains de taille homogène, amenés par un tapis roulant.

4-Chargement

Les camions entrent et passent sur une bascule où ils sont pesés avant chargement ([Pesée à vide](#)). Ils indiquent à l'entrée quelle sorte de granulats ils viennent chercher et en quelle quantité. Ils vont ensuite se placer sous une trémie (Photo), sorte d'entonnoir par lequel le matériau est chargé (Photo). Après quoi le camion ressort en passant par la bascule où il est à nouveau pesé (Photo).

La différence entre la masse à la sortie et à l'entrée permet de connaître la quantité exacte de matériau livrée, et de faire la facture.



Les camions passent sur la bascule qui effectue la pesée du camion avant son chargement.



Les camions se rendent ensuite sous la trémie, qui est une sorte d'entonnoir géant alimenté par des tapis roulants.
Les camions s'y remplissent de granulats.



Après la première pesée, le camion s'avance sous la trémie contenant les matériaux choisis. Le poste de contrôle ouvre celle-ci pour remplir le camion de granulats.

