Cours 2

CLASSIFICATION DES MINERAUX SELON LA COMPOSITION CHIMIQUE

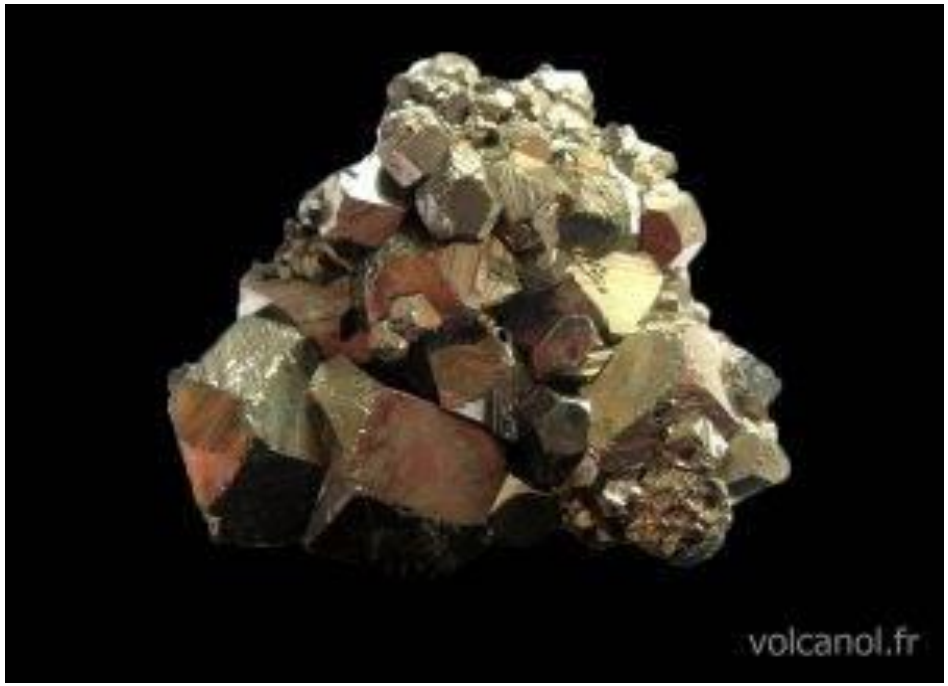
Classe I : les éléments natifs

Cette classe est composée d'environ 80 minéraux qui sont constitués par un ou plusieurs éléments natifs. Ce sont généralement des minéraux assez rares dans la nature. On peut distinguer les métaux natifs (Or, Platine, Iridium,…), les semi-métaux (Bismuth, Arsenic, Antimoine, …) et enfin les métalloïdes (Carbone, Soufre).

Soufre natif d'Indonésie

Classe II : les sulfures et sulfosels

Cette classe regroupe plus de 350 minéraux différents divisés en deux sous-classes.
Les arséniures, antimoniures,… sont caractérisés par une liaison entre l'atome de soufre et les cations suivants : Fe, PB, Zn, Sb, Cu, Bi, Ag, As, Co, Ni, Mo, Mn, Tl, V, W et Sn).
Les sulfosels sont caractérisés par une liaison entre l'atome de soufre et quelques semi-métaux comme par exemple As, Sb, Ge et Bi.
Exemple de sulfures



pyrite en dodécaèdre du Mexique

Classe III : les halogénures

Cette classe se caractérise par des minéraux (environ 80) qui présentent des anions tels que Br, CL, F et I. Les minéraux les plus communs de cette classe sont la fluorite (CaF_2) et la halite (NaCl).

Exemple de fluorure :

fluorine de Fontsante, va

▲ Classe IV : les oxydes et hydroxydes

Cette classe comprend plus de 320 minéraux où l'oxygène (O) ou bien le groupement hydroxyl (OH)- occupe la position de l'anion. On distingue trois sous-classes.

- ❑ Les oxydes simples,
- ❑ Les oxydes multiples (plusieurs métaux ou métalloïdes),
- ❑ Les hydroxydes.

Exemple d'oxydes simples

Octaédre de magnétite

Classe V : les carbonates et borates

- La sous-classe des carbonates (100 espèces) est caractérisée par les groupement anionique $(CO_3)^{-}$.
- La sous-classe des borates (100 espèces) est caractérisée par les groupement anionique $(BO_3)^{-}$.

Exemple de carbonates :

Aragonite ($CaCO_3$)

Calcite ($CaCO_3$)

Classe VI : les sulfates, chromates, molybdates et tungstates

Cette classe regroupe environ 230 minéraux. Le groupement anionique est du style (XO_4)– où X = S, Cr, Mo ou W.

Exemple de sulfates :

Gypse ($CaSO_4$)

Exemple de molybdates :

Wulfénite ($PbMoO_4$)

Wulfénite du Maroc

Gypse gemme dans une géode de calcite de Koukat, Maroc Gypse étoilé d'Ile de France

Classe VII : les phosphates, arséniates et vanadates

On distingue trois sous-classes.

- Les phosphates : le groupement anionique est $(PO_4)–$,
- Les arséniates : le groupement anionique est $(AsO_4)–$,
- Les vanadates : le groupement anionique est $(VO_4)–$.

  Exemple de phosphates :

  Pyromorphite ($Pb_5(PO_4)_3Cl$)

Pyromorphite de Chine

Vanadinite du Maroc

Adamite sur limonite du Mexique

Classe VIII : les silicates

Cette classe est la plus importante en terme de nombre de minéraux. Cette classe se caractérise par la présence du groupement [SiO4]4- en forme de tétraèdre. L'assemblage de ces tétraèdres permet de distinguer plusieurs sous-classes

Les nésosilicates (N)

Olivine taillée en goutte

Les sorosilicates (S)

Axinite du massif de l'Oisans, Isère France

Les cyclosilicates (C)

Verdelite du Brésil

Classe IX : les éléments organiques

La plupart du temps associé aux hydrocarbures (charbon, pétrole) ou bien à l'activité végétale (ambre)

Propriété des matériaux

1) Propriété de conductivité électrique

La conductivité électrique est une grandeur physique qui décrit dans quelle mesure une substance conduit le courant électrique. Elle détermine si une substance convient comme isolant ou comme conducteur électrique. Elle est également utilisée pour identifier les substances.

$R = \rho . \frac{l}{S}$ exprimée (Ω) ohm

ρ - résistivité ; l- longueur ; S- aire de la section du matériau

Conductance exprimée en Siemens $G = \frac{1}{R}$

Conductivité en S/m $\delta = \frac{1}{\rho}$

Si ρ est faible et δ élevé alors c'est un conducteur

Si ρ est élevé et δ faible alors c'est un isolant

Propriété des matériaux

La rigidité diélectrique (MV/m) résistance d'un isolant à la dégradation sous l'action du courant électrique.

Propriété des matériaux

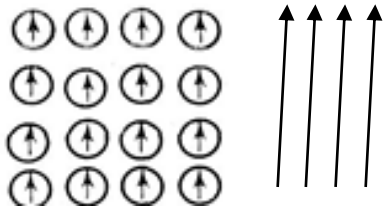
2) Propriété magnétique

Propriété d'être ou non attiré par l'aimant

Classification des types de magnétisme

1. **Ferromagnétique.** Fortement attiré par les aimants

Les matériaux ferromagnétiques sont des corps qui ont la capacité de s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique extérieur et de garder cette aimantation



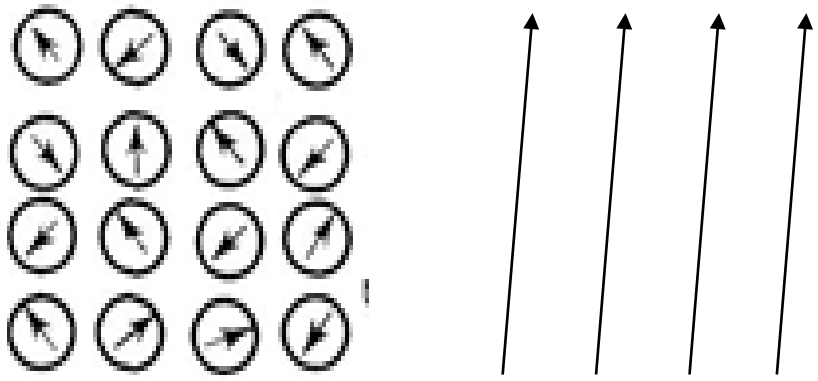
Fe_2, Ni ; Co

Propriété des matériaux

2) Propriété magnétique

2. **Paramagnétique.** Faiblement attiré

Désigne en magnétisme le comportement d'un milieu matériel qui ne possède pas d'aimantation spontanée mais qui, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation

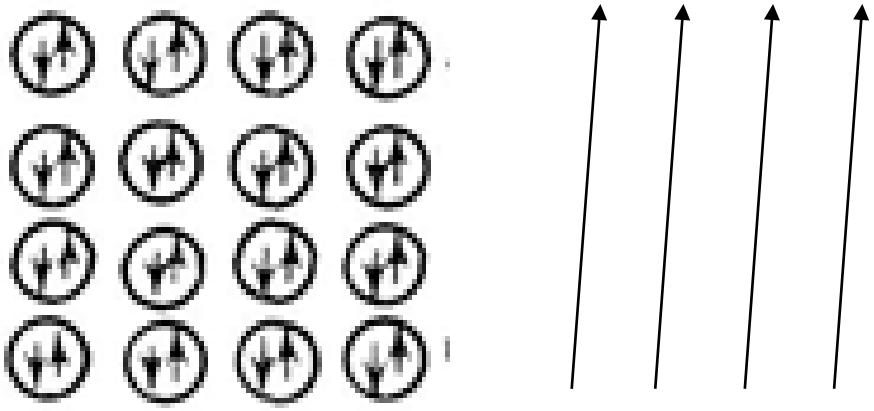


Al, Ca, Na, oxydes, Ta, U, CoO

2) Propriété magnétique

3. **Diamagnétique.** Les matériaux ne sont pas attirés

Le diamagnétisme est un comportement des matériaux qui les conduit, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, à générer un autre champ magnétique opposé, créé par une très faible aimantation.



Si, Cu, Zn, Ge, Ag, Pb, Al_2O_3

Propriété des matériaux

2) Propriété magnétique

Il y a deux paramètres de mesure

μ est la perméabilité magnétique du matériau.

La perméabilité magnétique se mesure en henrys par mètre (H·m−1 ou H/m).

$\mu_{r \leq}$ 1- matériau diamagnétique

$\mu_{r \geq}$ 1- matériau paramagnétique

μ_r >> matériau ferromagnétique

X_r est la susceptibilité magnétique relative du matériau.

C'est une grandeur sans dimension, reliée à μr par :

$$\mu = 1 + X_r$$

Les matériaux diamagnétiques ont une X_r négative très petite (environ -10^{-6}).

Les matériaux paramagnétiques ont un X_r positif compris entre 10^{-6} et 10^{-3}.

Les matériaux ferromagnétiques ont un X_r positif très grand, compris entre 10^3 à 10^6.

Propriété des matériaux

3) Propriété spécifique

Abrasion. Usure produite par le frottement de particules entre-elles ou entre deux surfaces dont au moins l'une est abrasive.

On distingue 3 formes d'abrasion

a) Abrasion faible ou modérée / faible impact. Cette forme d'usure résulte d'un contact par frottement / glissement de particules sur le substrat.

b) Abrasion forte / sous-pression
L'abrasion sous forte pression apparaît sur les équipements où l'abrasif est compressé entre deux surfaces. Ce dernier est alors brisé en de multiples morceaux. Exemple : broyeur à charbon.

c) Abrasion sévère / fort impact. On parle également "d'abrasion par gougeage". Il s'agit, en fait, d'une abrasion faible, modérée ou forte combinée à un effet d'impact. Exemple marteau broyeur

Cours 3

But de la minéralurgie. Structure de la minéralurgie, Classification de procédés minéralurgiques.

Propriétés minérales et méthodes de minéralurgie

But de la minéralurgie. Structure de la minéralurgie

La minéralurgie consiste Ensemble des techniques de traitement de matières minérales brutes ayant pour objet d'extraire par voie physique, chimique ou thermique, une concentration de minerai (initialement disséminer dans la roche du gîte minéral) directement utilisables par l'industrie ou transformables par le métallurgiste.

Un procédé minéralurgique comporte grossièrement deux étapes:

A. la préparation mécanique (fragmentation), composée d'un concassage éventuellement suivi d'un broyage ; ces opérations peuvent s'effectuer en plusieurs étapes, avec des criblages intermédiaires visant selon le cas à éliminer une partie (stérile) du minerai ou à recycler vers l'amont les plus grosses particules ;

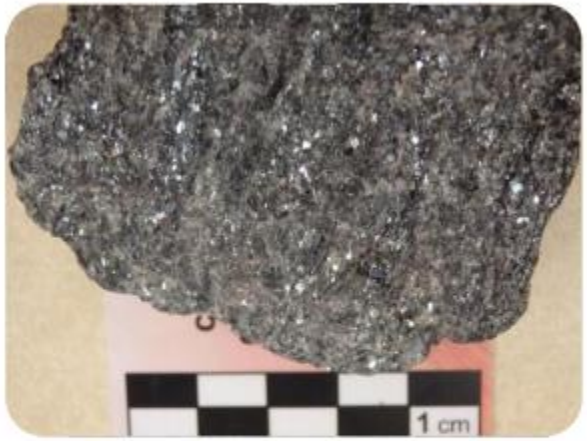
B. la séparation proprement dite des phases minérales intéressantes et de la gangue (ou stérile) ; on peut utiliser des méthodes purement physiques (magnétiques, gravimétriques, optiques, électrostatiques, etc.), physico-chimiques (flottation, lixiviation, etc.), biochimiques (action de bactéries), ou chimique (grillage, solubilité).

But de la minéralurgie. Structure de la minéralurgie

Exemple de minéraux où le carbone, le fer ainsi que le l'alumine ont été extrait puis concentré afin de récupérer le matériau sous forme de métal utilisable par l'industrie.

Gibbsite

Graphite (C)



Hématite (Fe_2O_3)
(oxyde)

But de la minéralurgie. Structure de la minéralurgie

Produits de la minéralurgie

- **Concentré -** un produit contenant la quantité maximale d'un composant utile ;
- **Produit intermédiaire (produit intermédiaire) -** occupant une position intermédiaire en matière de qualité entre le concentré et les déchets ;
- **Un résidu /rejet/stérile –** est un produit contenant une quantité minimale d'un composant utile.
  Le minerai traité est **le brut** ou **matière première**.

But de la minéralurgie. Structure de la minéralurgie

Types d'opérations de la minéralurgie

- **La phase préparatoire.** Ceux-ci comprennent le concassage, le broyage, le criblage. Conçu pour préparer le matériau.

- **La phase principale.** Ceux-ci comprennent : les procédés gravitaires, les procédés de flottation, l'enrichissement magnétique, l'enrichissement électrique, les méthodes d'enrichissement spéciales. Conçu pour la séparation directe des minéraux en composants utiles et déchets.

- **La phase finale.** Ceux-ci comprennent : la déshydratation, la classification en grades commerciaux. Conçu pour amener les produits aux indicateurs standards.
  La séquence des opérations de traitement appelée ***schéma technologique***, représente les grandes lignes

Propriétés minérales et méthodes de minéralurgie

Le processus d'enrichissement est basé sur des différences de minéraux dans certaines propriétés. Plus ces différences sont contrastées, plus l'efficacité de la séparation des minéraux est élevée. Les propriétés des minéraux qui constituent la base de la séparation comprennent :

- Densité;
- Mouillabilité de l'eau;
- Susceptibilité magnétique;
- Conductivité électrique;
- Un groupe de propriétés sous-tendant des méthodes d'enrichissement spéciales.

Propriétés minérales et méthodes de minéralurgie

Densité est la base des processus gravitationnels, qui comprennent : la concentration dans les milieux lourds, le jigging, la concentration sur les écluses, dans les séparateurs à vis, les hydrocyclones lourds-moyens.

Différence de mouillabilité est la base du processus de flottation.

Différence de propriétés électriques est la base de la séparation électrique.

Différence de couleur, de brillance, de dureté, de coefficient de frottement, de rayonnement, etc. est la base des méthodes spéciales d'enrichissement.

Propriétés minérales et méthodes de minéralurgie

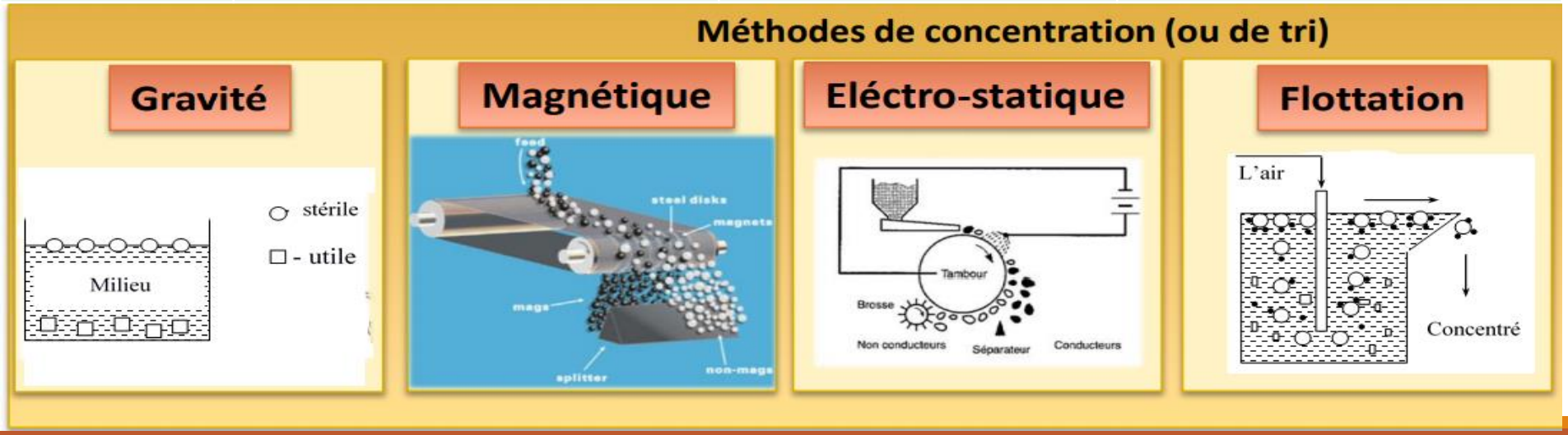
Comment déterminer la méthode à utiliser pour séparer la gangue du minerai de valeur ?

Dresser la liste des propriétés des différents minéraux composant la gangue et le minerai.

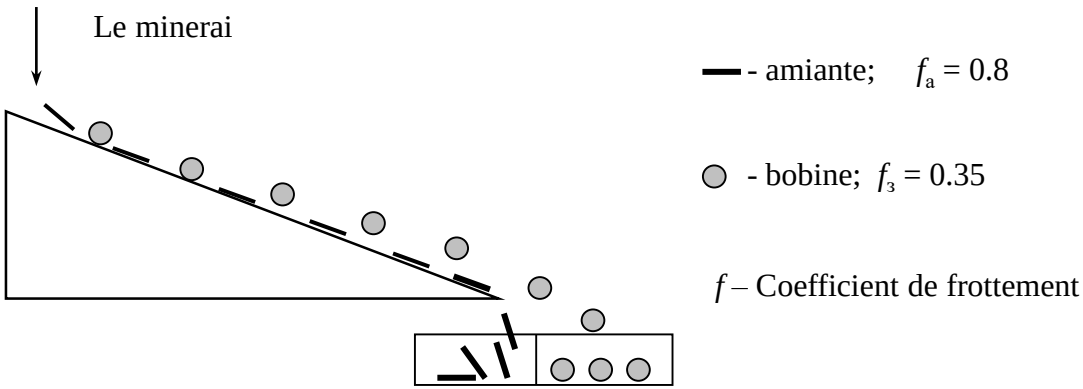
Exemple : • gangue : silice • minerai : hématite

On choisi une méthode tirant avantage des différences observées :

Minéral	Masse volumique (kg/litre)	Réponse magnétique	Réponse électrostatique
Hématite	5,2	paramagnétique	conducteur
Silice	2,7	Non magnétique	Non conducteur



Méthode par frottement (méthodes spéciales)



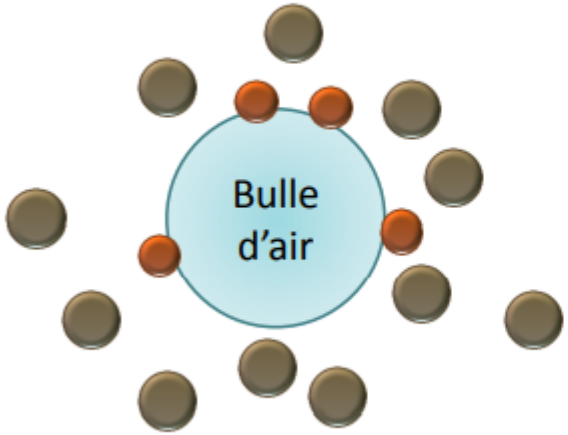
Cette méthode basée sur la différence des coefficients de frottement des minéraux séparés. L'enrichissement est réalisé sur une surface incline. Les particules qui diffèrent par le coefficient de frottement acquièrent des vitesses différentes sur un plan incliné et, par conséquent, ont des trajectoires différentes. Ainsi, ils sont séparés.

Séparation par flottation

Exemple sur le graphite

- Hydrophiles - mouillés avec de l'eau ;
- Hydrophobe - non mouillé avec de l'eau.

→ Utilisation du comportement hydrophobe des matériaux



Minéral utile (hydrophobe)

Gangue (hydrophile)

Les matériaux hydrophobes vont « s'accrocher » aux bulles d'air et remonter en surface.
Néanmoins, les minéraux utiles ne sont pas tous hydrophobes.
Nécessaire de faire un traitement pour les rendre hydrophobes.

Séparation par flottation

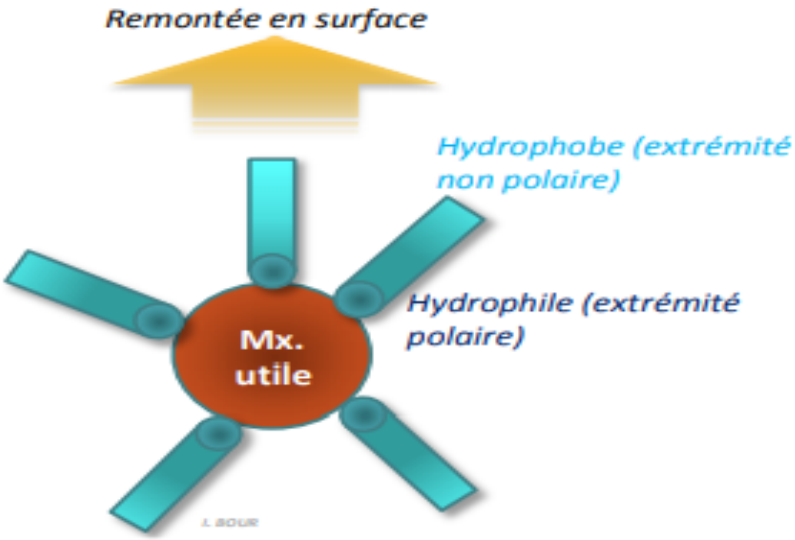
Comment passer de hydrophile à hydrophobe pour un solide ??

On utilise une molécule chimique nommée collecteur. Ex : Xanthate

- Le collecteur possède une extrémité polaire(hydrophile) et l'autre non polaire (hydrophobe),
- Le collecteur s'adsorbe sur la surface de la molécule,
- Ce qui crée une couche hydrophobe,
- Le solide est maintenant prêt à être flotter.

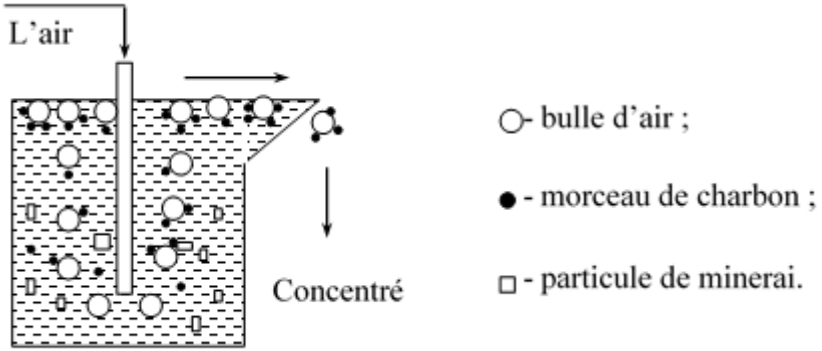
Traitement par ajout de molécules chimiques nommé « **collecteur** ».

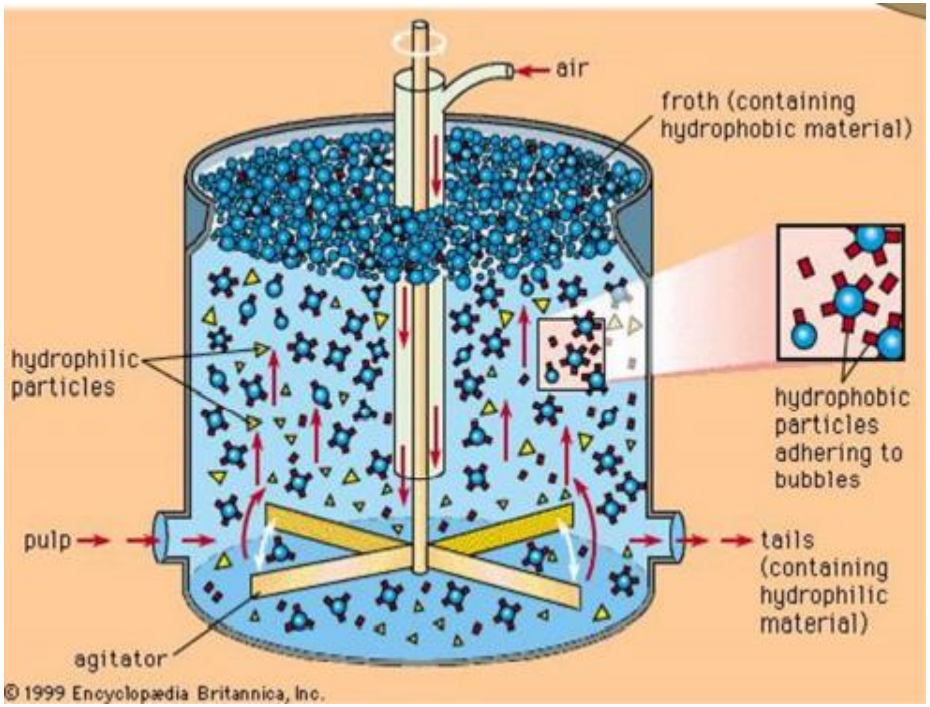
Permet à un solide de passer d'hydrophile à hydrophobe



***Remarque** : Une molécule d'eau est une molécule polaire. L'huile, les hydrocarbures n'ont pas de molécules polaires et ne se mélangent donc pas à l'eau.*

Séparation par flottation





Le moussant :

- Pour que le minéral hydrophobe flotte , il doit entrer en collision avec une bulle d'air,
- Pour augmenter la probabilité de collision,
- on augmente le nombre de bulles d'air,
- Si on injecte la même quantité d'air mais que l'on diminue la taille de chacune des bulles, il y aura alors un plus grand nombre de bulles augmentant ainsi la probabilité de rencontre du minéral hydrophobe avec une bulle d'air,
- L'utilisation d'une molécule chimique appelée moussant permet de diminuer la taille des bulles.

Séparation par flottation

Exemple sur le graphite (C

Mode opératoire de la flottation pour le carbone :

1) Remplissage d'eau dans la cellule + 100 g de minerai sous agitation,
2) Le collecteur (3 gouttes d'huile de pin) se combine avec le graphite,
3) Moussant (3 gouttes de kérozène) pour la production de bulles,
4) Injection d'air + eau,
5) Récolte de l'écume produite chargée en minerai.

Cellule de flottation → récupération du minerai concentré dans l'écume = concentrat de graphite

Séparation minerai (hydrophobe) / gangue (hydrophile)

Séparation magnétique

Exemple sur l'hématite

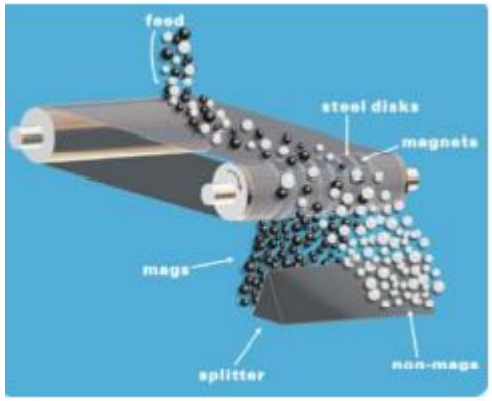
Les méthodes magnétiques sont basées sur la différence des propriétés magnétiques des composants séparés. Le procédé est destiné à la valorisation des minerais de métaux ferreux (fer, manganèse, chrome). L'enrichissement est réalisé à l'air ou en milieu liquide.

Si la force magnétique est supérieur à la force centrifuge, le matériau reste fixé sur le tapis roulant.

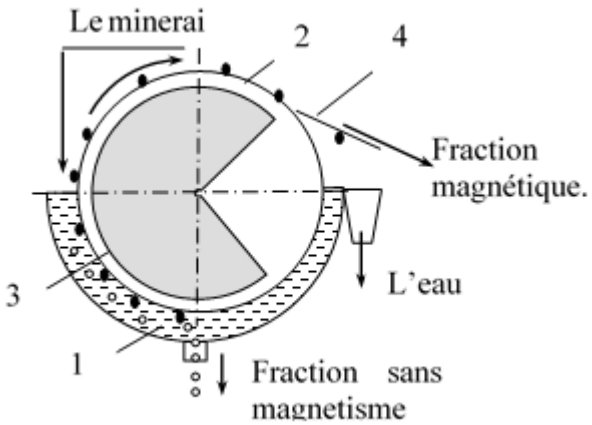
Séparation magnétique

Exemple sur l'hématite

- Lorsqu'un ensemble de particules est placé à proximité d'un aimant, celles qui sont magnétiques seront attirées par l'aimant, tandis que celles qui ne sont pas magnétique ne seront pas attirées.
- Si la force magnétique est supérieur à la force centrifuge, la particule reste collée sur la couroi.



	Réponse magnétique
Hématite	paramagnétique
Silice	Non magnétique



1- bac séparateur ;

2- tambour ;

3- système magnétique (immobile);

4- grattoir(caoutchouc)

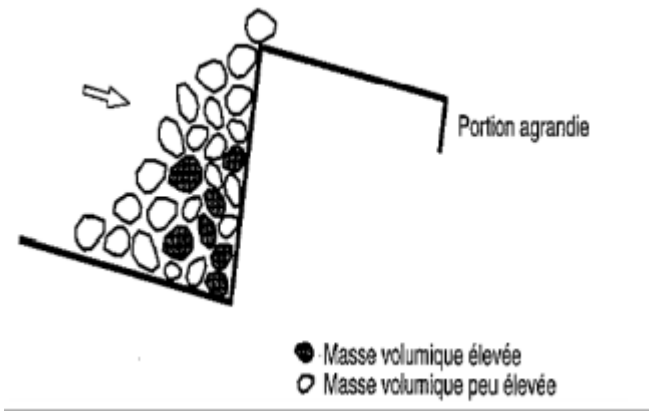
Séparation gravimétrique

Séparation gravimétrique

Exemple sur l'hématite

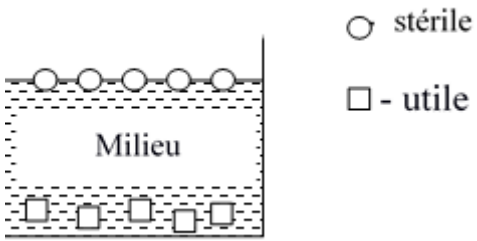
Principe général : 2 particules de même volume et de masse volumique différente :

- La particule de masse volumique élevée chute rapidement,
- La particule de masse volumique faible chute lentement ou se dépose au fond



Séparation dans des milieux lourds

Des particules de densité inférieure à la densité de séparation, sous l'action des forces d'Archimède, remontent à la surface du milieu séparateur. Les particules de roche avec une densité supérieure à la densité du milieu de séparation descendent..



Séparation électro-statique

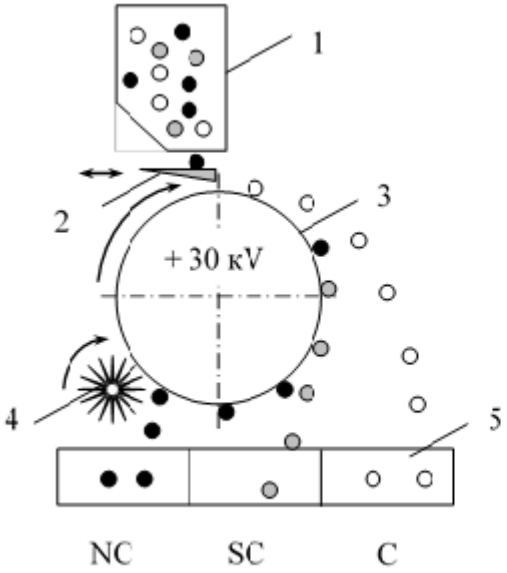
Exemple sur l'hématite

Le processus de séparation électrique minérale est basé sur la différence de conductivité électrique des composants séparés.

Séparation électro-statique

Exemple sur l'hématite

- Les particules de minerai sont chargées artificiellement à l'aide d'un courant électrique établi entre une électrode chargeante, qui est généralement un fil de petit diamètre, et une électrode mise à la masse, qui est un tambour en mouvement de rotation.
- Les particules qui acquièrent des électrons peuvent les redonner aussitôt au tambour, ce sont des particules conductrices.
- Les particules qui acquièrent des électrons peuvent les conserver, ce sont des particules non conductrices.
- Les particules non conductrices demeurent chargées et sont attirées par le tambour de signe contraire.
- Les particules conductrices ne sont pas chargées et ne sont attirées par le tambour.



1 – Trémie de matière première ;

2 - chargeur vibrant ;

3 – électrode collectrice (tambour) ;

4 – brosse (caoutchouc) ;

5 – récepteurs de produits ;

○ - concentré (conducteurs-C) ;

● - Produits industriels (Semi-conducteurs -SC) ;

● - Rejet (non-conducteurs-NC) ;

Cours 4

Echantillonnage. Libération. Maille de broyage. Homogénéisation du minerai.

Cours 6

Hydrominéralurgie – le procédé minéralurgique principal en Guinée. Hydrometallurgie d'aluminium.

MINE
STÉRILES
REJETS DANS LE MILIEU
TERRE VÉGÉTALE (RÉHABILITATION)
EXPLOITATION MINIÈRE
MINERAI
ICPE
CONSTRUCTION
MINÉRALURGIE
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIÉTAUX : EVALUATION, GESTION, REMÉDIATION, RÉHABILITATION
GISEMENT
RÉSIDUS
REJETS DANS LE MILIEU
EXPLORATION MINIÈRE
CONCENTRÉ
MÉTALLURGIE EXTRACTIVE
ICPE
REJETS DANS LE MILIEU
RÉSIDUS
FILIÈRES EN AVAL

Procédés chimiques

La métallurgie extractive.

La pyrométallurgie, **l'hydrométallurgie** et **l'électrolyse** sont trois techniques de métallurgie extractive, la métallurgie qui consiste à transformer un minerai brut en un élément métallique (Cu, Fe, Zn, Ni, ...) plus ou moins pur (99.99 %).

Pourquoi un traitement spécifique ?

Seuls quelques très rares métaux (or, argent, cuivre, ...) peuvent être extraits dans la nature à l'état natif sans traitements particuliers. Cela explique leur utilisation très ancienne par l'humanité dès le néolithique. Le cuivre, par exemple, n'existe plus à l'état natif, comme dans l'antiquité mais sous forme de sels contenant 30 à 90 % de cuivre, mélangés à d'autres métaux. Les métaux se trouvent donc combinés à des minerais (à l'état de cations) et mélangés à des rochers stériles. Ils ont formé au fil du temps des oxydes (Fe_3O_4, Al_2O_3), des carbonates ($CaCO_3$, $PbCO_3$), des silicates (de fer, d'aluminium, de calcium) et des sulfures (FeS2, ZnS, NiS, ...).

Procédés chimiques

1. Pyrométallurgie

Dans la pyrométallurgie, le minerai, une fois *enrichi* (concentré par écrasement, broyage, flottation et séchage) est fritté ou grillé (calciné) en présence d'autres matériaux tels que des poussières de dépoussiérage et un fondant. Le concentré est ensuite fondu dans un haut-fourneau d'où sort le métal brut de première fusion. Ce dernier subit ensuite une troisième opération destinée à l'amener au degré de pureté souhaité.

Principe de la pyrométallurgie

Le procédé thermique de pyrométallurgie est constitué de 3 étapes :

- Un traitement thermique pour homogénéiser la source de métal (grillage)
- Une réaction chimique (oxydation) permettant la séparation
- L'affinage

Ce procédé est utilisé en particulier pour le cuivre, le nickel ou le zinc.

Procédés chimiques

1. Pyrométallurgie

Les traitements thermiques préliminaires des minerais ont pour rôle d'opérer une transformation chimique donnant un produit intermédiaire plus propre à l'élaboration du métal dans l'appareil proprement dit, plus souvent on utilise les processus :

1) Calcination des carbonates ;
2) Grillage des sulfures

Dissociation d'un carbonate.

$$MCO_3 \rightleftharpoons MO + CO_2\uparrow \qquad \text{M-METAL}$$

Exemple: $CaCO_3 \rightleftharpoons CaO + CO_2\uparrow$

$$FeCO3 \rightleftharpoons FeO + CO_2\uparrow$$

Procédés chimiques

1. Pyrométallurgie

Avantages de la calcination:

- Enrichissement du minerais
- Réduction des frais de transport
- Augmentation du rendement de l'appareil métallurgique

Grillage des sulfures

Par grillage on peut obtenir à partir d'un sulfure MS soit :

1. **Un oxyde MO;** par la suite l'oxyde pourra être réduit pour donner un métal :

$$MO + R \longrightarrow RO + M \qquad \text{ou encore}$$

$$2MO + MS \longrightarrow SO_2 + 3M$$

où M – metal
R – reducteur

2. Un sulfate : MSO4 / grillage sulfatant

a) Pour une oxydation directe

$$2MS + 3O_2 \longrightarrow 2MO + 2SO_2 \uparrow$$

Prédominance la température > 800ºC

b) Par décomposition d'un sulfate intermédiaire

$$2MS + 4O_2 \longrightarrow 2MSO_4$$

$$2MSO_4 \longrightarrow 2MO + 2SO_4 + O_2 \uparrow$$

Ici la température est de 200 à 450 ºC

La dissociation du sulfate demande des températures :

$ZnSO_4$ – 800 ºC
$PbSO_4$ – 1000 ºC
$Fe_2(SO_4)_3$ – 600 ºC

On peut traiter le mercure. $HgS + O_2 \longrightarrow Hg + SO_2 \uparrow$

Le Cuivre : $2Cu_2S + SO_2 \longrightarrow 2Cu_2O + 2SO_2$

$$Cu_2S + 2CuO \longrightarrow 6Cu + SO_2$$

Procédés chimiques

2. Hydrometallurgies:

On peut citer, entre autres exemples d'hydrométallurgie, la lixiviation, la précipitation, la réduction électrolytique, l'échange d'ions, la séparation sur membrane et l'extraction par solvants. La première étape des procédés hydrométallurgiques consiste à séparer par lixiviation au moyen, par exemple, d'acide sulfurique, les métaux intéressants des matières moins valables. La lixiviation est souvent précédée d'un prétraitement (par exemple, grillage sulfatant). Cette opération exige souvent des pressions élevées, l'apport d'oxygène ou de hautes températures. Elle peut également faire appel à l'électricité

Principe de l'hydrométallurgie

L'hydrométallurgie est une technique plus récente (début de 20e siècle) qui comporte une étape où le métal est solubilisé (d'où le préfixe "hydro") pour permettre sa purification et qui peut faire appel en dernière étape à l'électrolyse (Al, Zn).

Un procédé d'hydrométallurgie typique comporte donc les étapes suivantes :

- Mise en solution des différents métaux (lixiviation) à l'aide soit d'un acide (sulfurique, ...), soit d'un oxydant (chlore)
- Séparation des différents métaux entre eux (purification) réalisée par différentes techniques (cémentation, précipitation, extraction par solvant

L'hydrométallurgie est en particulier utilisée pour l'aluminium, le zinc et le cuivre,

mais aussi pour le nickel, le chrome et le manganèse et l'or.

Procédés chimiques

Hydrometallurgies d'Aluminium:

Al fait partie de la composition d'environ 250 minéraux

Orthoclase ($K_2OAl_2O_3.6SiO_2$)

Nepheline ($NaK)_2O.Al2O_3.2SiO_2$)

kyanites ($Al_2O_3.SiO_2$)

leytsite ($K_2O.Al_2O_3.4SiO_2$) etc

Sous l'action des facteurs climatiques, les minéraux contenant l'alumine se forment en minerai ;

diaspore Al_2OOH (4)

Boehmite $Al_2O_3.H_2O$ (3)

Et tri hydraté: Gibbsite $Al(OH)_3$ (2)

Bayerit – $Al(OH)_3$ (1)

Procédés chimiques

Le procédé Bayer:

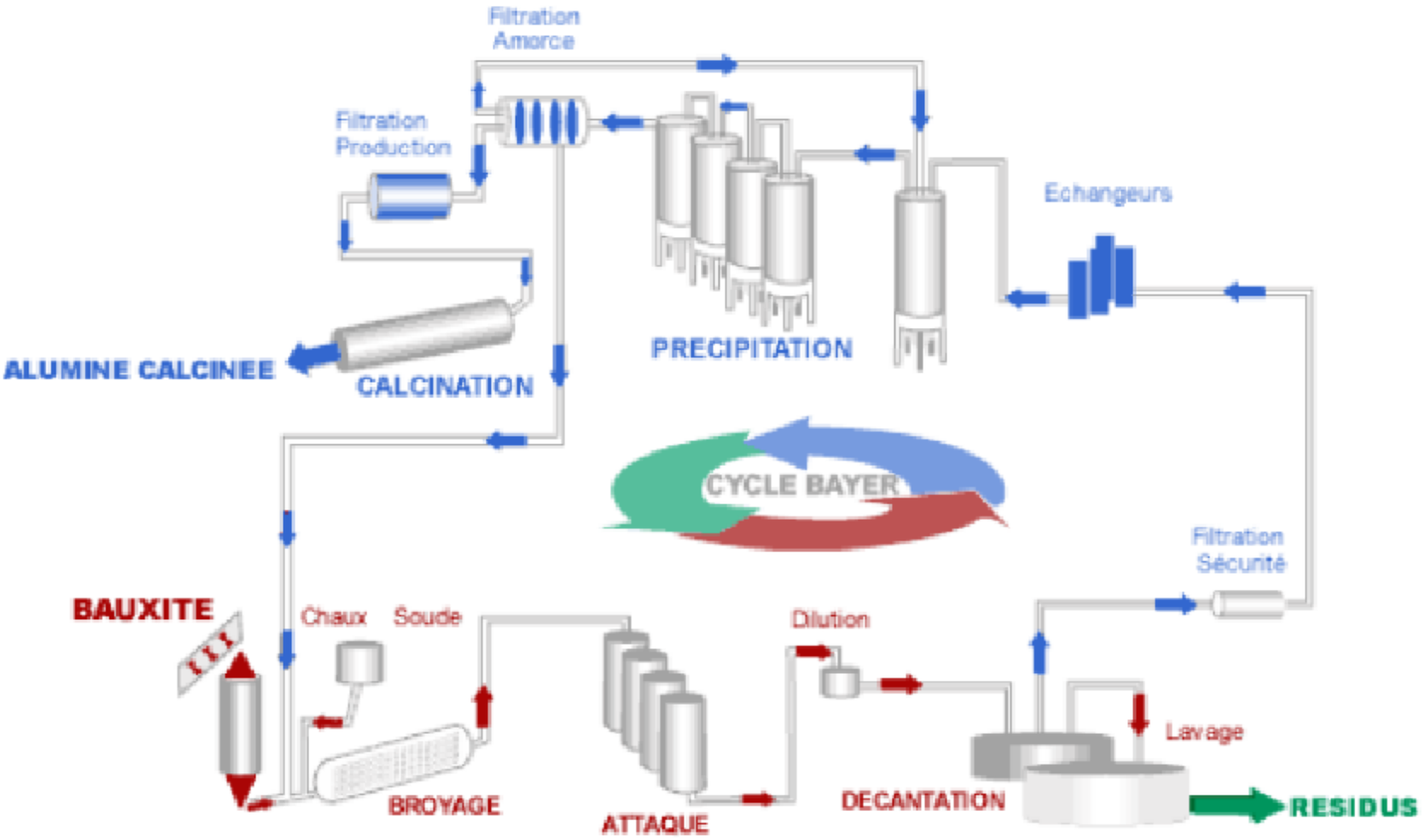
Pour la production d'alumine, le **procédé Bayer** est presque exclusivement employé. Selon ce procédé, la bauxite est attaquée par de la soude dans des autoclaves, sous pression, à une température de 105 - 250°C. On obtient ainsi de l'alumine hydratée et des **boues rouges**. Ces dernières sont séparées, lavées et filtrées et sont soit valorisées, soit mises en décharge.

Après sédimentation et filtrage, l'alumine hydratée est transformée en alumine (Al_2O_3) par calcination sur lit fluidisé à une température d'environ 1100°C.

La production d'alumine s'accompagne de grandes quantités de **boues rouges** (1-2 t/t Al_2O_3). Selon leur composition et selon la situation dans le pays concerné, elles devraient être utilisées pour la **production** d'alumine et de fer, pour la fabrication de floculant pour stations d'épuration d'eau ou pour la fabrication de matériaux de construction.

Procédés chimiques

Le procédé Bayer:



Le procédé Bayer:

Les étapes du Procédé Bayer

- **Le broyage:** la bauxite est broyée en fines particules pour faciliter l'extraction
- **L'attaque:** la bauxite est mélangée avec de la soude et de la chaux dans des réacteurs à haute température et haute pression.
- **La décantation**: on sépare la phase liquide, riche en aluminium, de la phase solide dans des clarificateurs. Les résidus sont lavés plusieurs fois et forment les "boues rouges". Leur couleur est due à leur forte concentration en oxyde de fer.
- **La précipitation:** la liqueur est refroidie et diluée pour faire précipiter l'aluminium sous forme d'hydrate d'alumine (Al_2O_3, $3H_2O$).
- **La calcination**: l'alumine chauffée à plus de 1000°C pour la déshydratée.

Procédés chimiques

Les principales réactions chimiques des étapes

1- Lixiviation : attaque des parties de cellule de minerai par une base

$$Al_2O_3(\text{minerai}) + 2NaOH + 2H_2O \longrightarrow 2NaAl(OH)_4\ (aq)$$

Composition de la bauxite de (Fria)

Al_2O_3 – 45%; SiO_2 – 1,8%; Fe_2O_3 - 24%; TiO_2 -2 a 3%; P_2O_5 – 2 a 2%

Module de silicium – μ ; $\mu_{si} = \frac{Al2O3}{SiO2}$; si $\mu_{si} \geq 8$ nous utilisons le procédé Bayer

Si $\mu \leq 8$ nous utilisons le procédé de Frittage

2- Lavage, déssilicatation, élimination des boues rouges

- Précipitation de l'hydrate de l'aluminium à partir de solution sursaturée d'aluminate avec formation des particules d'hydroxyde (décomposition)
- $NaAl(OH)_{4\ (aq)} \longrightarrow Al(OH)_{3(5)} + NaOH$

3- Calcination- decomposition thermique

$$2Al\ (OH)_{3(5)} \longrightarrow Al_2O_{3(5)} + 3H_2O\ (aq)$$

⇩

Alumine

Procédés chimiques

L’obtention de l’aluminium

Le procédé le plus couramment utilisé pour la **production d'aluminium pur** est l'**électrolyse ignée** de l'alumine. Dans la cuve d'électrolyse, l'alumine est dissoute dans un bain de fluorure d'aluminium et de cryolithe à environ 950°C. Le passage d'un courant électrique continu provoqueune réaction qui libère l'aluminium. L'aluminium liquide est extrait périodiquement par aspiration et coulé en lingots ou billettes

La bauxite guinéenne peut être classée comme la plus haute qualité au monde, elle se reposent directement sur la surface ou nécessitent des opérations mineures et exploitable à ciel ouvert (profondeur d'ouverture - 0,2 -1,0 m.). Les dépôts ne sont pas inondés, car ils se produisent dans les bassins versants. La présence de bauxite est établie dans presque toutes les régions de la Guinée, à l'exception de la Guinée forestière (partie orientale du pays)

Procédés chimiques

La **production de l'aluminium** s'accompagne des **émissions** ci-après:

- poussières d'alumine lors du stockage, du transport et du chargement;
- poussières provenant de la fabrication des anodes (coke de pétrole etc.);
- liants volatiles, fluor issu de restes d'anodes dans les gaz résiduaires des cuves de raffinage;
- fluorures (sous forme de poussières et de gaz) dans les gaz résiduaires chargés de CO/CO_2 des cuves d'électrolyse; l'acide fluorhydrique est extrêmement corrosif, nocif pour la santé et préjudiciable à l'environnement (influe également sur la croissance des végétaux);
- cathodes usées, contenant des fluorures;
- Débris de décrassage du four contenant des fluorures;

eaux usées

Opération annexe

- **Déshydratation**

La déshydratation est le processus de séparation de l'humidité des minéraux et des minéraux. La nécessité du procédé est due au fait qu'après enrichissement en milieu aqueux, une partie de l'humidité reste dans les produits, qui est le ballast. Pour une redistribution plus poussée des produits, l'humidité doit être éliminée, la ramenant aux indicateurs standard.

- **Méthodes de déshydratation**

Les méthodes de déshydratation suivantes sont utilisées dans les concentrateurs.

1. **Drainage** (filtration naturelle) - humidité libre s'écoulant à travers une couche de matériau sous son propre poids ;
2. **Centrifugation** - déshydratation dans un champ centrifuge ;
3. **Filtration** à travers une cloison poreuse sous l'action du vide ;
4. **Épaississant** - décantation gravitationnelle des boues sous l'influence de la gravité des particules ;
5. **Séchage thermique** ;
6. **Séchage naturel** dans les entrepôts (sites).

Cours 7

Hydrominéralurgie d'or. Procédés CIP, CIL. Lixiviation en tas. Autres types de procédé

Procédés chimiques

Hydrométallurgie de l'or :

Dans la majorité des cas, l'hydrométallurgie de l'or est basée sur sa mise en solution par le cyanure (le métal est alors contenu dans la liqueur d'attaque). Elle est appliquée selon deux techniques :

- ✓ la lixiviation dynamique en réacteur agité mécaniquement en usine
- ✓ la lixiviation statique en tas ou en fosse en plein air.

Lorsque l'or est associé étroitement à des sulfures métalliques, la concentration par flottation conduit à produire un pré concentré des sulfures. Si la proportion d'or libre est élevée, celui-ci est extractible auparavant par voie gravimétrique.

L'or réagit avec le cyanure de sodium, l'oxygène et l'eau pour produire du dicyanoaurate de sodium et de l'hydroxyde de sodium:

Quelques exemples de matériels utilisés pour procéder au traitement gravimétrique des minerais d'or

Procédés chimiques

Hydrométallurgie de l'or :

Les principaux cas de figure rencontrés sont les suivants :

- Minerais dans lequel l'or est libre et grossier (alluvions, éluvions, filonien oxydé).
  Peuvent être mis en œuvre des traitements physiques et physico-chimiques :
  - particules > 200 µm : gravimétrique (de base : jig, sluice, tables) ;
  - particules < 200 µm : gravimétrique (base améliorée + centrifuge) et flottation (hydro et pyrométallurgie).
- Minerais dans lequel l'or est libre, mais finement disséminé (<< 50 µm) ou inclus dans un autre minéral (pyrite ; arsénopyrite ; zone sulfurée).

Peuvent être appliqués des traitements physiques et physico-chimiques (gravimétrique de pré-concentration (centrifuge) et flottation), ainsi que des traitements chimiques (pré-traitement par bio-métallurgie ou voie thermique ; hydrométallurgie (emploi de cyanure)).

Procédé de traitement :

Les procédés de traitement gravimétrique

les procédés de traitement gravimétrique s'appuient sur l'une des propriétés physiques de l'or, à savoir sa densité. Ces procédés consistent donc à travailler sur la différence de densité existant entre l'or (densité 19,3) et les autres minéraux qui l'accompagnent dans le but de les séparer.

La flottation

La flottation est utilisée industriellement pour concentrer les minerais de nombreuses substances minérales, qu'elles soient ou non métalliques, en particulier les minerais sulfurés qui peuvent contenir de l'or.
Cette technique permet de concentrer les teneurs initiales (on passe de quelques g/t à quelques milliers de g/t). Mais le concentré obtenu doit encore subir un traitement, car si la flottation conduit à l'obtention de concentrés riches en différents éléments (or, cuivre, zinc, etc.), elle ne permet pas d'opérer la séparation de ces éléments.

Procédés chimiques

Les procédés de lixiviation

La cyanuration

L'extraction hydrométallurgique par cyanuration est le procédé le plus répandu (la production mondiale d'or provient à plus de 80 % de mines utilisant la cyanuration).

Le principe en est le suivant, l'or présent dans le minerai est traité par une solution diluée de cyanure (essentiellement de sodium) en milieu basique (pH > 10) et en présence d'oxygène :

$$4\,Au + 8\,CN^- + O_2 + 2\,H_2O \longrightarrow 4\,Au(CN)_2^- + 4\,OH^-$$

Les différentes techniques mises en œuvre, Schématiquement, on peut différencier deux grandes méthodes de cyanuration :

la cyanuration en cuve, la lixiviation agitée de la pulpe en cuves

et **la lixiviation en tas** dépendent de la granulométrie, de leur minéralogie et de la teneur en minerais. Plusieurs procédés d'extraction peuvent être utilisés sur un même site. (Pulpe = roche broyée + eau + cyanure = prégnant solution)

Procédés chimiques

Les procédés de lixiviation

Lixiviation en cuves

Le minerai finement broyé est amené sous forme de boue dans une série de cuve de lixiviation. Cette boue est agitée par voie mécanique ou par injection d'air où elle est mise en contact avec la solution de cyanure dans des cuves avec du charbon actif ou de la résine synthétique.

Lorsque du charbon actif est ajouté dans des cuves séparées après lixiviation, le procédé est appelé « Carbon-In-Pulp » ou CIP. Lorsqu'il est introduit directement dans les cuves de lixiviation le procédé est appelé « Carbon in Leach » ou CIL.

CIP - carbon-in-pulp : la lixiviation et l'adsorption est réalisée dans des cuves séparées.

CIL - carbon-in-leach : processus simultané de lixiviation et d'absorption dans les mêmes cuves.

CIS - carbon-in-solution : processus similaire au CIP sauf que l'or est séparé par un processus de filtration.

Les procédés de lixiviation

Lixiviation en tas - Heap leach

La lixiviation en tas est un processus de dissolution du minerai par percolation du solvant (le cyanure) dans le tas de minerai posé à l'air libre, déposé sur une membrane imperméable (géo membranes). La solution est récupérée par un système de drainage et traitée pour aboutir au lingot.

La lixiviation en tas est un processus lent et l'efficacité d'extraction est relativement faible de 50 à 75% par rapport à 90% / 99,5% dans une usine de lixiviation agitée (CIL – CIP - CIS).
Le processus nécessite de 60 à 150 jours pour le traitement du minerai qui pourrait être lessivé entre 8 et 24 heures dans un procédé de lixiviation agitée de type CIL.

Procédés chimiques

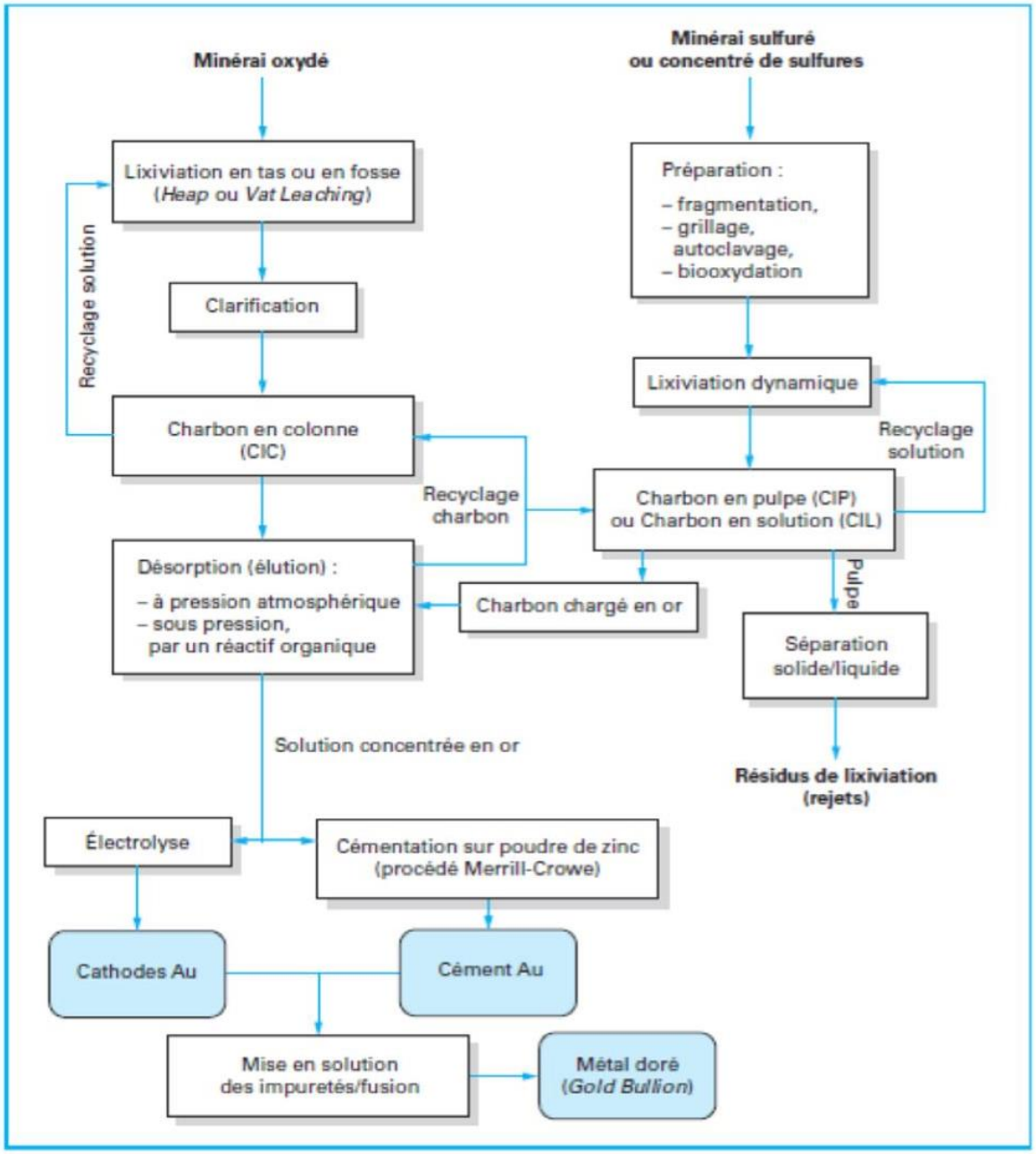
Les procédés de lixiviation

Le procédé de lixiviation en tas offre un certain nombre d'avantages :

- Les coûts de broyage sont réduits puisque le minerai est uniquement concassé ;
- La solution de cyanure est recyclée lors de son passage à travers le tas, réduisant ainsi la quantité de cyanure utilisée dans le processus de traitement ;
- Cette méthode convient tout particulièrement aux minerais affichant les plus faibles teneurs, qui sont poreux ou présentent une fracturation susceptible de permettre à la solution cyanurée de percoler jusqu'à l'or.

Procédés chimiques

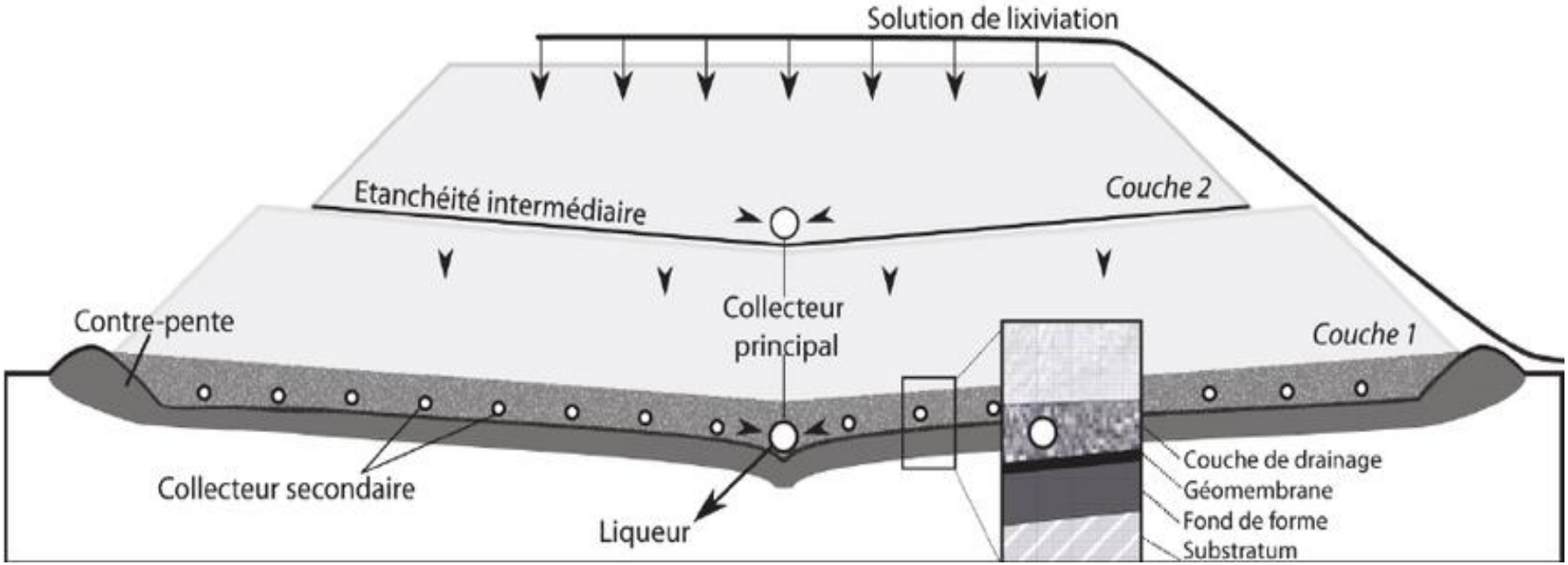
- Une installation de lixiviation en tas se compose des éléments suivants :
- Un système de prétraitement du minerai
- Un tas et une aire de lixiviation
- Un système d'arrosage par la solution et de récupération des jus
- Un circuit de récupération du métal
- Un bassin pour la solution chargée et la solution stérile



Procédés chimiques

Elle est ensuite filtrée puis stockée dans un bassin pour un traitement ultérieur.

Ce bassin recueille également l'eau de ruissellement du tas, il doit donc être conçu de manière à tenir compte des précipitations exceptionnelles



La récupération de l'or

La solution contenant le complexe aurocyanure peut être traitée par cémentation (procédé Merrill-Crowe) en utilisant du zinc. Mais, de plus en plus souvent, c'est la fixation de l'or sur charbon actif qui est utilisée comme nous venons de l'évoquer.

Une tonne de charbon actif peut permettre d'adsorber 70 kg d'or. L'or est récupéré en traitant le charbon grâce à une solution chaude (portée à température d'ébullition) se composant de 1 % de soude et de 0,1 % de NaCN (cyanure de sodium).

Le charbon est recyclé après avoir été chauffé à 600-750 °C, à l'abri de l'air.
L'or est récupéré par électrolyse. Il se dépose sur une cathode en laine de fer, avant d'être fondu. L'or obtenu est d'une haute pureté.