

## Chapitre II : Réactifs de flottation et aspects pratiques

### I.1 Réactifs de la flottation

#### I.1.1 Les collecteurs

Ce sont des molécules polaires, non-polaires qui forment à la surface des minéraux un film monomoléculaire (figure 7). L'extrémité non polaire est dirigée du côté de l'eau, l'angle de contact des minéraux ainsi recouverts dans l'eau est alors diminué, la flottabilité augmentée. Les principaux collecteurs pour les minéraux sulfurés sont : les **xanthates** ou les **aerofloats** (acides crésylthiophosphoriques).

Pour les minéraux oxygénés : les acides gras et leurs sels alcalins.

Comment passer d'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

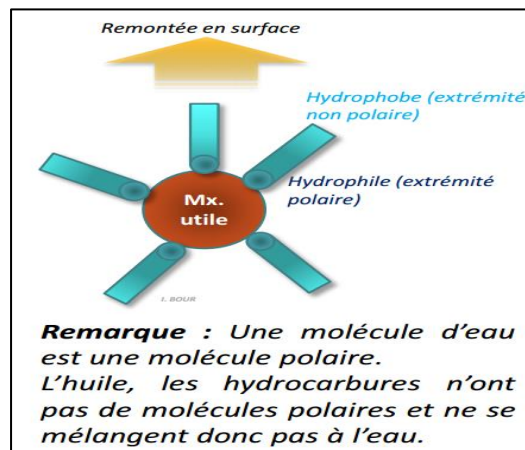


Figure 7 : La disposition des corps de collecteur sur les particules

#### I.1.2 Les moussants

Si l'on envoie l'air dans de l'eau, les petites bulles qui se forment se réunissent pour en former de grosses (coalescence). D'autre part les bulles éclateront à la surface sans former d'écume. Or pour la flottation il est nécessaire d'avoir un grand nombre de bulles fines et d'avoir une écume assez stable que l'on puisse évacuer avant que le minerai ne retombe. On ajoute donc de l'eau des agents moussants.

Les moussants classiques sont : **l'huile de pin** ; consommation de 20 à 80 grammes par tonne de minerais traités. **Le crésol**, provient de la distillation du goudron de houille. Il est plus sélectif que l'huile de pin, consommation de 50 à 200 grammes/tonne.

#### I.1.3 Les déprimants

Ces corps empêchent ou retardent la flottation de certains minéraux, et permettent des flottations sélectives. Par exemple ; le cyanure de sodium déprime la blende et la pyrite  $\text{FeS}_2$ , et est sans action sur la galène. La chaux déprime la pyrite et a une faible action sur les autres sulfures. Les chromates et

bichromate alcalins, dépriment la galène et sont sans action sur la blende et le sulfures de cuivre. Les silicates de soude dépriment les gangues, ce qui est nécessaire dans la flottation des oxydes qui nécessitent des collecteurs très énergiques qui feraient monter les gangues.

#### 1.1.4 Les activateurs

Modifient la surface des minéraux, afin de les rendre actifs avant l'ajout de collecteur, ces corps augmentent l'action des collecteurs sur certains minéraux, ce sont surtout les sels qui par double décomposition, donnent à la surface des minéraux une pellicule qui réagissant avec les collecteurs. *Par exemple* ; une addition des sulfure de cuivre permet à l'éthylxanthate d'agir sur la blende.

#### Les régulateurs

Sont des réactifs influant sur le processus d'interaction des collecteurs, des déprimants et des activateurs avec la surface minérale. Ils créent les conditions optimales pour une bonne action des autres réactifs, ils sont destinés à ;

- A précipiter les sels solubles qui nuisent à l'action des collecteurs (poisons de la flottation) ; sels ferreux, ferriques, d'aluminium, etc...
- A adapter le PH de la pulpe, ce qui a une grande influence sur le traitement. On utilise la chaux, le carbonate de soude et l'acide sulfurique.

**Tableau 2 : principaux minéraux pouvant être séparés par flottation**

| <b>Sulfures</b>   |                                                        | <b>Oxydes simples</b>            |                                                                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Galene            | PbS                                                    | Magnétite                        | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                                                                         |
| Blende            | ZnS                                                    | Hématite                         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                         |
| Marmatite         | Zn <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> S                    | Cassitérite                      | SnO <sub>2</sub>                                                                                       |
| Molybdénite       | MoS <sub>2</sub>                                       | Quartz                           | SiO <sub>2</sub>                                                                                       |
| Pentlandite       | Ni <sub>1-x</sub> Fe <sub>x</sub> S                    | Pyrolusite                       | MnO <sub>2</sub>                                                                                       |
| Chalcocite        | Cu <sub>2</sub> S                                      | Rutile                           | TiO <sub>2</sub>                                                                                       |
| Covellite         | CuS                                                    | Corindon                         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                         |
| Chalcopyrite      | CuFeS <sub>2</sub>                                     | Baddeleyite                      | ZrO <sub>2</sub>                                                                                       |
| Bornite           | Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>                       | <b>Oxydes mixtes (spinelles)</b> |                                                                                                        |
| Enargite          | Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>                       | Chromite                         | FeOCr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                      |
| Tennantite        | (Cu, Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub> | Ilménite                         | FeOTiO <sub>2</sub>                                                                                    |
| Tétrahédrite      | (Cu, Fe) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> | <b>Silicates</b>                 |                                                                                                        |
| Pyrite            | FeS <sub>2</sub>                                       | Zircon                           | ZrSiO <sub>4</sub>                                                                                     |
| Pyrrhotite        | Fe <sub>1-x</sub> S                                    | Wollastonite                     | CaSiO <sub>3</sub>                                                                                     |
| Mispickel         | FeAsS                                                  | <b>Silicoaluminates</b>          |                                                                                                        |
| <b>Carbonates</b> |                                                        | Orthose                          | K(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>                                                                    |
| Calcite           | CaCO <sub>3</sub>                                      | Albite                           | Na(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>                                                                   |
| Dolomite          | (Mg, Ca)CO <sub>3</sub>                                | Néphéline                        | Na <sub>3</sub> KAl <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>16</sub>                                       |
| Magnésite         | MgCO <sub>3</sub>                                      | Talc                             | Mg <sub>6</sub> (Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> )(OH) <sub>4</sub>                                    |
| Malachite         | Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>      | Muscovite                        | K <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>20</sub> )(OH, F) <sub>4</sub>  |
| Cérousite         | PbCO <sub>3</sub>                                      | Phlogopite                       | K <sub>2</sub> (Mg, Fe <sup>2+</sup> ) <sub>6</sub> (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>20</sub> ) |
| Smithsonite       | ZnCO <sub>3</sub>                                      | Biotite                          | K <sub>2</sub> (Mg, Fe <sup>2+</sup> ) <sub>6-4</sub> (Fe <sup>3+</sup> ,                              |

|                   |                                              |             |                                                                                                                 |
|-------------------|----------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |                                              |             | $\text{Al, Ti)}_{0-2} \dots (\text{Si}_{6-5} \text{Al}_{2-3} \text{O}_{20})\text{O}_{0-2} (\text{OH, F})_{4-2}$ |
| <b>Sulfates</b>   |                                              | Lépidolite  | $\text{K}_2 (\text{Li, Al})_{5-6} [\text{Si}_{6-7} \text{Al}_{2-1} \text{O}_{20}] (\text{OH, F})_4$             |
| Barytine          | Andalousite                                  | Andalousite | $\text{Al}_2 \text{O}(\text{SiO}_4)$                                                                            |
| Anglésite         | Disthène                                     | Disthène    | $\text{Al}_2 \text{O}(\text{SiO}_4)$                                                                            |
| Célestine         | $\text{SrSO}_4$                              |             |                                                                                                                 |
| <b>Fluorures</b>  |                                              |             |                                                                                                                 |
| Fluorine          | $\text{CaF}_2$                               |             |                                                                                                                 |
| <b>Tungstates</b> |                                              |             |                                                                                                                 |
| Scheelite         | $\text{CaWO}_4$                              |             |                                                                                                                 |
| <b>Phosphates</b> |                                              |             |                                                                                                                 |
| Apatite           | $\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3 (\text{OH, F})$ |             |                                                                                                                 |

## I.2 Préparation de la pulpe avant flottation

À l'entrée d'un circuit de flottation, on admet une pulpe minérale qui a subi des opérations de préparation (Réacteur, conditionneurs)

### I.2.1 Première condition

Pour obtenir une bonne flottation est d'atteindre, par broyage, une libération convenable des particules à flotter, le degré de broyage étant toujours un compromis entre les exigences métallurgiques et économiques. La pulpe de flottation présente des concentrations massiques en solides de 15 à 40 %, ce qu'il explique que les classificateurs est habituellement couplés avec les broyeurs. Dans certains cas, il est nécessaire de deschlamer la pulpe avant de la flotter, pour éviter le recouvrement des surfaces minérales par les ultrafines, phénomène appelé adagulation (*slime coating*).

### I.2.2 Deuxième condition

Cette condition consiste à travailler avec des particules solides de granulométrie adéquate. En effet, pour que des bulles de diamètre compris généralement entre 0,1 et 1 mm puissent entraîner les solides, il faut que ceux-ci soient suffisamment fins, généralement de dimension inférieure à 300  $\mu\text{m}$ , sauf dans des cas particuliers de particules de faible masse volumique telles que celles des charbons. Cependant, les très fines particules de dimension inférieure à 10-15  $\mu\text{m}$ , ont des difficultés à flotter à cause de leur faible énergie cinétique, insuffisante pour se placer à la surface des bulles, ou de leur court-circuitage par entraînement direct dans les rejets. De plus, elles libèrent facilement des ions, consomment en pure perte des réactifs, sont responsables du phénomène d'adagulation, déjà cité, et augmentent la viscosité de la pulpe. On remarque aussi que plus les solides sont divisés plus la sélectivité de l'adsorption est faible et, lorsque leur surface est amorphisée, l'adsorption devient très difficile.

### I.2.3 Troisième condition

Assurer un bon conditionnement de la pulpe avec les réactifs (déprimant, activant, collecteur, moussant...) dans des réacteurs agités mécaniquement, appelés conditionneurs, pendant des durées d'une à plusieurs dizaines de minutes. Un cas particulier mérite d'être signalé, le conditionnement en pulpe épaisse (60 à 70 % en masse) utilisé couramment dans la flottation des oxydes, silicates et minéraux de type sels. Ces minéraux utilisent généralement des collecteurs tels que des amines et des acides gras, dont l'adsorption sur leur surface dépend de la quantité résiduelle de ces collecteurs dans les eaux de procédé recyclées. On observe d'abord la création de floes mixtes, gênants pour la sélectivité, qui est suivie ensuite d'une phase de défloculation où les solides non collectés quittent le

film surfactant, et après laquelle on peut enfin flotter sélectivement. Ce mécanisme complexe montre qu'il est nécessaire de conditionner ces minéraux pendant 15 à 30 min.

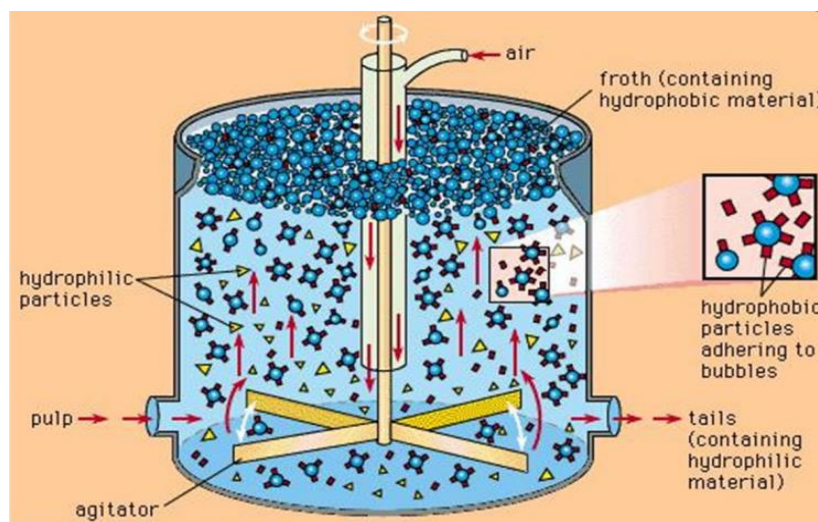
#### 1.2.4 Quatrième condition

La quatrième condition est la qualité de l'eau, sa quantité et la température de la pulpe. Pour les sulfures, la qualité de l'eau a relativement peu d'importance, car ces solides sont naturellement hydrophobes. Encore faut-il rappeler que les métaux lourds dissous sont susceptibles d'entraver la sélectivité de la flottation et de consommer des réactifs. Pour la flottation des oxydes, silicates et minéraux de type sels, les cations dissous tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et les cations de métaux lourds doivent parfois être éliminés avant le conditionnement ; on fait alors appel aux techniques de traitement des eaux industrielles. La quantité d'eau nécessaire varie de 2 à 6 t par tonne de minerai au conditionnement. Toutefois, lors des opérations de flottation, et particulièrement pour assurer l'écoulement des concentrés métalliques, il est nécessaire d'ajouter 1 à 2t d'eau supplémentaire. L'eau est évidemment recyclée à partir des épaisseurs et des bassins d'épandage. Le taux de recyclage varie de 50 à 90 %, compte tenu des pertes par évaporation, de la rétention dans les pores des solides ; aussi est-il plus réaliste de parler d'eau neuve pour compenser les pertes, qui peuvent varier de 0,5 à 2,5 t selon la complexité des opérations de flottation et de l'évaporation. Toutefois, le recyclage de l'eau, même s'il entraîne une économie de réactifs, peut s'avérer préjudiciable dans le cas d'une flottation sélective et nécessiter un traitement préalable.

La température de la pulpe et/ou de l'eau est généralement celle de l'ambiante. Un chauffage s'avère parfois efficace (45 à 60 ° C) lors du conditionnement de minéraux de type sels.

#### 1.3 Cellule de flottation

Une fois que les particules sont rendues hydrophobes, elles doivent être mises en contact avec des bulles de gaz, pour que les bulles puissent attacher à la surface. Si les bulles et les surfaces ne sont jamais en contact, aucune flottation ne peut se produire. Le contact entre les particules et les bulles peut être réalisé dans une cellule de flottation telle que celle représentée schématiquement sur la figure qui suite (figure 8). La collision des particules/bulles est affectée par les dimensions relatives des particules. Si les bulles sont grandes par rapport aux particules, le fluide circulant autour des bulles peut balayer les particules sans entrer en contact. Il est donc préférable que le diamètre des bulles est comparable à celle diamètre des particules afin d'assurer un bon contact particule/bulle.



**Figure 8 : Schéma d'une cellule de flottation**