

3. Méthodes physico-chimiques : Flottation

3.1 Principe

La flottation est une méthode de séparation de solides qui utilise des différences de propriétés des interfaces entre les solides, Une solution aqueuse et un gaz (habituellement l'air). La flottation est un procédé de séparation solide-liquide.

Les particules solides que l'on désire séparer, et qui doivent être constituées d'une seule phase, sont mises en suspension dans l'eau. On traite d'abord cette pulpe avec certains réactifs chimiques (ce qui constitue la phase de conditionnement) dont le rôle est de rendre hydrophobe la surface de certains solides, de manière à ce qu'elle ait une plus grande affinité pour l'air que pour l'eau.

Parmi ces réactifs qui sont utilisés, un ou plusieurs sont appelés collecteurs (ou généralement, surfactants) et ont pour fonction de donner l'hydrophobicité à la surface des particules.

Les autres réactifs sont connus sous le nom de modificateurs, et sont utilisés afin de rendre sélective l'action du ou des plusieurs collecteurs par activation ou par dépression. On dit qu'un solide est actif lorsque, ne flottant pas avec une combinaison donnée de réactif comprenant un collecteur, l'addition d'un nouveau réactif (l'activant) le fait flotter. On dit qu'un solide est déprimé lorsque, flottant avec une combinaison donnée de réactifs, l'addition d'un nouveau réactif (le déprimant) l'empêche de flotter.

A la fin de la phase de conditionnement, la surface de particules constituées de la phase solide que l'on désire séparer est seule devenue hydrophobe, ce qui permet de réaliser une flottation différentielle (par exemple séparation des sulfures entre eux, ou d'oxydes entre eux).

La pulpe ainsi conditionnée est alors introduite dans des cellules de flottation, c'est-à-dire des réacteurs munis d'agitateurs, de diaphragmes ou d'électrodes qui dispersent ou engendrent des bulles d'air dans la suspension. Les bulles d'air, dont la dimension est contrôlée par le mode d'introduction, l'agitation et la présence d'un agent surfactant à l'interface liquide/gaz (le moussant), vont se fixer sur les particules dont la surface est hydrophobe. Sous l'action de la poussée d'Archimède résultante, l'ensemble particule + bulle flotte à la surface du réacteur. Suivant la quantité et le type de moussant, on peut former une écume dynamiquement stable à la partie supérieure de la cellule de flottation, dans laquelle vont se rassembler les particules qui flottent. L'écume enrichie en phase solide à séparer peut être enlevée de la cellule afin de former le concentré de flottation.

Les phénomènes de base de la flottation peuvent s'interpréter en termes de chimie physique des surfaces, mettant en jeu trois interfaces (voir figure 1):

- l'interface solide/liquide,
- l'interface liquide/gaz,
- l'interface solide/gaz.

Le liquide, en tout état de cause, est une solution aqueuse, et le gaz, l'air à la pression ambiante.

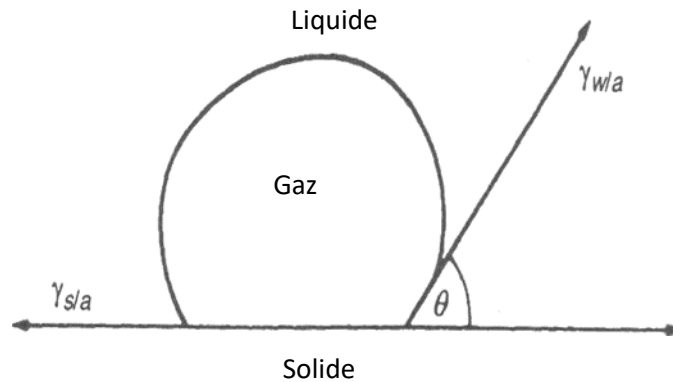


Figure 1. Angle de contact entre la bulle d'air et la particule solide dans un milieu aqueux

3.2 Hydrophobicité de surface.

La notion hydrophobicité de surface a une importance majeure dans la compréhension du phénomène élémentaire de la flottation, qui est le contact entre un bulle d'air et la surface d'un solide dans un liquide ; elle peut être conçue relativement simplement lorsque l'on s'attache au modèle de la figure 2.

L'équilibre énergétique est obtenu pour l'équation de Young-Dupré :

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta. \quad (1)$$

Le critère de l'hydrophobicité est:

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} > \gamma_{lg} \quad \text{où } \theta > 0.$$

Où :

γ_{sg} énergie interfaciale solide/gaz

γ_{sl} énergie interfaciale solide/liquide

γ_{lg} énergie interfaciale liquide/gaz

θ angle de contact

Avec l'équation de Dupré :

$$\Delta G = \gamma_{sg} - (\gamma_{sl} + \gamma_{lg}) \quad (2)$$

L'équation Dupré permet de calculer le changement d'énergie libre ΔG associé au remplacement d'une aire unitaire d'interface solide-liquide par une aire unitaire d'interface solide-gaz, ou à l'accroissement de l'aire interfaciale solide-liquide. L'équation obtenue est :

$$\Delta G = \gamma_{lg} (\cos \theta - 1) \quad (3)$$

L'hydrophobicité d'un minéral augmente donc avec l'angle de contact; les minéraux à angle de contact élevé sont dits aérophiles, c'est-à-dire qu'ils ont une affinité plus élevée pour l'air que pour l'eau. Les termes hydrophobicité et flottabilité sont souvent utilisés de façon interchangeable.

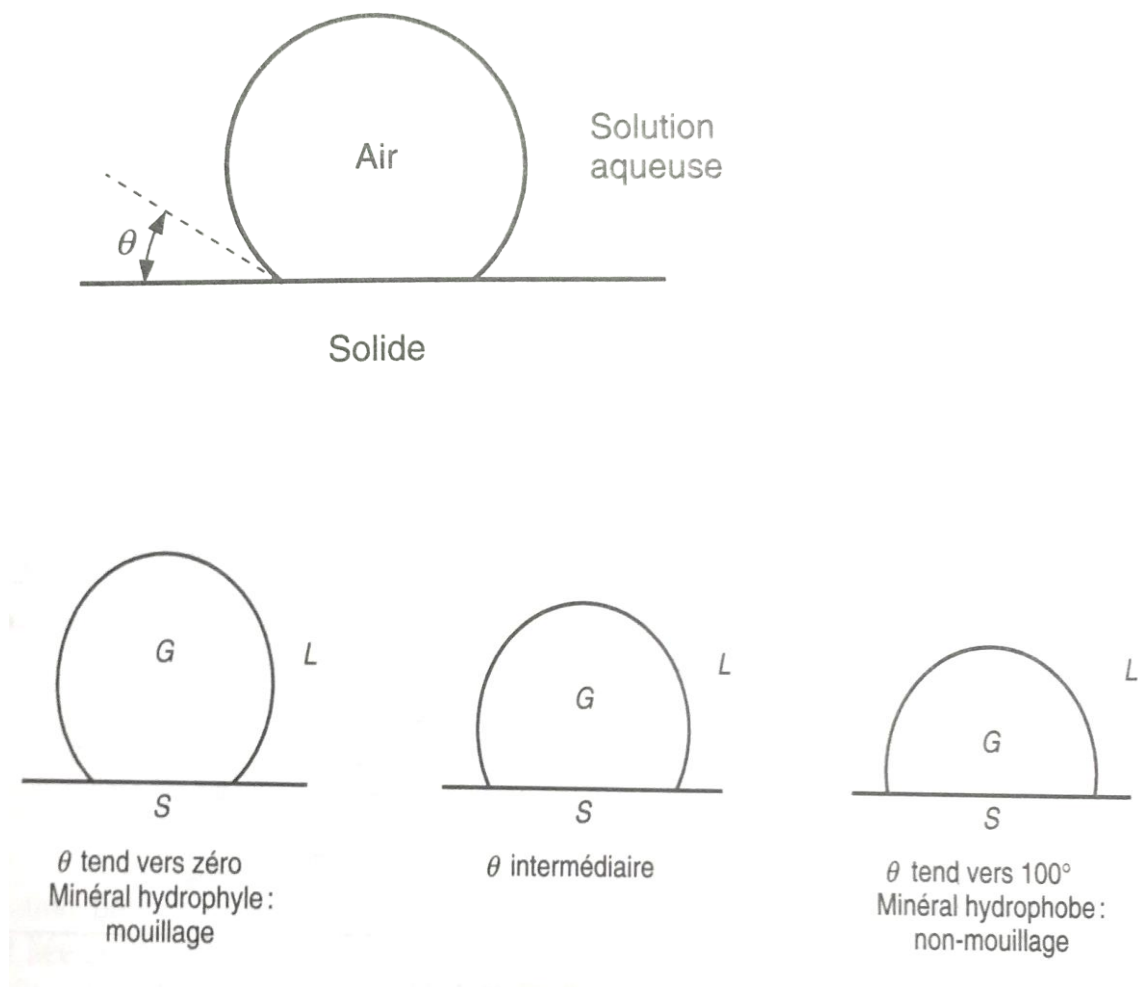


Figure 2. Hydrophobicité et angle de contact

3.3 Réactifs de flottation

La variation de l'indice de flottation, du nombre et dimensions des bulles d'air et de la solidité de la mousse sont assurés par l'utilisation des réactifs de flottation.

Les réactifs de flottation sont des matières chimiques introduites dans la pulpe pour pouvoir créer la flottation sélective des minéraux. Ils se divisent en deux classes:

Première classe : Les réactifs de flottation agissent sur la surface des minéraux ; en dépendance de leur fonction, ces réactifs se divisent en groupes :

- **Collecteurs** : Ce sont des substances organiques. L'action des collecteurs consiste à diminuer la mouillabilité des surfaces des minéraux par la formation sur leur surface, des pellicules hydrophobes qui contribuent à une meilleure adhérence des particules aux bulles d'air.
- **Déprimants (dépresseurs)** : Ces réactifs sont utilisés afin de diminuer la flottabilité des minéraux de la roche stérile ou de diminuer la flottabilité des minéraux qui doivent passer en produits de cellule. Les déprimants empêchent la fixation des collecteurs sur la surface des minéraux.
- **Activants** : Ils contribuent à la fixation des collecteurs sur la surface des minéraux.
- **Régulateurs de milieu** : Ils sont utilisés afin de créer les conditions favorables lors de la flottation. Leur destination principale est le réglage de la composition des ions dans la pulpe. Les régulateurs exercent une influence sur les procédés d'action des collecteurs, des activants et des déprimants avec les minéraux.

Deuxième classe : Les réactifs de flottation agissent sur la surface de séparation gaz-liquide.

- **Moussants**: ils contribuent à la dispersion de l'air qui est aspiré dans la cellule de flottation et il contribue à la formation d'une mousse stable et solide

3.3.1 Collecteurs

Afin de comprendre l'action du collecteur on doit connaître sa constitution et sa classification.

Les minéraux ayant les surfaces non polaires ou faiblement polaires possèdent la flottabilité naturelle ; Le nombre de ces minéraux est limité, c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser les collecteurs pour augmenter l'hydrophobie de la surface des minéraux.

La molécule du collecteur doit comprendre d'un côté une partie non polaire pour assurer l'hydrophobie de la surface et de l'autre côté, une partie polaire pour se fixer sur la surface des minéraux.

Les collecteurs sont divisés en trois grandes catégories : ce sont les collecteurs non ionisés et non polaires (hydrocarbures) ; ensuite viennent les collecteurs anioniques et enfin les collecteurs cationiques (figure 3).

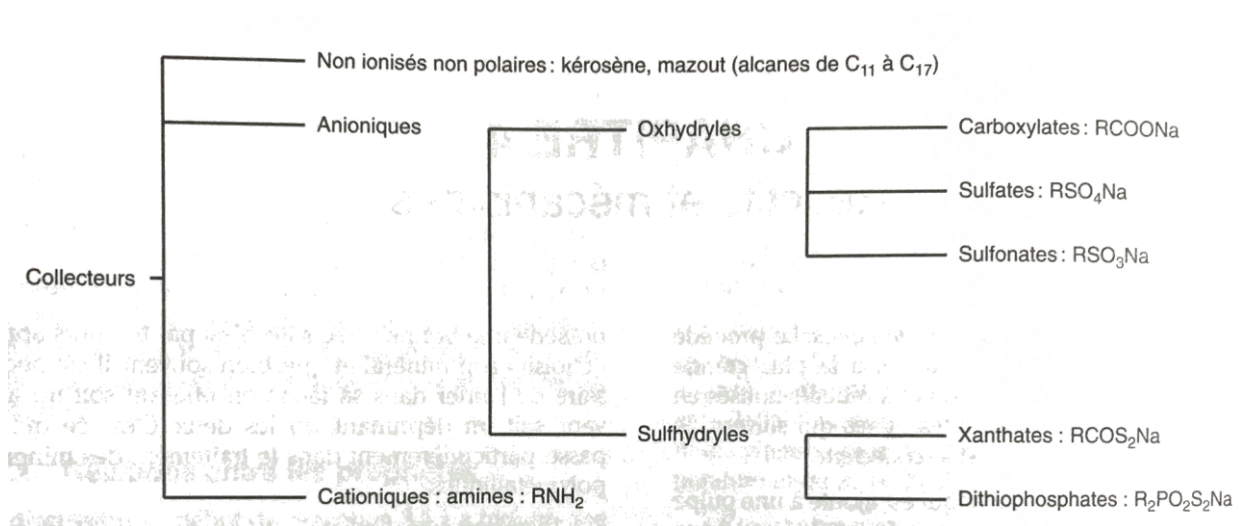


Figure 3. Classification générale des collecteurs

En qualité de collecteur, on utilise des combinaisons hétéropolaires. La partie polaire de la molécule du collecteur caractérise la possibilité du collecteur de se fixer sur la surface polaire des minéraux. La partie non polaire de la molécule du collecteur caractérise l'hydrophobie de la couche formée. L'autre non-polaire et hydrophile est souvent chargée négativement ou positivement. Les symboles employés sont représentés par la figure 4.

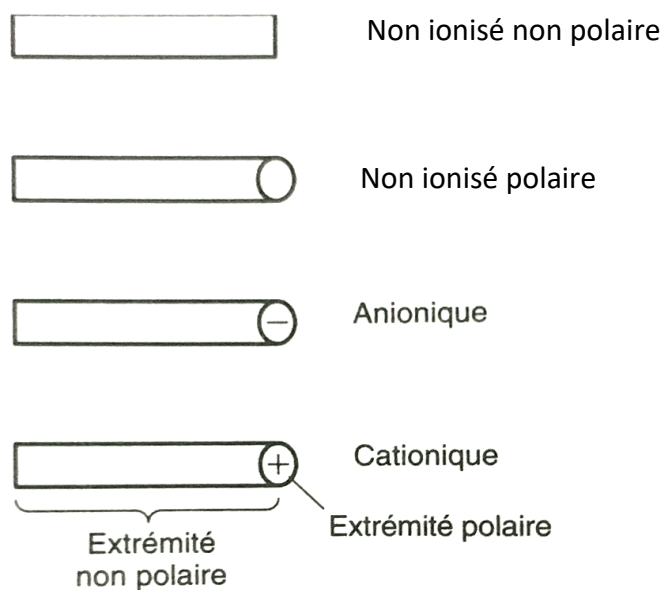


Figure 4. Symboles employés pour schématiser les collecteurs

3.3.2 Activants

Un activant est employé avant d'ajouter le collecteur, pour rendre la surface d'un minéral donné apte à l'absorber. Il y'a quatre cas d'activation :

- la blende par le sulfate de cuivre,
- les silicates par l'ion fluorure,
- le quartz par des ions métalliques,
- les sels insolubles de plomb par l'ion sulfure.

3.3.3 Déprimants

Les agents déprimants sont les produits chimiques sélectifs les plus utiles en flottation. Il y'a des réactifs organiques et inorganiques. Le déprimant permet d'empêcher la récupération d'un minerai donné qui flotterait, sans cela, assez bien avec le collecteur utilisé. Généralement, le minerai devient réfractaire à la flottation par suite de l'accumulation sur sa surface de différents produits hydrophiles, avant que l'action du collecteur puisse se faire sentir. Même dans certains cas, le collecteur déjà absorbé par le minerai est délogé par le déprimant aussitôt que ce dernier est ajouté. Les déprimants les plus connus sont :

- Déprimants des sulfures,
- Déprimants des minéraux non sulfurés.

3.3.4 Régulateurs de milieu

Les régulateurs du milieu exercent leur influence sur la flottabilité des minéraux par voie indirecte, en changeant la composition ionique de la pulpe.

L'action des collecteurs, des activant et des déprimants est déterminée par la composition ionique de la pulpe (La pulpe est alcaline ou acide).

La concentration des ions d'hydrogène désignée par Ph, sert à mesurer l'alcalinité ou l'acidité de la pulpe de flottation.

La fonction des régulateurs du milieu est :

- La régulation du pH de la pulpe
- L'élimination des ions indésirables

La régulation des procédés de dispersion et de la coagulation des schlamms des ions différents sont présents dans la phase liquide de la pulpe; leur composition et leur concentration dépendent de la qualité de l'eau, de la solubilité des minéraux qui sont présents dans le minerai. Parmi eux les ions indésirables sont présents, c'est-à-dire les ions qui créent la condition défavorable pour la flottation. Ces ions sont : les ions qui diminuent la concentration du collecteur dans la pulpe

3.3.5 Moussants

Un agent moussant est un réactif organique hétéropolaires, c'est-à-dire qu'une extrémité de la molécule est polaire et hydrophile, et l'autre est non polaire et hydrophobe. Cette molécule est tensio-active : elle permet, pour de faibles concentrations en solution, d'abaisser la tension interfaciale liquide-gaz à une valeur minimale.

3.3.5.1 Exigences des bulles et à la solidité de la mousse.

Pour l'intensification du procédé de flottation, il faut avoir une grande surface de séparation gaz-liquide car les fixations des minéraux ont lieu sur cette surface.

La valeur de cette surface est déterminée par la quantité de l'air passant à travers la cellule de flottation en unité de temps et par les dimensions des bulles d'air. La surface de séparation gaz - liquide augmente avec la diminution de la dimension des bulles d'air lors de la même quantité d'air passé.

$$S = \frac{K}{d} \quad (4)$$

S Surface spécifique des bulles d'air

K Coefficient de proportionnalité

d diamètre moyen des bulles d'air

La diminution de la dimension de la taille de la bulle d'air est limitée par deux conditions :

- La densité de la bulle minéralisée doit être inférieure à la densité de la pulpe.
- Il faut avoir la vitesse d'ascension des bulles minéralisées bien définie

La vitesse optimale d'ascension des bulles d'air minéralisées varie de 5 à 15 cm/s.

La dimension optimale des bulles d'air varie de 0,6 – 1,2 mm.

L'augmentation de la dimension des bulles d'air provoque la diminution de la surface de séparation gaz – liquide. Elle diminue la vitesse de flottation.

La diminution de la dimension des bulles d'air diminue la vitesse d'ascension des bulles d'air ainsi que la vitesse de flottation.

Les bulles d'air minéralisées forment sur la surface de la pulpe une couche de mousse minéralisée. Cette mousse se détruit avec la vitesse définie. La mousse qui se détruit vite s'appelle la mousse fragile.

La mousse qui se détruit lentement s'appelle mousse visqueuse. Lors des mousses fragiles, la quantité du concentré augmente et le degré d'extraction du minéral flottant diminue parce que les bulles minéralisées se détruisent vite et les particules du minéral et de la roche stérile tombent au fond. Elles se rencontrent encore avec les bulles minéralisées qui remontent ; les particules hydrophobes se collent aux bulles minéralisées. Si on a une mousse visqueuse, le degré d'extraction est grand, mais la quantité du concentré diminue. Les exigences à la solidité de la mousse sont déterminées par la destination de l'opération de flottation. Lors de la flottation principale et de contrôle, il faut avoir une mousse visqueuse (pour augmenter le degré d'extraction $\Rightarrow$ diminuer les pertes).

3.3.5.2 MOUSSANTS UTILISES DANS L'INDUSTRIE

En qualité des moussants on utilise les combinaisons organiques avec les molécules hétéropolaires. C'est-à-dire une partie de la molécule est le radical hydrocarbure et l'autre partie polaire

Les moussants comme les collecteurs se classent en deux groupes :
Ionogènes et non-ionogènes.

Les moussants non ionogènes se divisent à leur tour en deux groupes : Moussants anioniques et moussants cationiques.

Les exigences aux moussant dépendent du cycle de flottation où ils sont utilisés (flottation sélective et flottation collective)

D'après leur action de flottation, les moussants se divisent :

- ◆ Moussants qui agissent sélectivement (ils ne possèdent pas l'action du collecteur).
- ◆ Moussants qui agissent non sélectivement (ils possèdent l'action du collecteur).

Les moussants du premier type sont utilisés lors du cycle de flottation sélective c'est-à-dire lors de la séparation des minéraux avec la flottabilité proche

Les moussants du 2^{eme} type sont utilisés lors du cycle de flottation collective.

Les moussants agissant sélectivement sont :

Crésol $\text{CH}_3\text{C}_6\text{OH}$ (alcool) : On utilise ce moussant lors de la séparation du minerai polymétallique (El Abed – Ain Barbare – Kherzet Youcef). La consommation est de 50 à 150 g/tonne (le crésol est toxique)

Alcool cyclique (cycloneosanol) : La même consommation (50 à 150 g/tonne) utilisés pour les minéraux polymétalliques

Les moussants agissant non sélectivement sont :

Les alcools aromatiques 50 à 200g/tonne. Leur représentant idéal est l'huile de pin.