

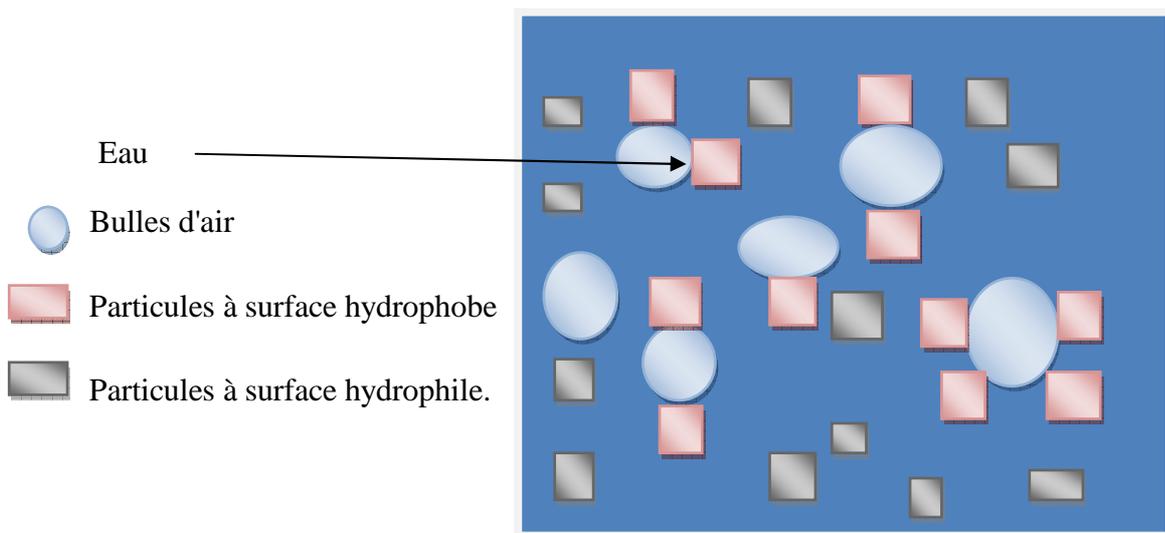
## 1. METHODE DE VALORISATION PAR LA FLOTTATION

### 1.1. Principe de la flottation

La flottation est, sans aucun doute, le procédé le plus important parmi les différentes techniques employées pour le traitement de minerai. Cette technique polyvalente permet le traitement de plusieurs minerais complexes (plomb-zinc, cuivre-zinc, ...), de sulfures (cuivre, plomb, zinc, ...), d'oxydes (hématite, cassitérite, ...), de minéraux oxydés (malachite, cérusite, ...) et même de minerais non-métalliques (fluorite, phosphates, charbon, ...). Grâce à la flottation, il est possible de concentrer de façon économique des minerais pauvres dont le traitement ne serait pas rentable en utilisant les techniques de concentration gravimétrique.

Le principe de la flottation est basé sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides. Ces propriétés peuvent être naturelles ou stimulées à l'aide d'un réactif approprié qui est ajouté dans l'eau où baignent les particules solides. Lorsque de l'air est introduit sous forme de petites bulles dans un tel milieu, il se produit un transport sélectif des particules hydrophobes. Les particules présentant des surfaces hydrophobes se fixent aux bulles d'air lorsqu'elles entrent en collision avec elles (figure 01). Ce phénomène est dû à la grande affinité des surfaces hydrophobes pour l'air dont la nature est non-polaire. Les bulles d'air entraînent ces particules jusqu'à la surface de la pulpe où elles forment une mousse chargée. Par contre, les particules présentant des surfaces hydrophiles ne se lient pas aux bulles d'air et restent en suspension dans la pulpe.

Les produits de la flottation sont le concentré et le rejet. La couche de mousse qui flotte sur le dessus du liquide et qui est chargée de substances utile constitue le concentré. La pulpe restante constitue le rejet qui est composé de rejet (flottation directe).



**Figure 01** : Fixation des particules à surface hydrophobe aux bulles d'air

La pulpe doit être préparée adéquatement en fonction des substances à concentrer et cette préparation repose principalement sur l'ajout de différents agents. Les moussants, les collecteurs, les déprimants

et les activants sont des réactifs de flottation. La stabilité de la mousse est assurée par les moussants. Les collecteurs ont pour fonction d'adhérer aux surfaces afin de les rendre hydrophobes alors que les déprimants rendent les surfaces hydrophiles. Les activants altèrent les surfaces des particules afin de les rendre plus susceptibles à l'action d'un collecteur. L'activité de la plupart de ces réactifs dépend du pH du milieu, il est donc important de corriger la valeur du pH en fonction des réactifs utilisés.

Les principaux équipements de flottation sont la cellule de flottation et la colonne de flottation. Les circuits de flottation sont aussi composés de réservoirs de conditionnement et de cellules d'attrition qui servent à la préparation de la pulpe.

Naturellement, des pompes sont nécessaires au transport de la pulpe d'un équipement à l'autre. Les particularités de ces équipements sont décrites dans les sections qui suivent.

L'utilisation de la flottation est appropriée pour le traitement de particules dont la taille est comprise entre **5 et 212  $\mu\text{m}$** . Cependant, pour les minéraux légers comme le charbon la limite supérieure est élevée à **1,70 mm**. La limite supérieure est dictée par la capacité limitée d'une bulle à soulever un poids. À masse volumique égale, la flottation des grosses particules nécessite des bulles plus volumineuses que la flottation de petites particules. Cette limite est aussi imposée par le détachement des grosses particules de la bulle à laquelle elles sont accrochées. Le détachement est causé par les forces de friction entre l'eau et le solide durant l'ascension du complexe bulle/particules. En effet, les grosses particules subissent davantage l'effet de la friction que les petites particules puisque que leur surface est plus grande. Le diamètre des bulles est une caractéristique très importante puisqu'il détermine aussi la surface disponible pour l'adhésion des particules hydrophobes. La surface totale disponible augmente avec la réduction du diamètre des bulles.

En conséquence, il est important de procéder à la classification de la pulpe avant d'accomplir la séparation par flottation. De plus, la présence de particules ultrafines a un effet négatif sur la flottation. Leur présence peut engendrer deux phénomènes, soit une augmentation de la consommation de collecteur et une flottation parasitaire. À cause de leur surface spécifique très élevée, les petites particules produisent un effet dramatique sur la consommation de collecteur. Pour sa part, la flottation parasitaire se traduit par la présence indésirable de particules hydrophiles très fines dans la mousse. Ces dernières sont entraînées accidentellement car elles sont sensibles aux turbulences provoquées par l'ascension des bulles d'air.

### **3.2. Préparation de la pulpe et réactifs de flottation**

La pulpe doit subir une certaine préparation avant la flottation. En minéralurgie, le minerai broyé est habituellement combiné à l'eau pour former une pulpe contenant entre 5 et 50% de solides sur une base massique. Différents agents de flottation sont préalablement ajoutés à la pulpe afin que ses propriétés correspondent aux conditions appropriées à une flottation efficace.

La pulpe doit être exempte de toute agglomération. Comme la flottation est un phénomène de surfaces, ces dernières doivent être entièrement libres.

La première étape de préparation repose donc sur la dispersion des particules à l'aide d'agents dispersants lorsque nécessaire.

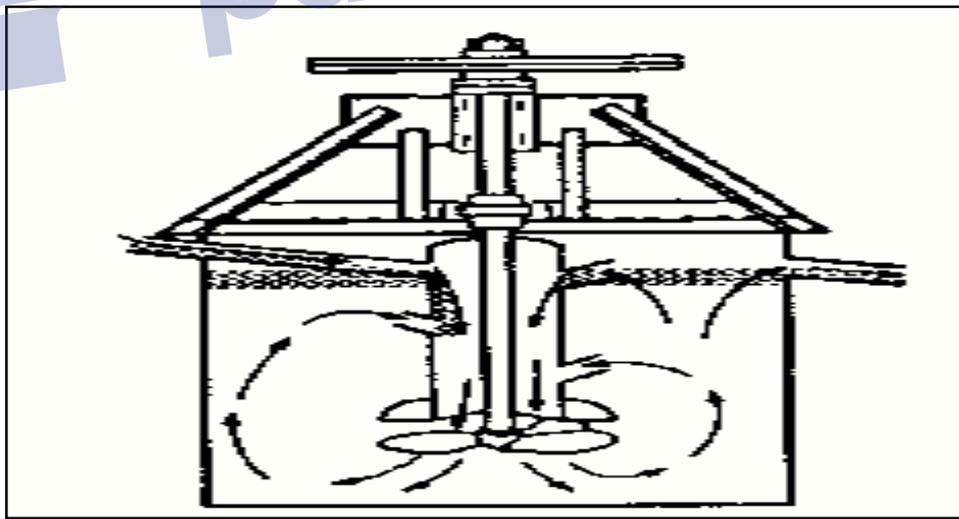
La pulpe est introduite dans un réservoir de conditionnement agité afin d'assurer l'homogénéité du matériel. Les agents dispersants sont habituellement ajoutés dans ce réservoir ou injectés dans la conduite d'alimentation du réservoir. La figure 02 présente un exemple de réservoir de conditionnement.

Le réservoir de conditionnement peut parfois être remplacé par une cellule d'attrition lorsqu'une agitation plus violente est requise.

L'attrition a pour fonction de détacher les particules fines qui adhèrent aux grosses particules et de nettoyer les particules qui les enrobent par friction des particules les unes contre les autres. En traitement de minerai, l'attrition est effectuée afin de libérer les surfaces de la couche d'oxydation qui peut les enrober.

L'équipement qui accomplit cette tâche est constitué d'un réservoir muni de deux axes d'agitation sur lesquels sont fixées deux hélices (figure 02). La vitesse de rotation des axes est très élevée afin d'assurer une agitation intense. Pour que l'attrition soit efficace, la densité de la pulpe doit être relativement élevée.

Lorsque les minéraux qui doivent être concentrés ne sont pas hydrophobes de façon naturelle, des agents de flottation appelés collecteurs sont ajoutés. Les collecteurs sont des molécules organiques ou des ions qui sont adsorbés sélectivement sur certaines surfaces afin de les rendre hydrophobes. Ce sont donc les agents de flottation les plus importants et les plus critiques.



**Figure 02** : Réservoir de conditionnement Denver (source: Wills, 1988).

### 3.3. Réactifs de flottation

**3.3.1. Les collecteurs** sont généralement des composés hétéropolaires. Comme il est possible de le constater à la figure 03, la partie polaire est adsorbée à la surface de la particule tandis que la partie non polaire est orientée vers l'extérieur afin d'exposer une surface hydrophobe (Gill, 1991).

L'activité des collecteurs varie grandement en fonction du pH. Celui-ci doit être ajusté par l'ajout d'une base ou d'un acide. La valeur optimale de pH dépend de la nature du minéral qui doit être concentré par flottation ainsi que du collecteur utilisé. Les conditions optimales de pH sont habituellement prescrites par les manufacturiers de collecteurs. Une telle précaution a souvent pour conséquence de diminuer considérablement la consommation de collecteur (Kelly et Spottishwood, 1982).

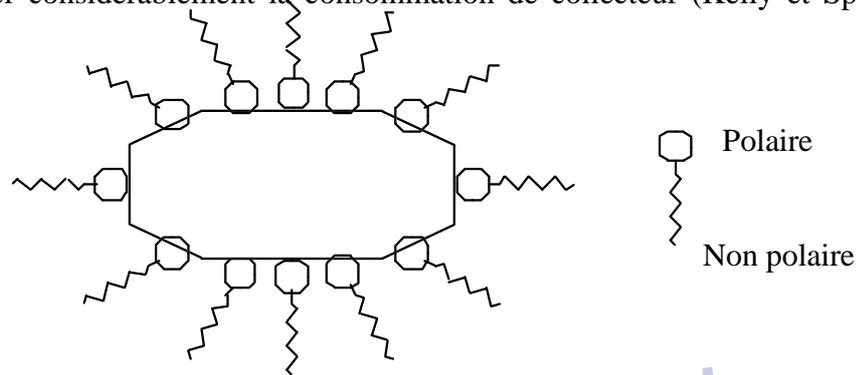


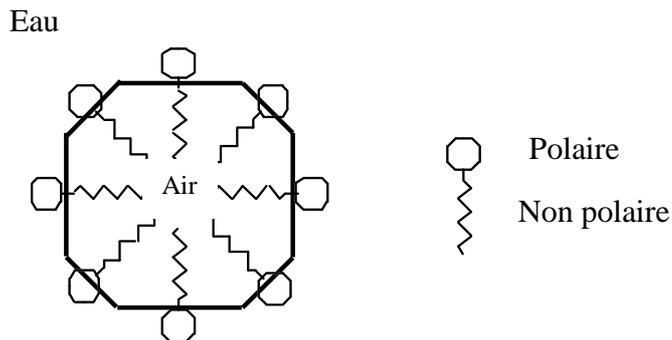
Figure 03 : Mode d'action d'un collecteur

**3.3.2. Les déprimants** sont des composés inorganiques dont l'action consiste habituellement à enduire les surfaces d'une façon sélective dans le but de les rendre plus hydrophiles et de diminuer leur affinité pour les collecteurs. L'utilisation des déprimants augmente la sélectivité de la flottation en prévenant la flottation des particules indésirables. L'activité des déprimants varie en fonction du pH de la pulpe.

**3.3.3. Les activant** sont généralement des sels solubles qui s'ionisent en milieu aqueux. Les ions en solution réagissent avec les surfaces pour favoriser l'adsorption du collecteur. Les activant sont utilisés lorsque les collecteurs et les moussants ne parviennent pas à accomplir la flottation adéquatement. Comme dans le cas des collecteurs et des déprimants, l'activité des activant varie en fonction du pH du milieu.

**3.3.4. Les moussants** sont des agents tensioactifs hétéropolaires de nature organique qui sont adsorbés aux interfaces air/eau (bulles). Les molécules des moussants comportent une tête polaire orientée vers l’eau et une queue non-polaire orientée vers l’air. Le mode d’action d’un moussant est présenté à la figure 04.

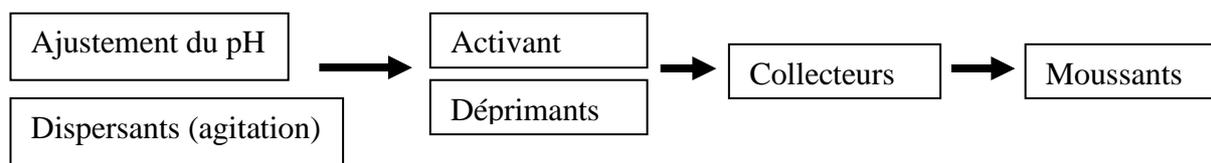
Les deux principales fonctions des moussants sont d’assurer une dispersion de bulles fines dans la pulpe et de maintenir une stabilité adéquate de la mousse qui flotte à la surface de la pulpe. En effet, la mousse doit être suffisamment stable dans le but d’éviter la décantation (sédimentation) des particules hydrophobes dans la pulpe. Par contre, une mousse trop ferme aura pour effet de nuire au traitement subséquent du concentré obtenu par la flottation.



**Figure 04 :** Mode d’action d’un moussant

Les différents réactifs de flottation peuvent être ajoutés simultanément dans le réservoir de conditionnement. Cependant, l’efficacité de la flottation est accrue lorsque l’addition de chaque réactif est effectuée par étapes successives.

L’ordre dans lequel ces étapes doivent être effectuées est présenté à la figure 05. Cet ordre est établi en fonction de la nature et de la fonction des réactifs.



**Figure 05 :** Ajout des réactifs de flottation durant la préparation de la pulpe.

### 3.4. Équipements de la flottation

#### 3.4.1. Les cellules de flottation

Les cellules de flottation font partie des équipements mécaniques de flottation. Elles sont composées d’un réservoir muni d’une turbine entourée de chicanes dont une des fonctions est d’assurer l’homogénéité de la pulpe (voir figure 06). L’air est alimenté dans le système par l’axe de la turbine. L’aération peut être effectuée de façon autonome grâce à la rotation très rapide de la turbine qui produit une pression négative et aspire l’air. L’aération peut aussi être produite à l’aide d’une soufflante à faible pression. L’air qui est introduit dans le système est violemment dispersé la pulpe sous forme de fines bulles grâce à l’action de la turbine et des chicanes.

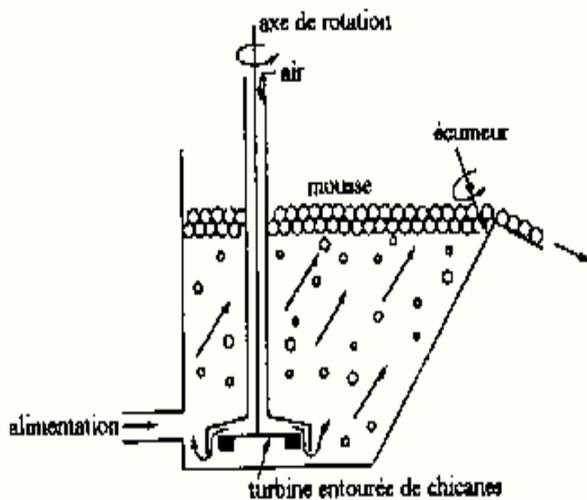


Figure 06 : Section transversale d'une cellule de flottation (Gill, 1991)

La finesse des bulles est une caractéristique importante puisqu'elle détermine la surface disponible pour l'adhésion des particules hydrophobes. Le concentré composé de la mousse chargée de particules hydrophobes est récupéré par débordement dans le haut de la cellule. Un écumeur peut faciliter la récupération de la mousse. Pour les flottations opérées en continu, le rejet est soutiré par le bas du réservoir. La flottation en cellule peut être effectuée à petite échelle en laboratoire et à l'échelle industrielle. À l'échelle industrielle, les cellules sont disposées en série pour former des bancs de cellules. Un exemple de banc de cellules est présenté à la figure 07.

La pulpe est introduite dans le premier réservoir où une partie des particules hydrophobes est récupérée dans la mousse. Ensuite, la pulpe est introduite dans le deuxième réservoir où d'autres particules hydrophobes sont récupérées. Le procédé est répété d'une cellule à l'autre jusqu'à la dernière cellule où très peu de particules hydrophobes sont récupérées. Le rejet sortant de cette dernière cellule est constitué de la matrice relativement décontaminée. Le niveau de la pulpe augmente d'une cellule à l'autre, ce qui diminue simultanément l'épaisseur de la couche de mousse.

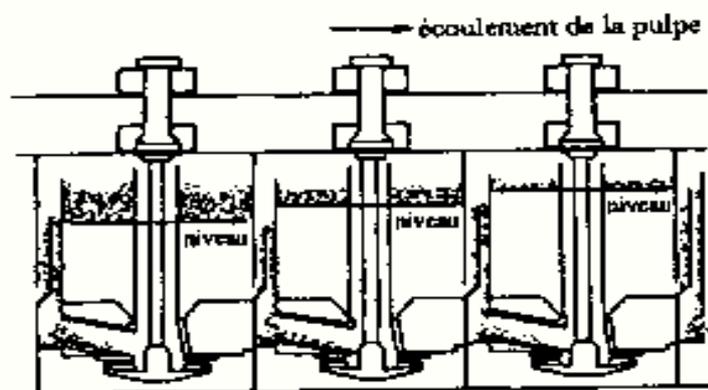


Figure 07 : Banc de cellules de flottation (source: Wills, 1988)

La couche de mousse de la dernière cellule est la plus mince car elle est très pauvre en particules. Les circuits de flottation peuvent être composés de plusieurs équipements de flottation en série ou en parallèle. Les termes épuisement dégrossissage et nettoyage sont utilisés pour décrire les différentes fonctions des équipements de flottation. La capacité des cellules de flottation varie en fonction du volume du réservoir et peut s'élever jusqu'à 3800 m<sup>3</sup>/h pour une pulpe comportant 25% de solides d'une masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup>

**3.4.2. Les colonnes de flottation**

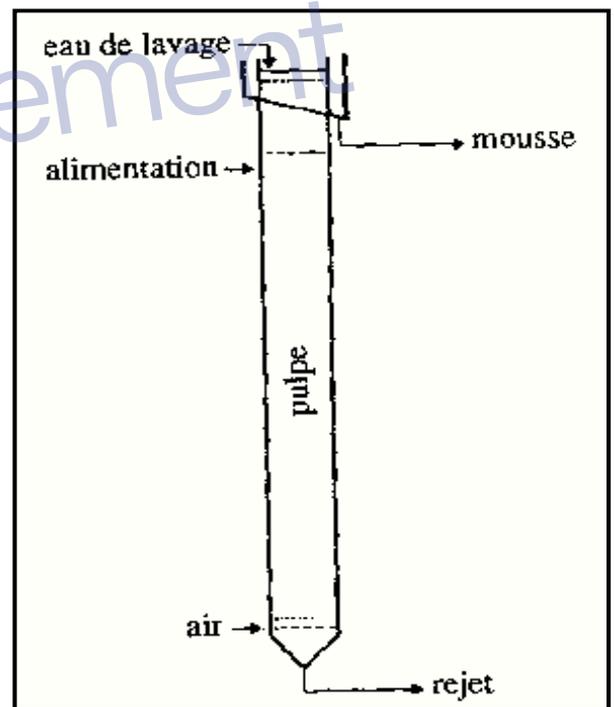
Les colonnes de flottation font partie des équipements pneumatiques de flottation. Elles ont été développées récemment et sont particulièrement efficaces pour traiter les particules fines. Leurs coûts d'achat et d'opération sont avantageusement bas

Les colonnes de flottation sont principalement composées d'un long tube vertical (figure 08). L'air est alimenté dans le système l'aide d'un diffuseur qui disperse l'air sous pression en de fines bulles. La pulpe est alimentée par pompage dans la colonne. Le point d'alimentation se situe à 1/3 du haut de la colonne et délimite les deux zones qui caractérisent le fonctionnement de

La zone inférieure se distingue par un mouvement à contre-courant qui favorise le contact entre les bulles d'air ascendantes et les particules. Les particules entre en collision avec les bulles et adhèrent à celles-ci lorsqu'elles sont de nature hydrophobe.

Les bulles d'air chargées continuent leur ascension jusqu'à la zone supérieure. Cette partie constitue la zone de lavage. En effet, un jet d'eau de lavage est vaporisé sur la mousse qui flotte en haut de la colonne. L'eau qui s'écoule au travers de la mousse entraîne les particules indésirables afin d'assurer leur retour parmi la pulpe.

Le concentré (mousse) est récupéré par débordement en haut de la colonne et le rejet est soutiré par pompage en bas. Le débit de soutirage du rejet doit être plus élevé que le débit d'alimentation afin de favoriser la circulation de la pulpe vers le bas. Une telle circulation assure le mouvement à contre-courant dans la partie inférieure de la colonne.



**Figure 08 :** Colonne de flottation (Wills, 1988)

**3.5. Conditions d'application**

L'utilisation des équipements de flottation est limitée par des conditions spécifiques quant à l'intervalle granulométrique à l'intérieur duquel ils fonctionnent de façon efficace. Le tableau suivant résume ces conditions d'application et présente la capacité maximale de chaque équipement accompagnée de son appréciation qualitative. Les unités de capacité dont il est question dans ce tableau doivent être interprétées comme des tonnes métriques de solide sec par heure. De plus, les

valeurs de capacité s’appliquent uniquement au traitement de minerai et peuvent varier pour les applications environnementales.

Il est important de souligner que, même si l’intervalle granulométrique est le même pour les deux équipements, l’efficacité des colonnes de flottation est beaucoup plus élevée que celle des cellules dans la portion la plus fine de l’intervalle en question.

De plus, la limite supérieure de l’intervalle peut augmenter en présence de matériel léger (masse volumique faible) comme le charbon.

**Tableau 01** : Application et capacité des appareils de flottation.

Appareil Intervalle	granulométrique	Capacité maximale	Appréciation de la Capacité
Cellule de flottation	5 µm à 212 µm	1130 t/h	* très élevée
Colonne de flottation	5 µm à 212 µm	70 t/h	** moyenne

\* Pour une pulpe constituée à 25% de solides (base massique) d’une masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, 3800 m<sup>3</sup>/h 1130 t/h

\*\* Pour une pulpe constituée à 25% de solides (base massique) d’une masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, 230 m<sup>3</sup>/h 70 t/h.

**3.6. Circuits de flottation**

Le critère de sélection prioritaire pour le choix d’un type de circuit de flottation est avant tout un critère économique, qui prend en compte prioritairement le coût d’investissement et le coût de la maintenance. Le coût d’investissement I étant fonction croissante du volume V de la cellule ( $I \pm kV^{0,66}$ ), on préfère pour un volume global donné, quelques grandes cellules à de nombreuses petites cellules dont, en outre, les coûts d’installation et les frais proportionnels sont moindres. Ainsi, pour un concentrateur de 30 000 t/j, on passe par exemple de quelques centaines de cellules à moins de 40, quand on choisit des cellules de 30 m<sup>3</sup> au lieu de cellules de 2,5 m<sup>3</sup>

. Les cellules de 30 m<sup>3</sup> peuvent être assemblées en bancs de 4 à 10 cellules, voire de 16 à 20. Le nombre de cellules par banc est un compromis entre la distribution du temps de séjour et

les exigences économiques pour chaque cas étudié.

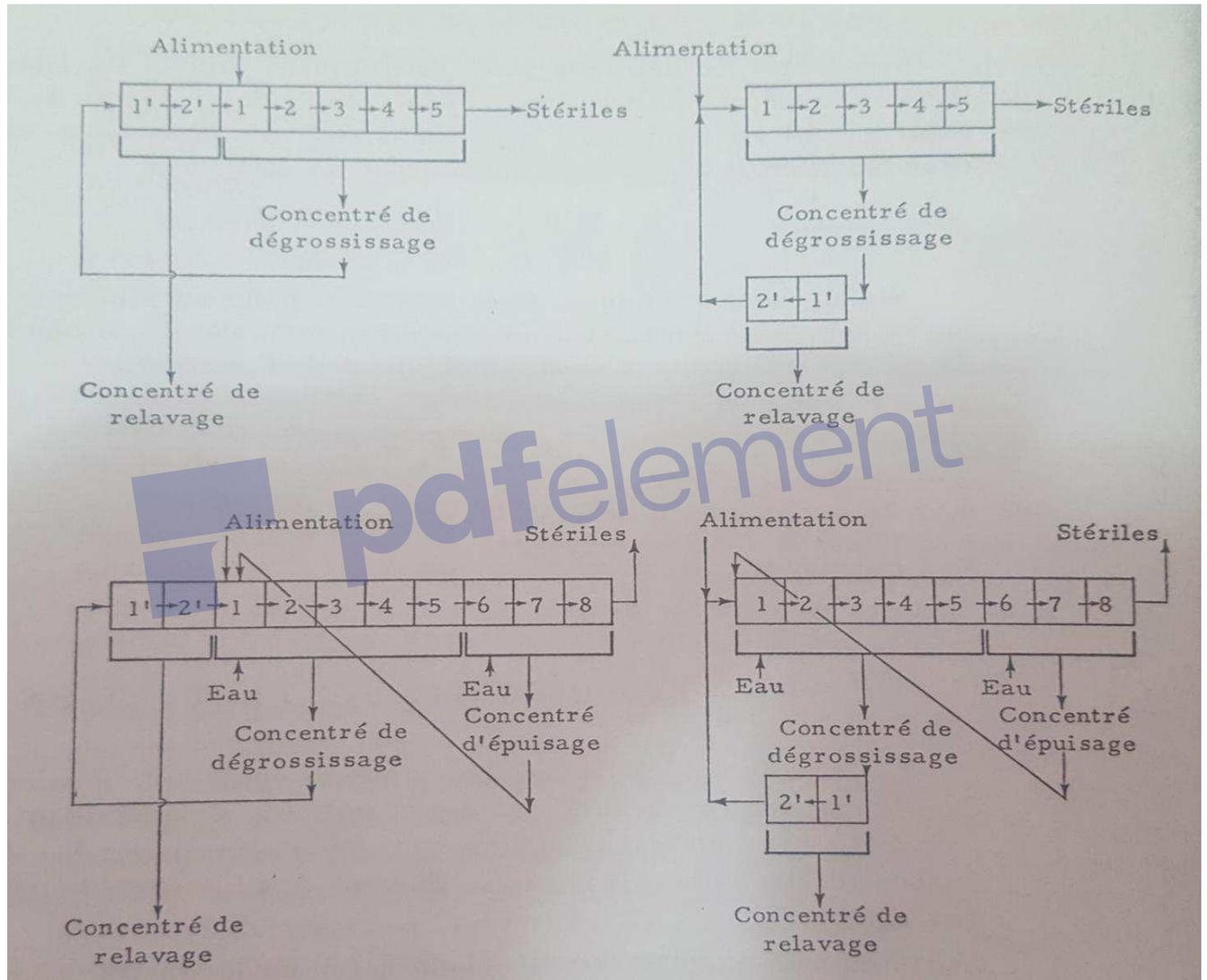
**3.6.1. Circuits simples**

**a/ cas d’un seul produit flotté**

Pour la flottation d’un seul minéral, la figure 10 donne le schéma de principe, qui comprend généralement :

le circuit principal, composé d’un banc de dégrossissage I (roughing ) et d’un banc d’épuisage II (scavenging ) ;

— le circuit de relavage, qui retraite le concentré de dégrossissage dont la teneur n'est pas à la valeur requise. Ce relavage (cleaning) peut être réalisé en une ou plusieurs étapes (deux dans l'exemple de la figure 10). Les rejets du circuit de relavage sont recyclés vers le circuit principal. Le nombre de cellules de relavage est généralement faible, car le but de cette étape est de produire un concentré riche. La tendance générale est d'effectuer le relavage avec des cellules de grandes dimensions. Dans le cas de minéraux industriels non ferreux, pour lesquels on recherche la pureté (barytine, fluorine), on regroupe dégrossissage et épuisage et on augmente le nombre d'étages de relavage.



**Figure 09.** Circuit de flottation à un seul produit flotté avec cellules de dégrossissage (1, 2,3,4,5), d'épuisage (6,7,8) et de relavage (1', 2').

**b/ cas de plusieurs produits flottés**

La figure 11 présente le schéma de flottation pour un minerai de plomb, zinc et cuivre. Après dépression du Zn dans le broyeur, on flotte un concentré global de Pb/Cu, qui est retraité par dépression du Pb et flottation du Cu. Les non-flottés du circuit Pb/Cu subissent un conditionnement pour activer Zn, que l'on flotte ensuite comme s'il s'agissait d'un minerai à un seul produit.

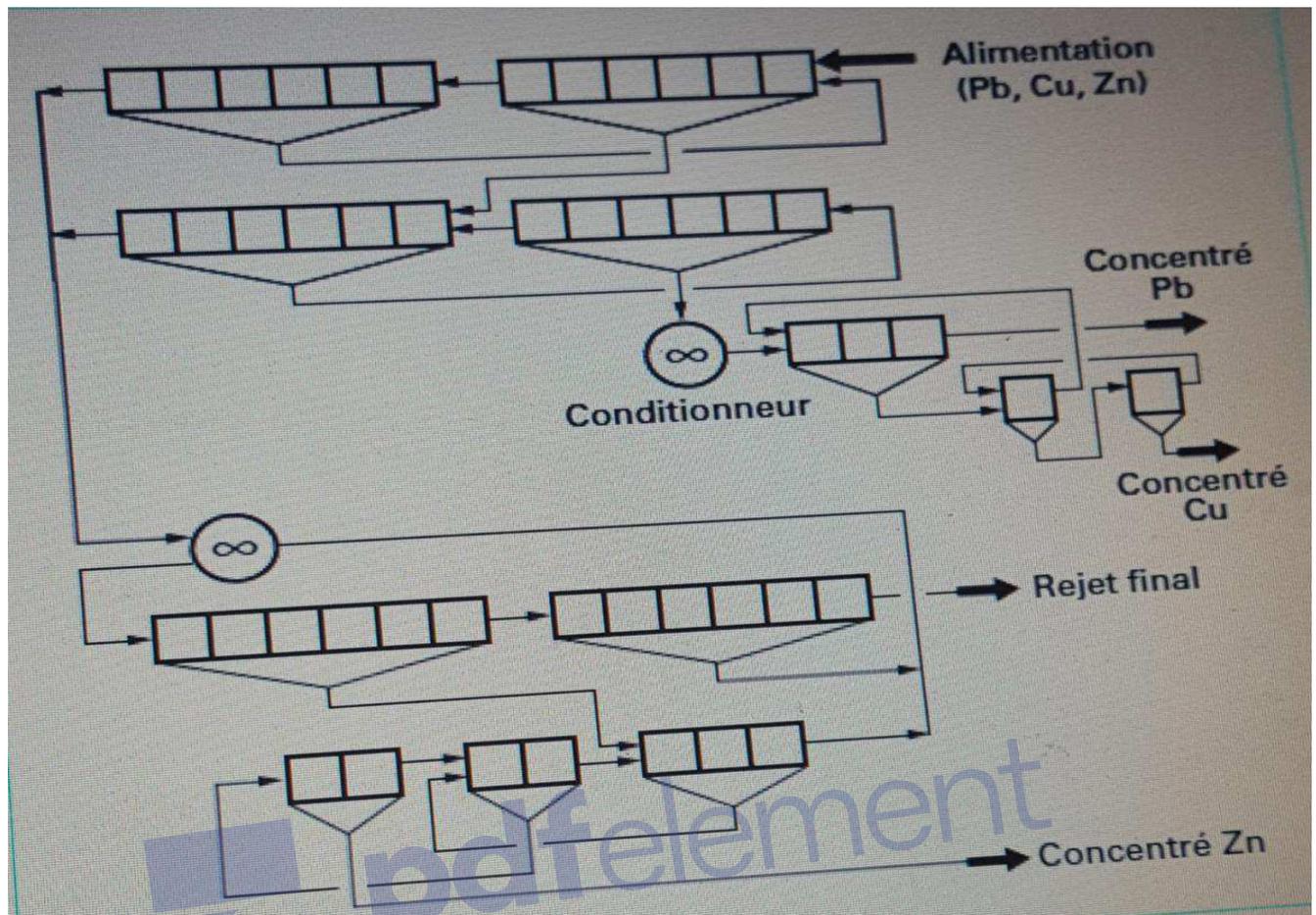


Figure 10- Exemple de circuit de flottation pour trois produits

### 3.6.2. Circuits complexes

Comportent, en plus des circuits de flottation proprement dits, diverses opérations qui visent à changer les caractéristiques physiques et chimiques des pulpes minérales :

- **Rebroyage** est effectué sur des concentrés ou des rejets. Dans le premier cas, il s'agit d'obtenir des concentrés plus riches, dans le deuxième, d'augmenter la récupération du métal. Le rebroyage est réalisé en circuit fermé avec une classification par hydrocyclone, sur des concentrés de dégrossissage et/ou d'épuisage. La surverse du cyclone est ensuite reflottée dans un circuit de relavage pour donner un concentré définitif. Ce type de schéma devient vite compliqué lorsqu'il s'agit de récupérer plusieurs produits, mais le rebroyage d'une faible partie du minerai, constituée d'un préconcentré, permet des gains substantiels sur les consommations énergétiques comparées à celles entraînées par un broyage poussé de toute la matière avant flottation.

- **Déschlammage**, qui consiste à éliminer les fines particules gênantes, est réalisé dans la plupart des exploitations par hydrocyclones avant l'entrée du circuit de flottation. Il évite le phénomène d'adagulation et une consommation élevée de réactifs.

- **Epaississage**, réalisé dans des décanteurs-épaisseurs peut jouer le rôle de tampon et de régulation, en permettant de stocker une quantité importante de pulpe entre deux étapes de traitement. Il peut aussi avoir pour but de changer l'eau dans des procédés complexes, où l'on utilise des réactifs incompatibles entre eux.

- **Grillage des produits** est souvent utilisé pour détruire le revêtement de collecteur sur les concentrés de flottation globale. C'est le cas des concentrés mixtes de chalcopirite et de molybdène.

- **Chauffage de la pulpe** a en générale pour but d'accroître la solubilité des minéraux et des réactifs. Il est souvent appliqué à la flottation de la fluorine. Le chauffage correspondant parfois à la dépression de la barytine associée. Dans d'autre cas, le collecteur, fixé sur le concentré mixte cuivre-molybdène, est détruit par ébullition. La pulpe est en suite traitée par flottation pour séparer molybdène et chalcopirite.

- **Mise en solution** différentielle de certaines espèces minérales et la précipitation du métal peuvent permettre, dans le cas des minerais de cuivre, une flottation globale des espèces cuprifères naturelles et artificielles. Ce procédé est le procédé L.P.F. (Leaching Precipitation and Flotation). Il a pour but de rendre flottable le cuivre oxydé dont seulement 10% sont récupérés par une flottation classique de chalcopirite et de chalcosite en circuit alcalin.

Dans une première phase, le cuivre, sous forme oxydé, est mis en solution après attaque acide qui s'agit pratiquement sur les sulfures de cuivre ;

Dans une deuxième phase, le cuivre en solution est précipité par sulfuration, ou sous forme de cuivre cémenté sur une éponge de fer ;

Dans une troisième phase, le cuivre est flotté, soit sous forme de sulfure de cuivre à pH 10, soit sous forme de métal à pH 3,5.

- Combinaison gravité et flottation comme dans le cas du traitement de l'association scheelite-pyrrhotine : après flottation de la pyrrhotine, un tablage permet d'obtenir un concentré de scheelite à haute teneur, la flottation sur les rejets du tablage produisant un concentré de scheelite à base teneur. De même, la gravité permet de récupérer des minéraux lourds partiellement libérés à une taille grossière.

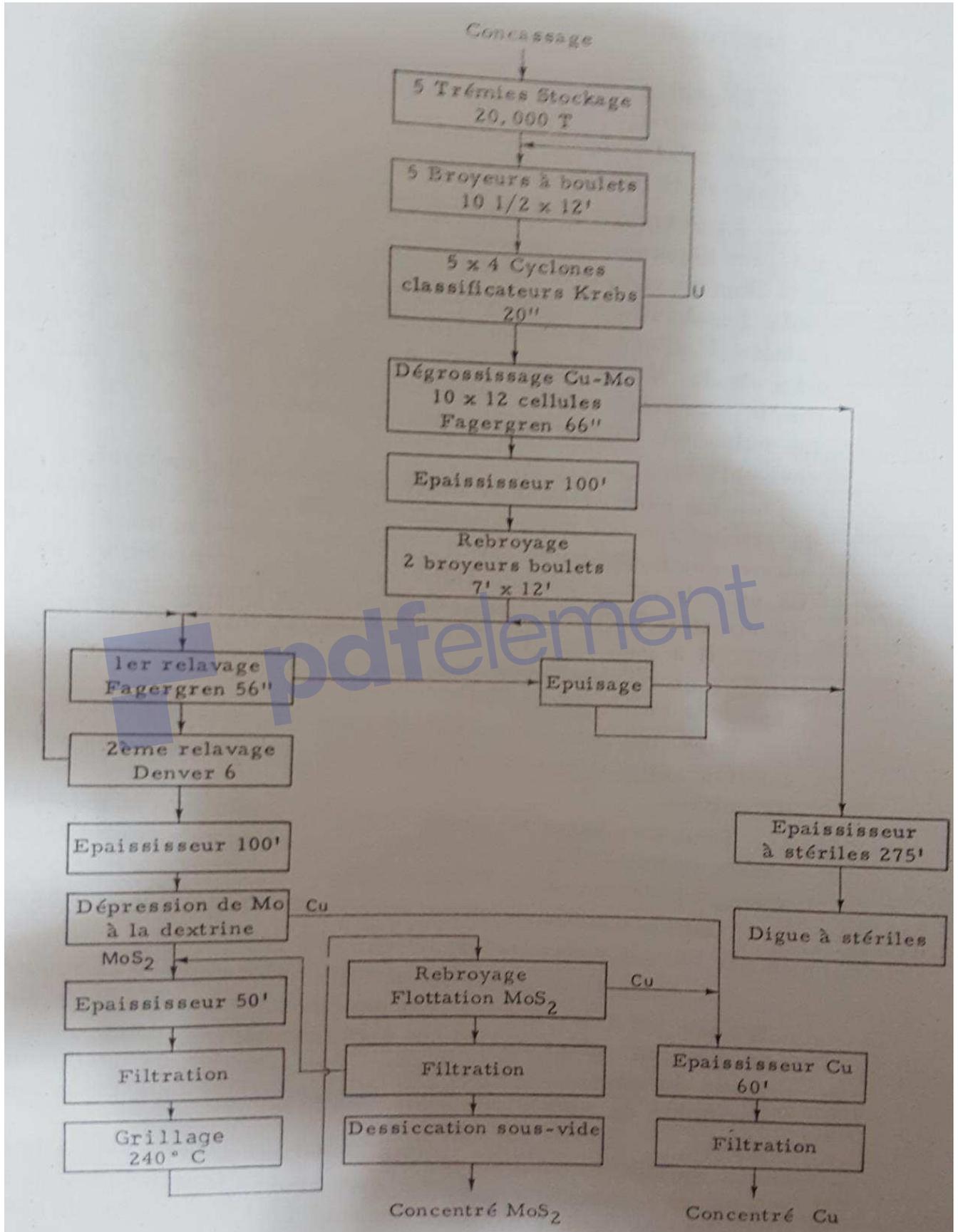
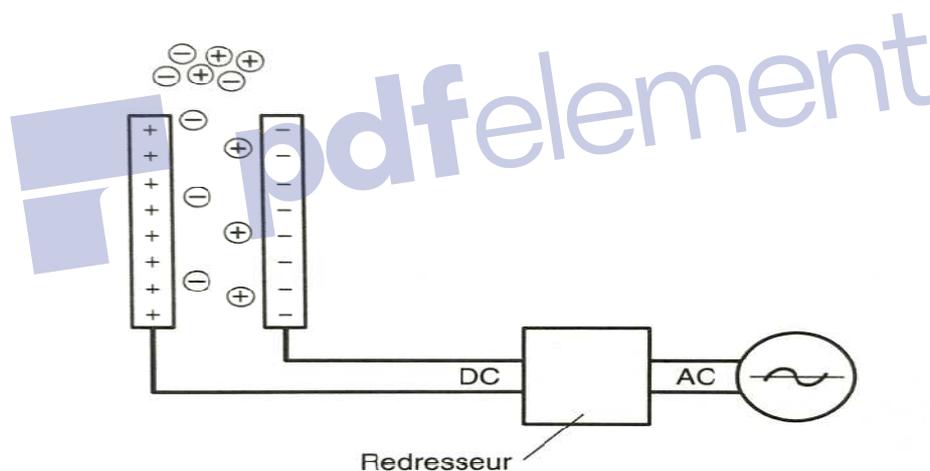


Figure 11. Schéma de traitement à Silver Bell (Asarco)

**SEPARATION ELECTROSTATIQUE****4. Méthodes électrostatiques**

Lorsqu'une particule chargée électriquement est à proximité d'une électrode positive et d'une électrode négative, elle sera attirée par celle qui est de signe contraire et repoussée par celle qui est de même signe. La figure 1 illustre ce comportement ainsi que la nécessité d'utiliser une tension continue pour un traitement électrostatique; autrement, le changement de signe systématique du plus au moins, caractéristique des tensions alternatives, ferait changer du plus (+) au moins(-) le signe de chaque électrode, de sorte qu'un traitement serait impossible

La séparation électrostatique est une séparation physique basée sur les différences en propriétés électrostatiques des particules minérales. Parmi les méthodes électrostatiques les plus utilisées actuellement sont les méthodes électrophorétiques et les méthodes électrodynamiques sont les plus populaires.



**Figure 1.** Principe de base du traitement électrostatique

**4.1. Méthodes électrodynamiques**

Avec une méthode électrodynamique, 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 de mise à la masse, qui est un tambour en mouvement de rotation. L'électrode chargeante est disposée parallèlement à la largeur du tambour (voir la figure 1).

Le courant passe dans un milieu particulièrement isolant, l'air, ainsi, lorsqu'on augmente graduellement la tension électrique entre les deux électrodes séparées par l'air, aucun courant ne passe jusqu'à ce qu'on atteigne une tension critique, qui peut être de plusieurs dizaines de milliers de volts,

au-delà de laquelle un faible courant circule, situé entre 15  $\mu\text{A}$  et 22 mA, pour environ 1,5 m de largeur de tambour.

L'électrode chargeante émet des ions généralement des électrons. A sa proximité, les gaz s'ionisent du même signe que les électrons, puis se dirigent vers le tambour mis à la masse. Dès lors, les particules qui sont transportées par le tambour en rotation sont toutes chargées négativement par les gaz ionisés.

Or, les particules n'ont pas toutes le même comportement après qu'elles ont été chargées. Pour les unes, aussitôt acquise, la charge est perdue au profit du tambour, qui est un récepteur d'électrons en quantité presque infinie. Ce sont les particules conductrices. Pour d'autre, au contraire, la charge acquise est retenue presque indéfiniment. Ces dernières sont non-conductrices. Notons qu'il s'agit ici de conductivité de surface, c'est-à-dire que les charges sont principalement localisées à la surface des particules plutôt qu'à l'intérieur de tout leur volume.

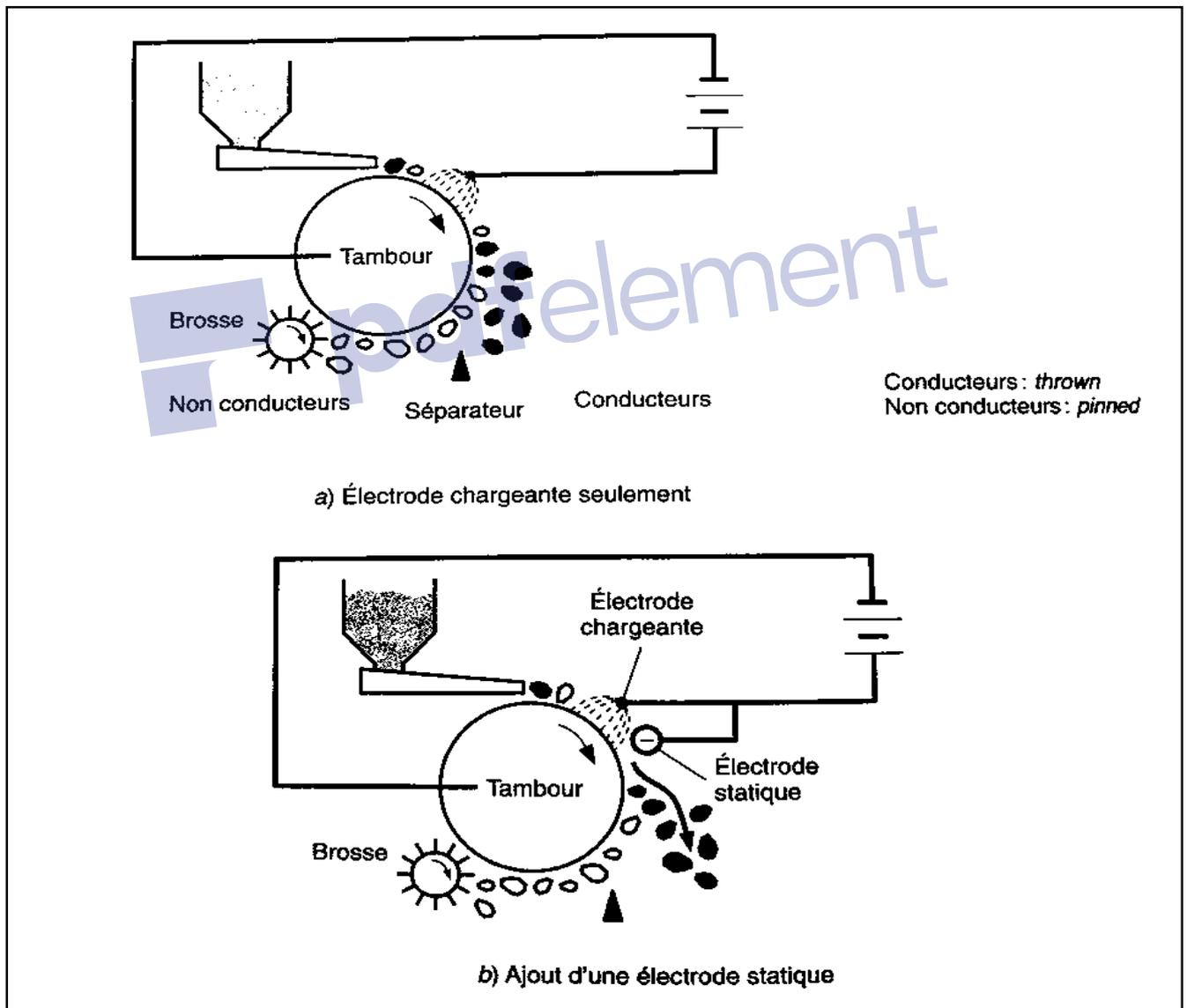


Figure 2. Méthodes électrodynamiques

Les forces auxquelles sont soumises les particules conductrices et non conductrices, lorsqu'elles sont en contact avec la surface du tambour en rotation sont représentées par la figure 3. Les principales forces sont :

**F<sub>a</sub>** : force d'attraction électrostatique entre le tambour mis à la masse, donc par définition ici la charge positive, et les particules chargées négativement ;

**F<sub>r</sub>** : force de répulsion entre l'électrode chargeante négative et les particules chargées négativement ;

**F<sub>g</sub>** : force d'attraction gravitationnelle = m . g ;

**F<sub>e</sub>** : force d'attraction entre une particule mise à la masse et l'électrode chargeante ;

**F<sub>cf</sub>** : force centrifuge ; elle dépend du rayon  $R$  du tambour, de sa vitesse de rotation (rpm) et de la masse (m) des particules ;  
cette force vaut :

$$F_{cf} = m \cdot v_t^2 / r$$

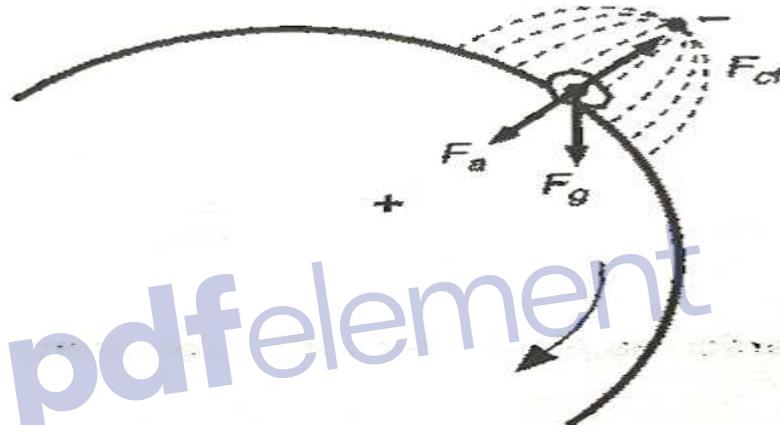
Or:

$$v_t = 2\pi r \cdot (\text{rpm})$$

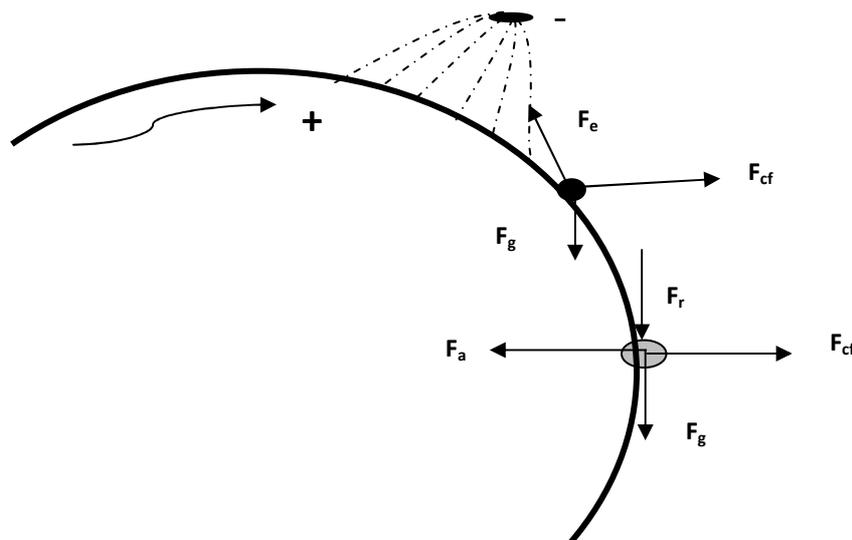
Donc:

$$F_{cf} = K \cdot m \cdot (\text{rpm})^2 \cdot R$$

Où K est une constant.



a) dans la zone d'écoulement du courant



b) hors la zone d'écoulement du courant

**Figure 3.** Forces en jeu dans une séparation électrodynamique

Les particules conductrices acquièrent rapidement la même charge que le tambour, de sorte que les forces  $F_{cl}$  et  $F_e$  leur permettent de s'en dégager et de s'en éloigner rapidement. Par contre pour les particules non- conductrices, la force  $F_a$  prédomine, elles adhèrent si fortement au tambour que l'utilisation d'une brosse métallique est nécessaire pour les décollées.

#### 4.2. Méthodes par induction

Cette méthode diffère de la méthode précédente par la technique de chargement des particules. L'électrode est dimensionnée de façon telle que le courant qui circule de l'électrode chargeante au tambour est négligeable (de l'ordre de  $10 \mu A$  pour chaque 1,5 m de largeur de tambour). L'acquisition d'une charge par les particules est donc nulle. Ainsi, l'électrode chargeante s'appelle électrode inductrice, puisqu'elle induit une polarisation de la surface des particules.

Une particule polarisée à une surface dont une moitié est positive et l'autre est négative. Ainsi, l'électrode inductrice, si elle est négative, force les particules qui passent dans son champ d'action à devenir relativement positives sur la moitié de leur surface qui est orientée vers elle, et relativement négatives sur la moitié en contact avec la surface du tambour mis à la masse. Il s'agit bien de charge relative, c'est-à-dire que les électrons contenus dans les minéraux fuient le côté exposé au champ négatif pour migrer de l'autre côté.

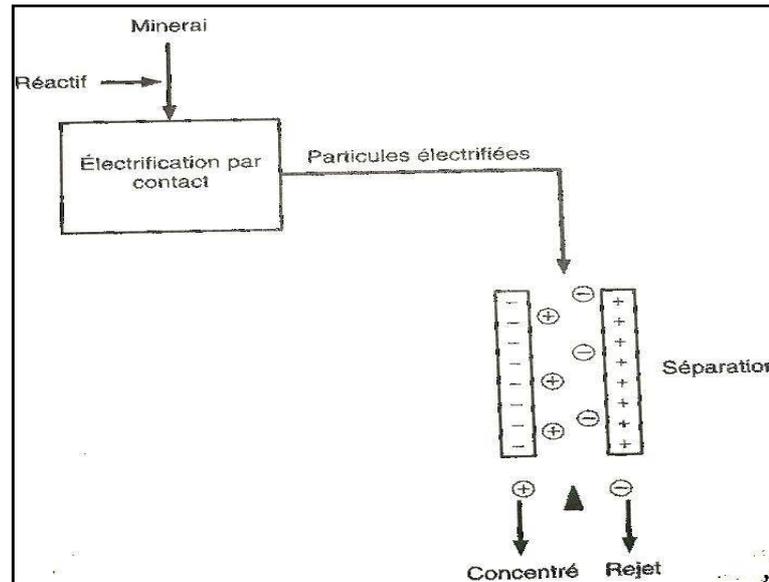
Or, les minéraux conducteurs, s'ils prennent moins de temps à acquérir leur polarisation, ont une certaine difficulté à le garder, et, sitôt dépassée la zone d'influence de l'électrode inductrice, ils perdent rapidement leur polarisation, de sorte que la force centrifuge les fait décoller facilement de la surface du tambour.

Mais les minéraux non conducteurs, au contraire, même s'ils prennent plus de temps à se polariser, le restent beaucoup plus longtemps une fois sortis de l'influence de l'électrode inductrice, puisque le courant de surface créé par la migration des électrons est faible. La charge négative qu'ils ont développée du côté du tambour positif cause une attraction électrostatique qui dure longtemps, de sorte qu'ils restent collés au tambour plus longtemps aussi.

Les forces d'attraction ou de répulsion électrostatiques sont beaucoup plus fortes avec les méthodes électrodynamiques qu'avec les méthodes par induction.

#### 4.3. Electrification par contact

Lorsque deux minéraux différents sont mis en contact un certain temps, il peut se produire un transfert d'électrons d'un minéral à l'autre, de telle sorte que le minéral A, par exemple, se charge positivement, et le minéral B se charge négativement. La règle de Cohen permet de prévoir le comportement de deux minéraux mis en contact. Selon cette règle, lorsque deux matériaux diélectriques sont mis en contact pour être ensuite séparés, celui qui possède la constante diélectrique la plus élevée devient, en comparaison, chargé positivement. Une fois les charges acquises, l'ensemble de particules est alimenté entre deux électrodes, ce qui permet de séparer les minéraux.



**Figure 5.** Séparation de minéraux électrisés par contact

L'électrification par contact se fait dans des récipients tels les cyclones par voie sèche, dans lesquels le conditionnement des surfaces s'effectue avant la séparation électrostatique proprement dite.

#### 4.4. Méthodes par diélectrophorèse

Le principe d'une méthode par diélectrophorèse. Lorsque deux minéraux non chargés sont en mouvement à travers un champ électrostatique non uniforme (très peu de courant), il se produit une séparation entre les deux minéraux. Celui qui est le meilleur conducteur possède la constante diélectrique la plus élevée et est le plus facilement polarisable ; il est attiré là où la densité de flux électrique est la plus élevée. Celui qui possède la constante diélectrique la moins élevée suit le chemin de l'attraction gravitationnelle.

Sur la figure, on voit un tambour en mouvement de rotation qui trempe dans un liquide dont la constante diélectrique est située entre celles des deux minéraux à séparer. Le gradient de densité de flux électrique est produit en appliquant une tension de plusieurs milliers de volts sur un grand nombre de fils de petit diamètre situés sur le pourtour du tambour et parallèlement à sa largeur, ils constituent une des deux électrodes. L'autre électrode est constituée par une grille à travers laquelle passent les particules non polarisables. Plusieurs séparations par diélectrophorèse sont possibles, comme avec le mélange rutil-quartz, pour lequel le liquide utilisé est un mélange de nitrobenzène et de kérosène.

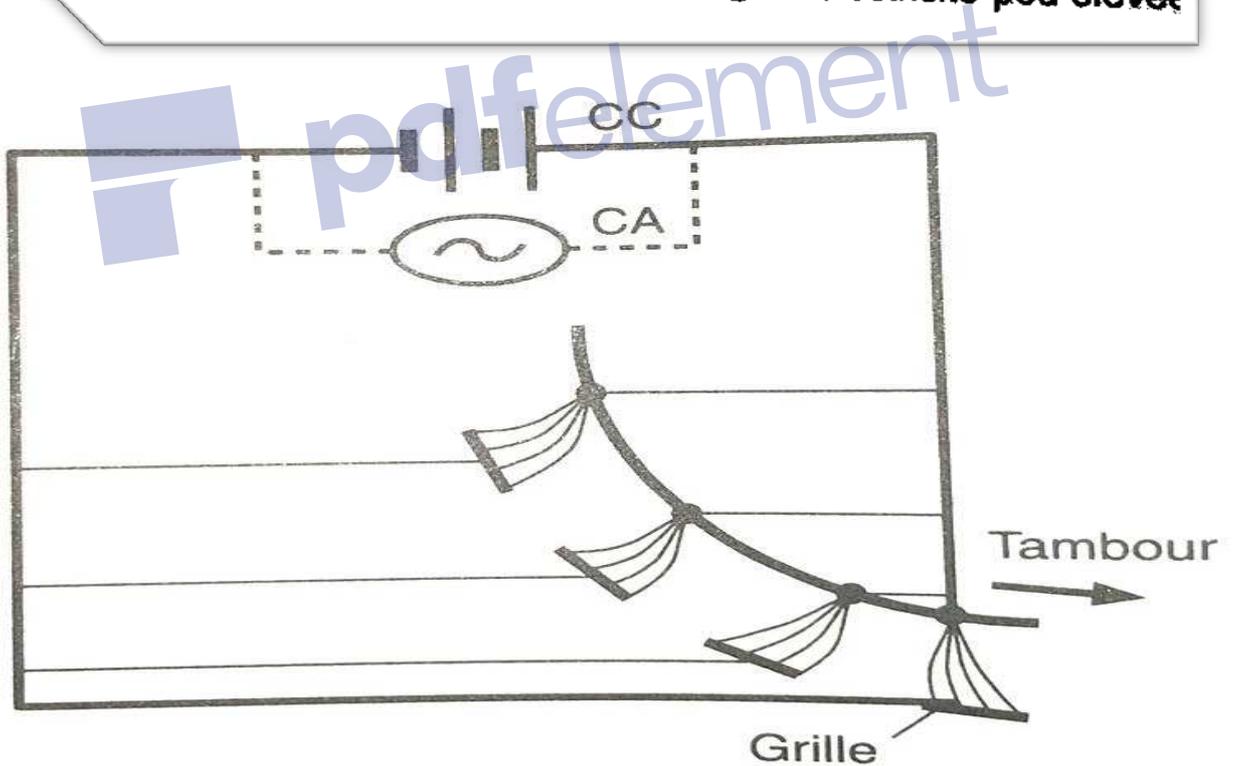
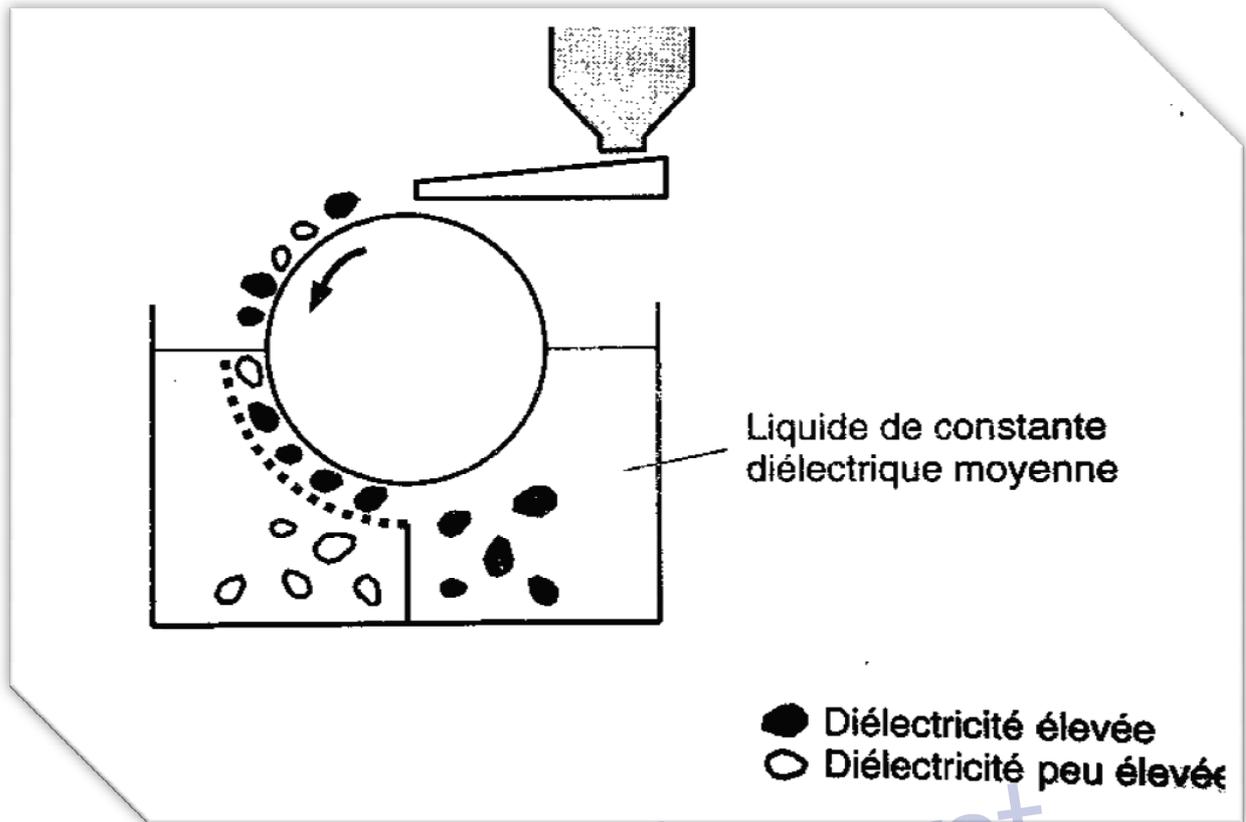


Figure 5. Méthodes par diélectrophorèse