

CHAPITRE IV. GENERALITES SUR LA FLOTTATION

Introduction

La flottation est la méthode la plus utilisée dans une industrie. Elle nécessite plusieurs paramètres à respecter et l'utilisation des réactifs appropriés.

IV.1. NOTION THEORIQUE [1], [13], [20]

➤ *Notion de la tension superficielle et d'hydrophobicité :*

La tension superficielle est définie comme étant une force opposée à une force que provoque la rupture de surface. Chaque fluide a sa tension superficielle propre et elle est constante.

Dans le cas où un solide se trouve en présence d'un liquide et d'un gaz (ou air), les phénomènes superficiels sont régis par la détermination des valeurs relatives des diverses tensions superficielles entre les surfaces de séparation solide-gaz, solide-liquide, liquide-gaz et des angles des vecteurs qui représentent ces forces. L'un de ces angles, celui formé par le solide et le plan tangent à la surface du liquide en un point de contact du liquide, du solide et du gaz, a un intérêt particulier dans l'étude de ces phénomènes. Il est appelé « angle de contact » ou « angle de raccordement θ ».

D'autre part, la notion d'hydrophobicité de surface a une importance majeure dans la compréhension du phénomène de la flottation, qui est le contact entre une bulle d'air et la surface d'un solide dans un liquide, elle peut être conçue relativement de manière simple lorsqu'on s'attache au modèle de la figure ci après :

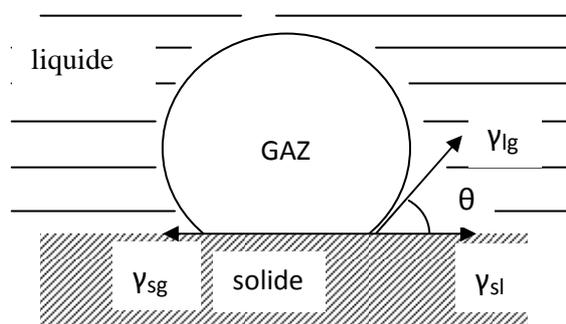


Figure N°11: Interface liquide-solide-gaz

Avec :

- γ_{sg} : tension superficielle solide-gaz

- γ_{lg} : tension superficielle liquide-gaz
- γ_{sl} : tension superficielle solide-liquide

A cause de l'attraction moléculaire, il existe une tendance interfaciale entre le liquide et le solide que nous appellerons γ_{sl} , une autre entre le liquide et le gaz soit γ_{lg} et enfin entre le solide et le gaz γ_{sg} .

Les conditions d'équilibres sont données par l'égalité suivant :

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

D'où l'équation de l'Young :

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{sg} - \gamma_{sl})}{\gamma_{lg}} \quad (2)$$

Les phénomènes ont lieu lorsque les bulles d'air approchent une surface hydrophobe : on observe une rupture de la couche d'eau, qui devient instable et la rapidité de l'hydrophobicité dépend de l'angle de contact.

Donc, pour avoir une bonne flottabilité, il est nécessaire que la fixation d'une particule solide à une bulle d'air soit bonne, c'est-à-dire que θ le plus grand possible.

- Si $\theta = 0^\circ$, les particules solides sont mouillables, donc non flottables
- Si $0^\circ < \theta < 90^\circ$, les particules solides sont plus ou moins mouillables
- Si $\theta > 90^\circ$, les particules solides sont hydrophobes ou non mouillables, on a donc une bonne flottabilité.

L'angle de contact caractérise donc la tendance qu'à un solide de se de laisser mouiller par un liquide.

La flottation n'est possible que pour les substances non mouillées par l'eau et celles rendues hydrophobes.

En effet, les particules non mouillées par l'eau s'accrochent aux bulles d'air et sont ramenées en surface sous forme d'écume minéralisée.

➤ *Mouvement ascendant :*

Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds Re est une quantité caractérisant la nature d'écoulement du fluide. D'où la formule est la suivante :

$$Re = \frac{(\rho_f \cdot u \cdot D_p)}{\mu_f} \quad (3)$$

Avec :

ρ_f : masse volumique du fluide en $[kg / m^3 \text{ ou } g / cm^3]$

u : vitesse de la particule solide supposée en [m / s ou cm / s]

D_p : diamètre de la particule solide supposée sphérique en [m ou cm]

μ_f : viscosité du fluide en poiseuille [Ps]

Le régime d'écoulement varie suivant la valeur de Re :

- $Re \leq 2$, correspond à un écoulement laminaire ou régime de Stokes

- $2 < Re < 500$, correspond à un écoulement intermédiaire ou régime d'Allen

- $Re \geq 500$, correspond à un écoulement intermédiaire ou régime de Newton

Dans le mouvement ascendant, les valeurs de Re convenables pour une flottation correspondent à un écoulement laminaire, c'est-à-dire $Re \leq 2$

IV.2. LES REACTIFS DE FLOTTATION [13], [20]

Comme on l'a décrit, les valeurs des tensions superficielles et de l'angle de contact qui conditionnent le phénomène de flottation, varient avec la nature physique et chimique de la surface du solide et la composition de la solution aqueuse. C'est ainsi qu'il faut améliorer les propriétés hydrophobes et hydrophiles des constituants au moyen de réactifs chimiques. Ces réactifs chimiques additifs qu'on utilise sont :

➤ **Les moussants**, ce sont des substances qui stabilisent l'écume de surface contenant les matières hydrophobes, afin d'en faciliter la collecte.

De plus, ce sont des réactifs ayant pour rôle de favoriser la formation et la stabilité des bulles.

Les principaux moussants utilisés en flottation de la silice sont les suivants :

- huiles de pin
- huile d'eucalyptus
- huile essentielle de niaouli

➤ **Les collecteurs** ce sont des agents qui augmentent spécifiquement le caractère hydrophobe des particules à flotter. Toutefois, les collecteurs sont introduits dans la pulpe pendant la phase de conditionnement pour qu'ils soient efficaces.

On peut faire l'essai de la flottation de la silice avec les collecteurs suivants :

- Acide oléique $C_{17}H_{33}COOH$
- Gas-oil

➤ **Les dépresseurs**, à l'inverse des précédents, augmentent la mouillabilité des particules pour empêcher leur flottation. Ces réactifs sont également utilisés à des doses allant de quelques dizaines de gramme à quelques kilos par tonne de minerai, comme pour les activants

Pour la flottation de la silice, on peut employer comme dépression le silicate de sodium Na_2SiO_3

➤ **Les activateurs**, ce sont des réactifs chimiques permettant la sélectivité de l'hydrophobisation entre les différentes phases minérales du minerai. Ainsi, ces réactifs neutralisent l'action d'un déprimeur dans le cas de flottation successive.

Dans le cas de la silice, on peut essayer encore les deux cas suivants :

- Avec activateur (exemple : barytine ou BaSO_4)
- Sans activateur

IV.2.1. Paramètres de flottation

IV.2.1.1. Pulpe

Une pulpe est une solution aqueuse formée du mélange d'eau et du minerai. La concentration normalement admise dans toutes opérations de flottation est de 15 à 20% de matières solides.

IV.2.1.2. Vitesse des bulles d'air

D'après l'équation de Stokes, l'équation de la vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz seulement en régime laminaire dans la zone de séparation est donnée par :

$$v = \frac{\rho_g d^2}{18 (\rho_l - \rho_g)} \quad (4)$$

Avec :

ρ_l : masse volumique du liquide

ρ_g : masse volumique du gaz

d : diamètre de la bulle

Le volume minimal de gaz pour assurer la flottation d'une particule est

$$\frac{V_g}{M_s} = \frac{(\rho_s - \rho_g)}{(\rho_l - \rho_g) \rho_g} \quad (5)$$

D'où :

V_g : volume minimal de gaz

M_s : masse de la particule

ρ_l : masse volumique du liquide

ρ_g : masse volumique du gaz

ρ_s : masse volumique de la particule

IV.2.1.3. Nature et quantités des réactifs :

La pratique de la flottation montre selon la bibliographie l'efficacité d'un nombre réduit des réactifs et cela selon la catégorie des minéraux à flotter (oxydes, sulfures, etc....). La dose pratiquée de ces réactifs influence dans certaines mesures sur le rendement et l'efficacité de séparation par flottation.

IV.2.1.4. Intensité d'agitation :

L'agitation est nécessaire lors de la mise en œuvre de la flottation d'abord pour l'homogénéisation de la pulpe, ensuite sur l'aération provoquant la formation des bulles. L'intensité de cette agitation doit être bien choisie pour éviter la formation des bulles non stables et pour assurer le maximum de chance de l'adsorption de collecteur et de bulles pour la surface des grains à flotter.

IV.2.1.5. Temps de flottation :

Selon les diverses sources bibliographiques, le temps de flottation joue un rôle très important dans la réalisation dans la meilleure condition de phénomène de flottation. En effet, le temps de flottation comporte :

- temps de conditionnement
- temps de moussage, de collection, d'activation et de dépression résumé comme temps de flottation proprement dite

Granulométrie : Comme il s'agit de séparer dans un même minerais, des parties minéralogiquement différents les uns des autres. La granulométrie est un facteur non négligeable pouvant assurer la réussite de la flottation voulue. La notion de diamètre de libération est importante et utile à savoir en flottation.

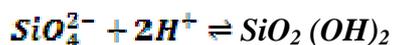
IV.3. PHENOMENES REAGISSANT LA FLOTTATION

IV.3.1. Critère de choix des réactifs

Le choix des réactifs et des procédés mise en flottation sont fonction des différents facteurs qui doivent être pris en compte, notamment :

- La nature de la substance qui doit être concentrée par flottation ;
- Les réactions chimiques mises en jeu ;
- La minéralogie de la substance considérée [20] ;

La silice est classée dans les groupes des oxydes qui ne dissolvent pas dans l'eau. Mais sa surface n'est pas thermodynamiquement stable : l'eau est chimisorbée à la surface de l'oxyde pour donner des groupements très stables $\text{SiO}_2(\text{OH})_2$ selon la réaction :



IV.3.2. Les collecteurs [13], [20]

➤ *Propriétés physiques*

Les collecteurs sont généralement des composés hétéropolaires. Comme il est possible de le constater à la figure [N°11] ci-après, 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.

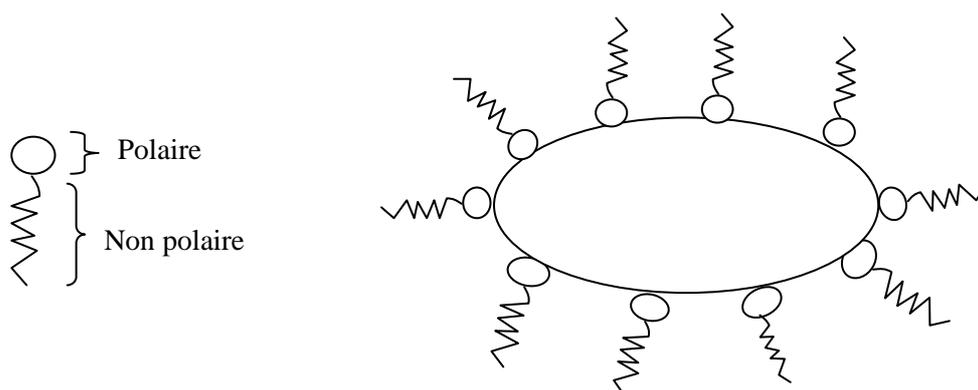


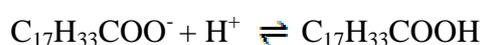
Figure N°12: Mode d'action d'un collecteur

L'activité des collecteurs varie grandement en fonction du pH. Celui-ci doit être ajusté par l'ajout d'une base 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.

➤ *Propriétés chimiques*

En pratique, les collecteurs utilisés sont des molécules organiques possédant une partie polaire, facilement ionisante et une chaîne hydrocarbonée de produit naturel. Ces collecteurs sont hydrolisables.

Exemple : l'acide oléique de type de carboxylate : RCOOH et de vraie formule $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ a comme réaction d'hydrolyse.



IV.3.3. Moussant [20]

Durant la flottation, les moussants interviennent dans le contact entre les bulles et les minéraux rendus hydrophobes et dans la séparation de la phase bulle-particule de la phase liquide-particule.

➤ *Propriétés physiques*

Les moussants sont hétéropolaires de nature organique qui sont absorbés aux interfaces air-eau (bulle). 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 [N°12] suivante :

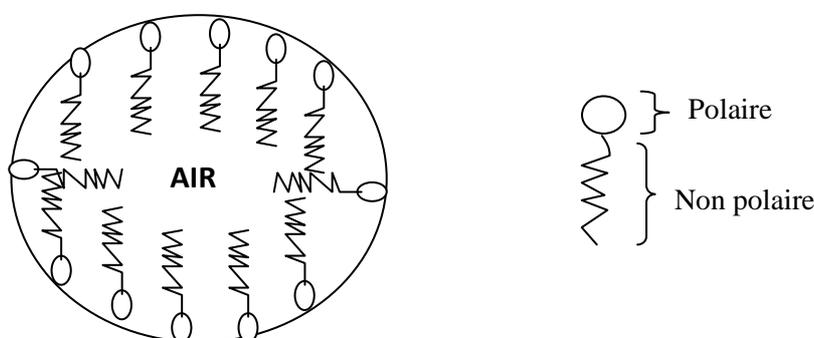


Figure N°13: Mode d'action d'un moussant

Les deux principales fonctions des moussants sont :

- Assurer une dispersion des bulles fines dans la pulpe
- Maximiser 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 relargage des particules hydrophobes dans la pulpe.

➤ *Propriétés chimiques*

Les propriétés moussantes dépendent des propriétés chimiques c'est-à-dire la présence des groupes polaires extrêmement variés qui peuvent être des groupes :

- Hydroxyle -OH
- Carbonyle = C = O
- Carboxyle - C = O
 $\begin{array}{c} | \\ \text{H} \end{array}$
- Amine - NH₂

- Sulfates - OSO_2OH

Il existe une liaison très nette entre le pouvoir moussant et la longueur de la chaîne carbonée pour qu'un agent tensio-actif ait une action effective, il faut que sa chaîne hydrocarbonée présente au moins six atomes de carbone.

IV .3.4 Mécanisme d'adsorption des collecteurs

L'adsorption a été définie comme l'adhérence d'une molécule d'un ion à des corps solides. Un solide en présence d'un gaz pourra donner lieu à des phénomènes d'adsorption. Le mécanisme d'adsorption évolue en fonction de la concentration en collecteur :

- Pour des très faibles concentrations, les ions du collecteur jouent un rôle semblable à celui des contre ions (interactions électrostatiques entre l'adsorbant et l'adsorbât)
- Pour la concentration voisine à des centièmes de la c.m.c. (concentration micellaire critique), la concentration au voisinage de la surface est telle que les ions des collecteurs voient naître des interactions entre leurs chaînes hydrocarbonées.

En général, la concentration du collecteur doit être suffisamment basse pour éviter de former des micelles de surface. Pour le cas de la chromite (de nature oxyde) la surface est susceptible d'absorber les collecteurs ayant de charge de signe opposé sur la partie polaire.

IV.3.5 Données bibliographiques sur les quantités des réactifs pratiquées en flottation des oxydes [2], [13]

Remarque : D'après l'étude bibliographique qu'on a vue, on peut flotter le quartz avec les réactifs indiqués dans le tableau N°06 suivant

Tableau N°06. Réactifs en flottation de quartz

Minerai	Activant	Collecteur
Quartz	Barytine	Acide oléique

Selon d'autre source bibliographique [20] aussi d'autres réactifs peuvent être utilisés

- les collecteurs : le gas-oil, etc.... environ 1ml pour l'échantillon de 2,5Kg)
- les moussants : les huiles essentielles de Niaouli, de pin, d'eucalyptus de quantité environ 70ml.

IV.4. MISE EN ŒUVRE DE LA FLOTTATION

IV.4.1 Condition essentielle : diamètre de libération

Avant toute séparation, il est nécessaire de faire :

- une étude sur lames minces (ou genèse de la silice) afin de connaître le diamètre de libération
- une bonne opération de criblage et de broyage afin que les grains du minerai aient une granulométrie plus homogène.

Notion sur la libération de l'espèce valorisable :

Un minerai est constitué par aux moins deux espèces minérales plus ou moins intimement associées. Supposons que le minéral, symbolisé par le carré ABCD, soit fragmenté en 100 parties égales. La silice est symbolisée par un carré dont la surface est seize fois inférieure à la surface totale.

Tableau N°07. Libération de la silice

A B

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

C D

Source : Pierre Blazy [13]



Les morceaux symbolisés par les carrés 33 et 43 sont constitués essentiellement par la silice. Les morceaux symbolisés par les carrés 23, 24, 32, 34, 35, 42, 44 et 54 sont des mixtes minéralogiques constitués par la silice et la chromite. Ainsi bien qu'une réduction amenant à des fragments seize fois plus petits ait été appliquée au matériau originel ABCD, seuls deux fragments sont constitués par la silice pure. Il faudrait pousser à l'extrême la fragmentation de l'espèce minérale pour atteindre la libération totale. Par conséquent, la « maille de libération totale » qui est le diamètre de libération ou la dimension à laquelle toutes les espèces valorisables sont libérées de leur gangue n'est qu'une vue idéale du problème. Cette libération économique correspond à une maille de fragmentation appelée « maille de broyage ». Et pour résoudre ce problème, il faut faire une étude sur lames minces.

En effet, une fois connu ce diamètre de libération, l'analyse granulométrie s'avère nécessaire pour le repérer et pour connaître la teneur en masse de matière ayant ce diamètre de libération.

IV.4.2 Processus des opérations à mettre en œuvre

Les étapes conduisant à la flottation de la silice se résument de la façon suivante :

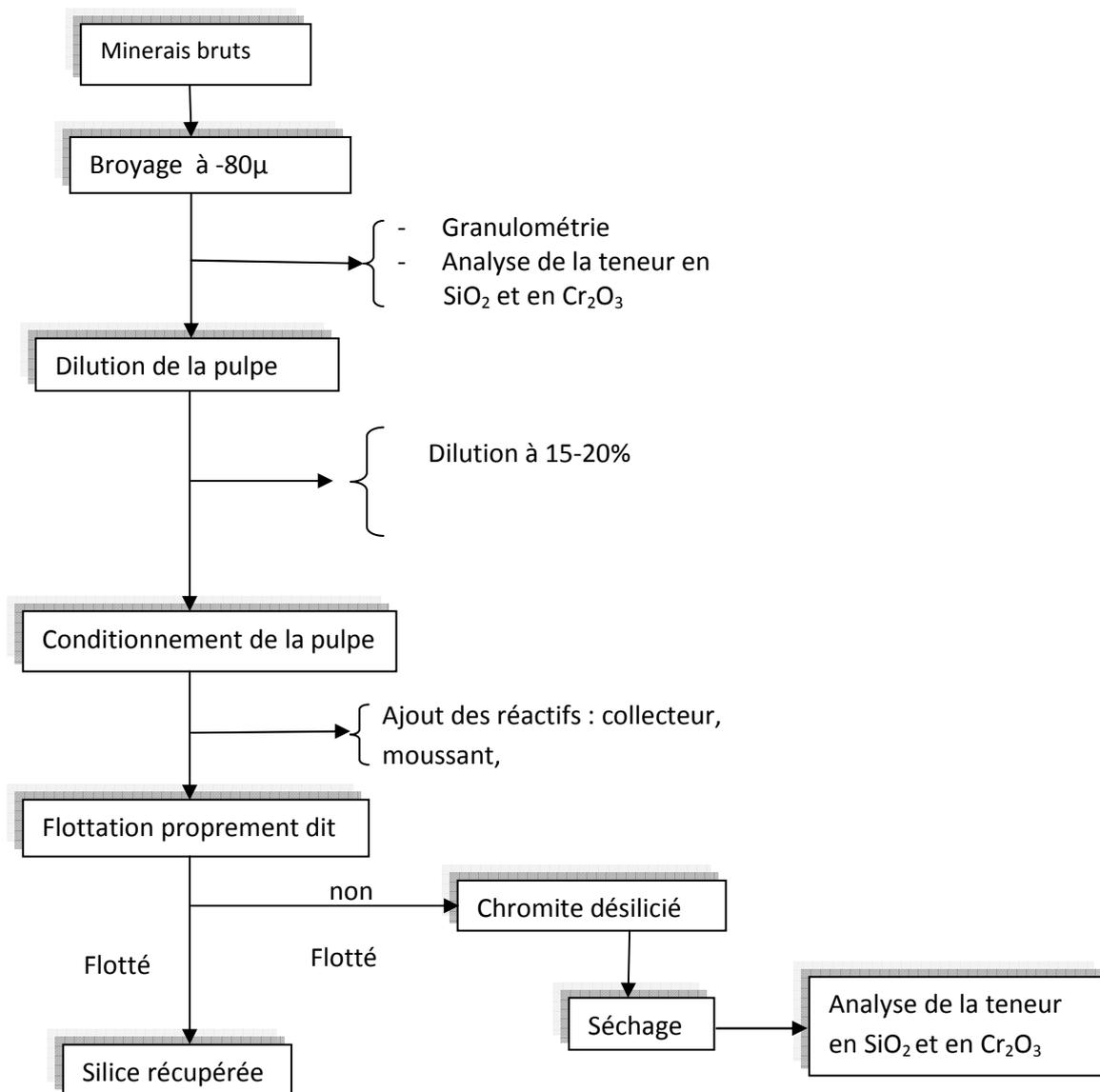


Figure N°14: Processus de flottation de la silice

IV.5. MACHINES DE FLOTTATION [18], [20]

Une machine de flottation assure les fonctions suivantes :

- Traitement des produits (alimentation de la cellule, décharge des produits et évacuation des mousses)
- Aération de la pulpe
- Dispersion homogène des solides dans la pulpe : l'intensité de cette agitation influe sur la flottabilité des minéraux traités :
 - L'agitation peut provoquer une oxydation plus ou moins intense des surfaces sulfurées par l'oxygène dissous.



- Une trop forte agitation peut provoquer la quantité d'ultrafines, nuisibles à la flottation (particules $< 10 \mu\text{m}$) par attrition des minéraux présents dans la cellule

Description de l'appareil de flottation :

Pour réussir la flottation, la cellule de flottation industrielle doit comporter un moteur de puissance entre 0,1 à 1 kw et de vitesse de rotation entre 1800 et 2850 tours / minute et pouvant traiter un débit entre 50 et 500 kg/h.

Plusieurs modèles de cette machine de flottation sont proposés et décrits à l'annexe.

Conclusion

L'application de cette technique d'enrichissement exige l'emploi des réactifs qui servent globalement à la transformation ou à la modification des états de surface des particules pour que ces particules présentent une hydrophobie marquée. La flottation peut être appliquée aux préconcentrés afin d'obtenir une augmentation de teneur en matière utile et une différenciation entre les minéraux préalablement enrichis.



CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Au terme de ce rappel bibliographique, nous comprenons bien les notions essentielles sur la silice et sur la chromite d'Andriamena. Ensuite, nous dégagons et faisons une étude comparative procédés probables de désiliciation. Et parmi ces méthodes, la flottation est la plus indiquée car elle est la plus avantageuse et la plus efficace à cause de la possibilité de la séparation des fines particules d'espèces chimiques différentes.

MCours.com