

CHAPITRE 7

PROCEDES DE SEPARATION ET PARAMETRES PHYSICO-CHEMQUES

- ✓ Séparation gravimétriques : principes et mécanismes de séparation, tables à secousses, les jigs.
- ✓ Séparation magnétique.
- ✓ Séparation électrostatique : principes et machines de séparation.
- ✓ Séparation par flottation (physico-chimique) : théorie de mouillabilité, cinétique, réactifs, schéma de traitement, domaine d'application

1. Introduction

Les méthodes gravimétriques sont sans aucun doute la procédure de concentration de minerais la plus ancienne. Ces méthodes de séparation sont utilisées pour une grande variété de matériaux, allant des sulfures lourds (galène) jusqu'au charbon pour des dimensions de particules jusqu'à 50 μ m.

Suite au développement de la flottation, ces méthodes ont perdu en popularité. Elles demeurent cependant les méthodes par excellence dans la séparation du fer et de l'étain. Elles sont aussi préférées quand la libération des minéraux de valeur se produit à des dimensions de particules plus grandes que le rang normalement utilisé dans la flottation (typiquement pour les minerais de fer, d'étain, de wolframite, etc.).

Comme ces méthodes n'utilisent pas de réactifs chimiques, elles sont beaucoup moins polluantes et ont des coûts d'opérations inférieurs aux autres procédés de séparation. Les coûts d'épaississement des concentrés produits par séparation gravimétrique sont aussi inférieurs en raison de la plus grande dimension des particules et de l'absence de réactifs. À cause des coûts croissants des réactifs de flottation, les méthodes de séparation gravimétrique commencent à reprendre de l'intérêt dans les usines minéralurgiques. Des nouveaux appareils, capables de traiter en-dessous de 50 μ m et avec de plus grandes capacités, ont aussi été développés.

Quoi qu'il en soit, les méthodes de concentration gravimétrique s'avèrent très avantageuses comme première étape de séparation (préconcentration), laissant la flottation ou autres méthodes pour nettoyer les concentrés ainsi produits, à un coût inférieur (car le volume de matériel à traiter est maintenant inférieur).

On peut classer ces méthodes en trois grandes catégories:

- a. **Liquides lourds (liqueur dense),**
- b. **Accélération différentielle,**
- c. **Nappe pelliculaire fluant, et centrifuge.**

2. Limites d'application

Elles sont de nature minéralogique et /ou granulométrique. Dans le premier cas, on parle du besoin d'une relation entre la masse volumique d'un grain et sa teneur en espèce de valeur. Ceci implique que les grains aient des masses volumiques différentes selon les espèces présentes dans le minerai et que les particules de gangue soient assez séparées (libérées) de celles contenant les minéraux de valeur.

Étant donné que dans la pratique industrielle on doit établir un compromis entre une libération suffisante et un coût de traitement raisonnable, des particules mixtes composées de plusieurs espèces minérales sont aussi présentes. Ces particules ont évidemment une masse volumique comprise entre celle des constituants les

plus légers et celle des constituants les plus lourds. La quantité relative de ces mixtes détermine grandement la viabilité de la séparation et le choix de la méthode à utiliser.

La dimension maximale des particules susceptibles d'être traitées par les méthodes gravimétriques est imposée par le minerai lui-même, par l'intermédiaire de la maille de libération.

Pour les minerais métalliques ou les minéraux industriels, la limite est autour de 20 mm; pour le charbon, cette limite est supérieure, 100 mm. La taille minimale est imposée par l'efficacité des appareils de séparation utilisés. Elle a longtemps été limitée à 50 - 75 μ m. De nouveaux appareils sont maintenant capables de traiter des particules allant jusqu'à 10 μ m utilisant la force centrifuge (cyclones DMS) à la place de la seule force de pesanteur. Une autre limitation aussi imposée par la performance des appareils oblige à un pré-traitement du minerai pour éliminer les schlamms (deschlammage) qui peuvent augmenter la viscosité de la pulpe, diminuant alors la vitesse de sédimentation.

3. Principes de la concentration gravimétrique

3.1. Critères d'équivalence

Les méthodes de concentration par gravité séparent les minéraux selon leur mouvement relatif en réponse à des forces de gravité et d'autres forces (i.e. **forces visqueuses**). **Au chapitre précédent**, nous avons établi les relations qui régissent la sédimentation libre (**pulpes diluées**) et entravée (**pulpes concentrées**) de particules à petite dimension (**régime de Stokes**) et grande dimension (**régime de Newton**). **On a aussi défini le rapport de sédimentation (libre, RSL et entravée, RSE), comme étant le rapport de diamètre de deux types de particules (A et B) de masse volumique différent qui entrent en sédimentation à la même vitesse dans un fluide à masse volumique connue.** Rappelons que le rapport de sédimentation libre est donné par:

Rappel des principes

Sédimentation libre laminaire : $RSL = d_A/d_B = [(\rho_B - \rho_f) / (\rho_A - \rho_f)]^m$

Sédimentation libre turbulent : $RSL = d_A/d_B = [(\rho_B - \rho_f) / (\rho_A - \rho_f)]^m$

Sédiment. Entravée laminaire : $RSE = d_A/d_B = [(\rho_B - \rho_f) / (\rho_A - \rho_p)]^m$

Sédiment. Entravée turbulente : $RSE = d_A/d_B = [(\rho_B - \rho_f) / (\rho_A - \rho_p)]^m$

Avec:

$m = 1$ en régime turbulent ($d_p > 2$ mm)

$m = 1/2$ en régime laminaire ($d_p < 100$ μ m)

$1/2 < m < 1$ en régime intermédiaire

Pour qu'il y ait une séparation efficace, il est essentiel qu'il existe une différence marquée entre les masses volumiques des minéraux à séparer, autrement la différence dans la vitesse de sédimentation des deux types de particules ne sera pas suffisante pour permettre leur séparation dans des limites de temps acceptables et avec des équipements de dimensions réalistes.

3.2. Critère de Taggart

Pour quantifier la faisabilité de la séparation, Taggart définit le critère de séparation en régime turbulent comme: où D est la masse volumique, l_d représente le composant lourd, l_g le léger et f le fluide.

Cette relation reste valable en sédimentation entravée (en remplaçant ρ_f par ρ_p), mais elle ne s'applique pas pour les séparations par milieux denses (chapitre 8.3.1). Une séparation est faisable si le critère de concentration de Taggart est supérieur à 2.5 et elle est économiquement impraticable s'il est inférieur à 1.25. Comme la séparation est aussi influencée par la dimension des particules, l'efficacité du processus de séparation par gravité est meilleure pour des particules grossières que pour des petites particules; dans l'intervalle $1.25 < C_T < 2.5$, la faisabilité de la séparation dépendra de la dimension des particules à séparer (voir Tableau 1).

De plus, les méthodes gravimétriques sont généralement plus performantes quand elles sont appliquées à des suspensions avec un rang plutôt étroit des granulométries (afin de minimiser l'effet de la dimension sur le poids).

Tableau 01. Difficulté de la séparation

Critère de Taggart	Difficulté de la séparation
$C_T > 2.5$	Facile pour toutes dimensions
$1.5 < C_T < 2.5$	Possible pour dimensions $> 200 \mu\text{m}$
$1.25 < C_T < 1.5$	Possible pour dimensions $> 1.68 \text{ mm}$
$C_T < 1.25$	Impossible

3.3. Critère de concentration (C C)

Si on définit le facteur de forme intervenant lors de la sédimentation comme étant le rapport entre la vitesse limite de la particule de dimension d et la vitesse limite d'une particule sphérique du même diamètre, on peut écrire que:

$C.C = C_T * \text{rapport des facteurs de forme de sédimentation (lourds/légers)}$

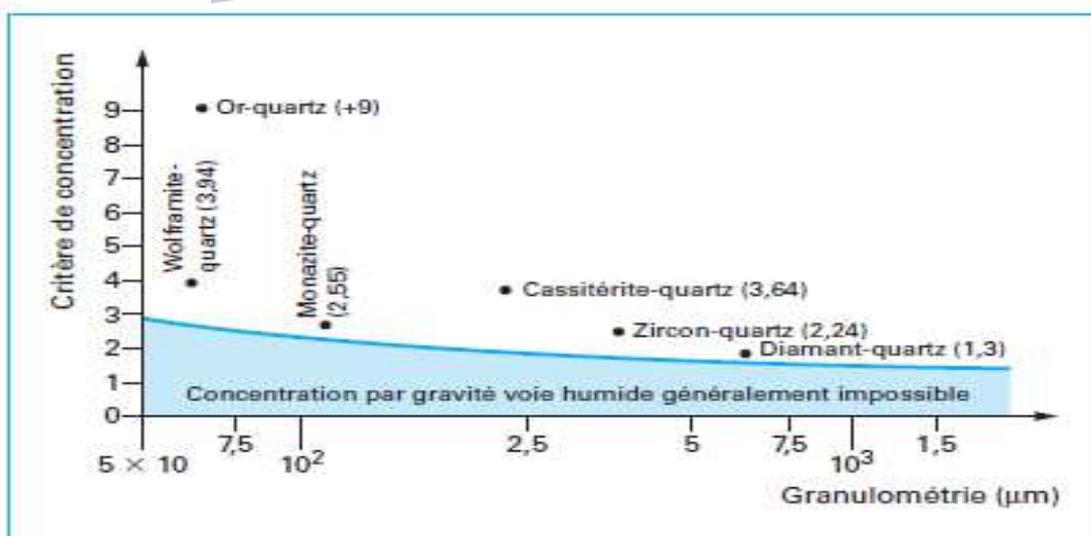


Figure 3 - Critère de concentration en fonction de la granulométrie, d'après [16]

FIGURE 01. Critère de concentration en fonction de la granulométrie.

Tableau 4 – Exemple d’analyse densimétrique d’un minerai de fer (1), d’après [75]

Densité	Courbe élémentaire		Courbe des légers			Courbe des lourds		
	Rendement pondéral (1) (%)	Teneur en Fe (2) (%)	Rendement pondéral des flottants $\Sigma (1) = (3)$ (%)	Contenu en Fe des flottants $\Sigma [(1) \times (2)] = (4)$	Teneur en Fe des flottants (4)/(3) (%)	Rendement pondéral de plongeants $\Sigma [100 - (3)] = (5)$ (%)	Contenu en Fe des plongeants (4') - (4) = (6)	Teneur en Fe des plongeants (6)/(5) (%)
	Brut reconstitué		0	0	0	100,00	4 949,61	49,50
(< 2,4)	3,50	4,20						
2,4			3,50	14,70	4,20	96,50	4 934,91	51,14
	8,01	6,30						
2,5			11,51	65,16	5,66	88,49	4 884,45	55,20
	5,01	9,90						
2,6			16,52	114,76	6,95	83,48	4 834,85	57,92
	2,92	13,00						
2,7			19,44	152,72	7,86	80,56	4 796,89	59,54
	1,17	17,50						
2,8			20,61	173,20	8,40	79,39	4 776,41	60,09
	1,10	25,50						
2,9			21,71	201,25	9,27	78,29	4 747,36	60,65
	0,55	33,60						
3,0			22,26	219,73	9,87	77,74	4 729,88	60,84
	0,85	49,30						
3,2			23,11	261,63	11,32	76,89	4 687,98	60,97
> 3,2	76,89	60,97						
	Brut reconstitué		100,00	4 949,61 (4')	49,50	0	0	0

(1) Pour chaque valeur de densité, la somme des rendements pondéraux des flottants (3) et des plongeants (5) est égale à 100. De même, la somme des contenus en Fe des flottants (4) et des plongeants (6) est constante et égale au contenu en Fe du brut reconstitué (4').

4. Appareils de séparation par gravité

Il existe une grande quantité d'appareils, quelques-uns déjà démodés. On peut classer les appareils en trois grands groupes selon le principe de séparation mis en jeu:

- par milieu dense
- par accélération différentielle
- par nappe pelliculaire fluant

Indépendamment de l'appareil utilisé, on peut distinguer certaines caractéristiques générales:

- Les séparateurs par gravité sont extrêmement sensibles à la présence de fines dans l'alimentation. Ceux-ci augmentent la viscosité de la suspension et réduisent l'acuité de la séparation. Il est donc très commun de procéder d'abord à un deschlammage de l'alimentation (les schlamms vont directement aux rejets).
- L'alimentation aux jigs, cônes et spirales devrait aussi être dégrossie avant la séparation.

- Si possible, le mouvement des suspensions devrait être fait par gravité plutôt que par pompage, car ce dernier produit des schlamms.
- Le bilan d'eau dans une opération de séparation par gravité est très important, puisque les divers appareils ont des valeurs optimales de densité d'alimentation.

5. Séparation par milieux denses (heavy media separation)

Elle consiste à plonger le minerai dans un fluide dont la masse volumique est comprise entre celle de la composante lourde et celle de la composante légère. La séparation se fait suivant la poussée d'Archimède aidée ou non par la force centrifuge (selon l'appareil utilisé). La précision de la séparation dépend essentiellement des qualités du fluide et du degré de libération atteint.

C'est un procédé qui offre de nombreux avantages sur d'autres méthodes: on peut obtenir des séparations assez prononcées avec des différences de densités plutôt faibles et en traitant des débits importants (ce qui fait le procédé plus rentable) et on peut produire des stériles dès les premières opérations, ce qui simplifie le circuit en aval. Cependant, c'est un procédé relativement coûteux surtout en raison du coût de récupération du fluide utilisé.

Idéalement, le milieu dense à utiliser devrait être homogène, ce qui limite le choix à des liquides organiques normalement assez dispendieux et très souvent toxiques. Ce type de produits est alors utilisé exclusivement lors des expériences de laboratoire. Au niveau industriel, le choix du milieu dense a alors été porté vers des solutions à densité élevée (choix plutôt restreint) comme le chlorure de calcium ou vers des pseudo-solutions, en réalité, des suspensions de solides à masse volumique élevée et finement divisés. C'est ainsi qu'on a développé des milieux denses composés de suspensions de barytine et d'argile en eau ($D=1.6$) pour le traitement du charbon ou de galène en eau ($D=2.7$) pour le traitement de minerais. Plus récemment, la technologie s'est orientée vers l'utilisation de suspensions de magnétite ($D<2.5$), de ferro-silicium ($D>2.75$) ou de mélanges ($2.5<D<2.75$). L'utilisation de cyclones DMS permet de monter toutes ces limites d'environ 0.25.

Les procédés de séparation par milieu dense impliquent plusieurs étapes: (a) la préparation du minerai, (b) la préparation et la récupération du médium, (c) la séparation des produits en flottants et plongeants.

(a) Préparation du minerai

Le minerai ne doit pas contenir de fines particules et de colloïdes car ces produits augmentent la viscosité et la densité du bain (facteurs importants lors de la sédimentation). À cet effet, on procède alors à un pré-lavage du minerai sur un crible avec de l'eau sous pression. Cependant, il faut égoutter le minerai après le lavage pour ne pas diluer le médium. Une certaine quantité de fines est cependant convenable pour contribuer à une stabilité suffisante du médium.

(b) Préparation du médium

Les problèmes de densité et de stabilité du bain, de densité des grains de médium et de récupération de celui-ci ont conduit l'industrie vers l'utilisation presque exclusive de média de magnétite et de ferro-silicium. Cependant, l'utilisation de pseudo-solutions de ce type pose aussi des* problèmes, car les propriétés du bain ne sont pas aussi régulières que celles d'un liquide homogène.

Parmi les problèmes principaux, on distingue:

La dureté: les grains de médium ne doivent pas se briser sous peine de nuire à la récupération et de modifier la viscosité du bain;

La stabilité: elle est d'autant plus élevée que la proportion de fines est grande; une vitesse de sédimentation inférieure à 1 mm/min caractérise une bonne suspension;

La viscosité: la proportion de médium dans l'eau ne doit pas dépasser 35% en volume.

(c) Récupération du médium

La récupération et la régénération du médium sont d'une importance capitale, car elles déterminent la préparation et la rentabilité du procédé. À la sortie de l'appareil de séparation, les produits lourds et légers entraînent avec eux du médium qui doit être récupéré. Dans une première étape, on recueille par simple égouttage le médium dont la densité est proche de celle du bain.

Ensuite, un lavage sur crible permet de récupérer un médium dilué qu'il s'agit d'épurer et de concentrer par un procédé magnétique (s'il s'agit de la magnétite ou du ferro-silicium) ou par flottation (s'il s'agit de sulfures) jusqu'à ce qu'il ait la densité du bain.

Appareillages classiques

Les séparateurs utilisant les suspensions denses sont à diviser en deux grandes catégories, comme l'indique le **tableau 1**.

(a) appareils statiques:

Ce sont des appareils à capacité élevée et ayant des dimensions plutôt grandes; ils présentent des écarts probables faibles, car ils ne travaillent que sur des granulométries grossières. On les classifie selon le mode d'évacuation des plongeants: à auge qui tourne (appareil type tambour) ou à auge fixe (cône Wemco, bac Static PIC-FCB). Les figures présentées à la page 21-22 montrent quelques-uns de ces appareils.

(b) appareils dynamiques:

Ceux-ci utilisent la force centrifuge pour accélérer la sédimentation des lourds et lutter contre la viscosité des suspensions. Ils ont l'avantage de pouvoir travailler à une densité de coupure supérieure à celle de la suspension grâce à la centrifugation. Parmi eux, on distingue: cyclone DSM, DYNA-Whirpool, Tri-flo, cyclones à eau.

Les figures présentées à la page 25 montrent quelques-uns de ces appareils.

À la page 26, on montre deux exemples de circuit de séparation par liquides lourds où on peut distinguer les différentes étapes mentionnées précédemment, soit la préparation du minerai et du milieu, la séparation proprement dite et la récupération et recyclage du milieu dense.

Tableau 1 - Quelques appareillages de séparation par milieu dense.

Type	Modèle	Constructeur(s)
Bac (cône) profond	Profond Wemco FCB Laveur Hirst	McNally-Wellman Wemco FCB National Coal Board
Tambour	Wemco OOSK 30 Teska Hardinge	Wemco CEI KHD. Humboldt-Wedag Variés

À transit	DSM Lo Flo Tromp Ridley Scholes OCC Heyl et Patterson	Stamicarbon - DSM Mc Nally-Wellman
Mixte	Drewboy	FCB Norwalt
Centrifuge	Cyclone DSM Swirl Vorsyl Dyna-Whirlpool (DWP)	Variés Osaka Shipbuilding National Coal Board Variés dont Allis-Mineral Systems
	Tri-Flo Cyclones à eau Visman-Tricone	Inpromin Variés, dont DSM Osaka Shipbuilding, McNally-Wellman

5.1. Courbes de séparation: Lavabilité et partage

5.1.1. Essais de laboratoire aux liquides lourds

Ces essais visent à déterminer la pertinence de la séparation gravimétrique et plus particulièrement celle de la concentration par milieux denses pour un minerai donné ainsi qu'à déterminer la masse volumique de coupure économique. L'utilisation de produits chimiques (en général organiques) de masse volumique (ρ_f) croissante permet de séparer le minerai en tranches densimétriques distinctes. Le tableau suivant montre quelques-uns des liquides organiques couramment utilisés.

Tableau 02. Liquides pour granulodensimétries

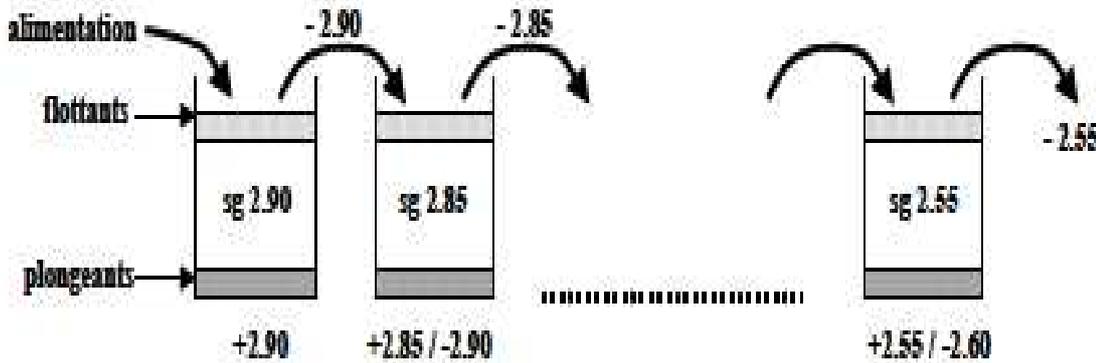
Liquide	ρ [g/cm ³]	Diluant
Polytugstate de sodium	< 2.9	Eau
Tétrabrométhane	2.96	Acétone, éther
Bromoforme	2.85	Acétone, alcool
Iodure de méthylène	3.32	Acétone, éther
Liqueur de Clérici	4.2 à 5	Eau

Afin de déterminer l'aptitude du minerai vis-à-vis une séparation gravimétrique, on procède par séparations séquentielles en variant la masse volumique du liquide organique.

La méthode expérimentale consiste premièrement à préparer une série de liquides couvrant la plage de masses volumiques comprise entre celle du composant lourd et celle du composant léger du minerai.

Le minerai concassé est introduit dans le liquide le plus lourd et laissé sédimenter pendant un certain temps. Le produit flottant est retiré, lavé et introduit dans le liquide à masse volumique immédiatement inférieure, la procédure est répétée jusqu'au dernier liquide disponible.

Les fractions plongeantes sont drainées, lavées, séchées et pesées de même que le produit flottant de la dernière étape.



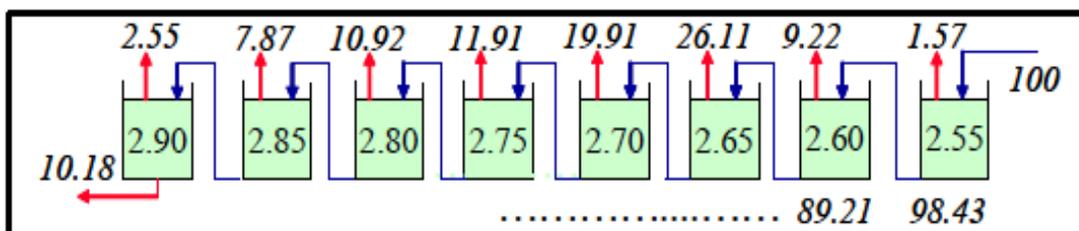
Le poids et la teneur des divers plongeants (et/ou flottants) sont alors déterminés et on calcule ensuite les valeurs suivantes:

- le rendement pondéral de chaque tranche densimétrique,
- le rendement pondéral des plongeants à chaque densité,
- le rendement pondéral des flottants par différence,
- les teneurs cumulées des plongeants à chaque densité,
- les teneurs cumulées des flottants par différence.

On définit le *rendement pondéral (yield)* des plongeants (ou des flottants) comme la fraction (%) du poids de minerai alimenté qui se retrouve dans la fraction plongeant (ou flottant). Après avoir fait l'analyse chimique (en minéral recherché) des diverses fractions obtenues, on peut présenter les résultats de la façon indiquée ci-dessous (pour un minerai d'étain).

Classe de densité	% poids (solides)	teneur (% Sn)	masse solide cumulée	masse Sn par classe (alim=100g)	masse Sn cumulée	distribution Sn (%) par classe	distribution Sn (%) cumulée	teneur cumulée % Sn
- 2.55	1.57	0.03	1.57	0.00047	0.00047	0.0420	0.0420	0.0300
+2.55 / -2.60	9.22	0.04	10.79	0.0037	0.00416	0.3296	0.3716	0.0386
+2.60 / -2.65	26.11	0.04	36.90	0.0104	0.0146	0.9291	1.3007	0.0396
+2.65 / -2.70	19.67	0.04	56.57	0.0079	0.0225	0.7057	2.0064	0.0398
+2.70 / -2.75	11.91	0.17	68.48	0.0202	0.0427	1.8045	3.8110	0.0624
+2.75 / -2.80	10.92	0.34	79.40	0.0371	0.0798	3.3143	7.1253	0.1005
+2.80 / -2.85	7.87	0.37	87.27	0.0291	0.1089	2.5996	9.7249	0.1248
+2.85 / -2.90	2.55	1.30	89.82	0.0332	0.1421	2.9659	12.6908	0.1582
+2.90	10.18	9.60	100.0	0.9773	1.1194	87.3057	99.9965	1.1194
					1.1194			

Ce tableau représente la séparation par liquides lourds de la figure suivante.



On y voit que, si on utilisait un liquide de densité 2.75, 68.48% du matériel flotterait et seulement 3.81% de l'étain serait perdu dans cette fraction. Également, 96.19% de l'étain resterait dans la fraction plongeant, qui compte pour 31.52% du poids de minerai alimenté.

Il est évident que plus le rendement est élevé, plus la teneur en minéral de valeur sera faible.

Ceci est déterminé par le choix de la masse volumique de séparation. Typiquement, pour un minerai dont le produit de valeur est de densité supérieure à celle des refus, le choix d'un liquide à densité plus élevée se traduirait par une augmentation de la teneur du produit final mais avec une réduction dans le rendement pondéral. Dans le cas de laveries de charbon, la situation est opposée, car les refus (silice) ont une densité supérieure à celle du charbon.

5.1..2. Courbes de séparabilité (lavabilité) du brut

Ces courbes permettent d'établir les possibilités de séparation du minerai par une méthode gravimétrique et d'orienter le choix de la technique à utiliser. On peut tracer deux types de courbes:

a) courbes densimétriques, donnant le rendement pondéral (proportion en masse) des plongeants en fonction de la masse volumique du fluide utilisé;

b) courbes de séparabilité (lavabilité) en fonction de la teneur, elles peuvent représenter:

➤ le rendement pondéral en fonction de la teneur moyenne en espèce de valeur pour:

(i) les produits de masse volumique inférieure à celle du liquide (courbe des légers)

(ii) les produits de masse volumique supérieure à celle du liquide (courbe des lourds)

➤ la teneur de la tranche densimétrique en fonction du rendement pondéral (cumulé) des flottants à la masse volumique de la tranche augmenté de la moitié du rendement pondéral de la tranche densimétrique. Cette courbe, appelée *élémentaire*, coïncide avec la courbe des légers pour 0% de flottants et avec la courbe des lourds pour 0% des plongeants.

Les courbes présentées à la page suivante montrent les résultats d'une séparation par milieux denses d'un minerai de fer, sous la forme des courbes de séparabilité récemment mentionnées, construites à partir des données d'analyse densimétrique présentées dans un exemple présenté dans Techniques de l'Ingénieur - Séparation et mélange Concentration Gravimétriques (page A 5 190-5)).

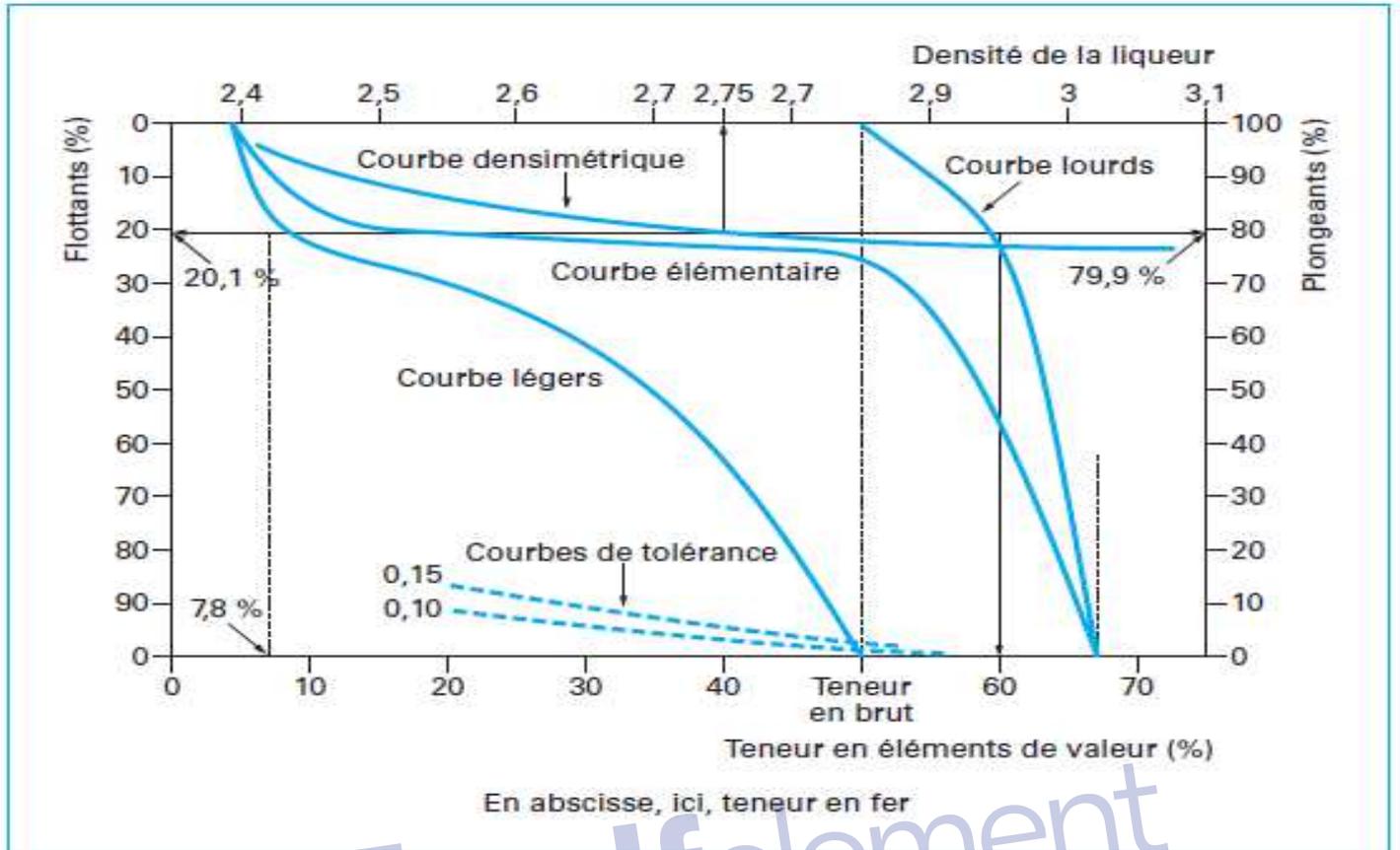


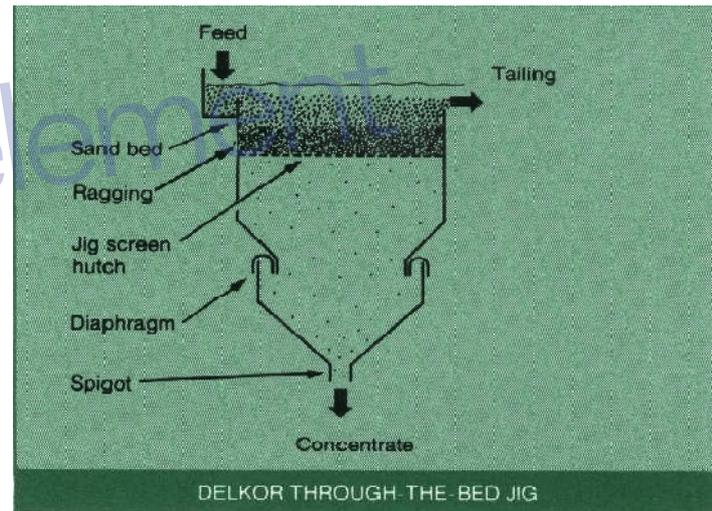
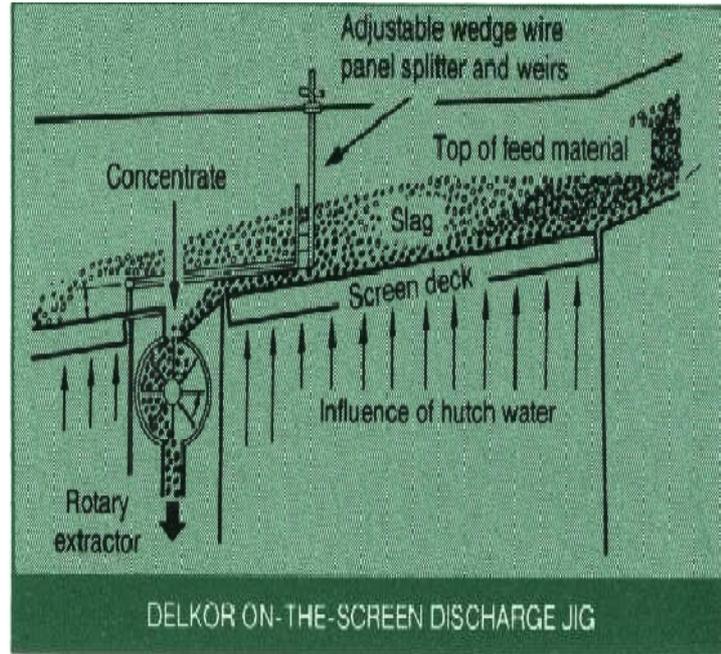
Figure 4. Résultats d’une séparation par milieu dense

À partir de ces courbes de séparabilité, il est alors possible de déterminer la densité de séparation pour un objectif donné. Par exemple, on peut conclure que pour obtenir un concentré dont la teneur est de 60% Fe, il faudrait utiliser un liquide dont la masse volumique est de 2.75, ce qui donnerait les résultats suivants:

- plongés : rendement pondéral de 79.9% avec une teneur de 60% Fe
- flottants : rendement pondéral de 20.1% avec une teneur en fer de 7.8%

6. Séparation par accélération différentielle (jig) :

C'est une des plus anciennes méthodes de séparation par gravité. On l'utilise plutôt dans le rang des particules grossières. Pour des particules assez homogènes en dimension (3 à 10 mm), on peut produire une assez bonne séparation même pour les minéraux dont la densité est très semblable (fluorite, 3.2 et quartz, 2.65). Plus la différence de densité est élevée, plus de marge de manœuvre on dispose vis-à-vis la dimension des particules. La séparation est produite ici par la stratification des particules dans un lit rendu fluide par un courant d'eau intermittent. L'objectif est de dilater suffisamment le lit pour que les particules plus pesantes (et plus petites) pénètrent dans les interstices du lit en même temps que les particules plus grosses se déposent dans des conditions similaires à la sédimentation entravée. Typiquement, une jig est capable de traiter 4 (t/h)/m² de lit sous forme de suspension à environ 50% de solides (poids).



Détails de construction d'une jig

jig

6.1. Mécanismes de séparation dans les jigs

L'équation de sédimentation d'une particule dans un fluide visqueux est:

$$m \cdot (dv/dt) = m \cdot g - m' \cdot g - F_d \quad \text{Où}$$

m est la masse de la particule, **m'** la masse de fluide déplacé, **F_d** la résistance visqueuse du fluide, et **dv/dt** l'accélération imposée sur la particule.

Au début du mouvement, la vitesse **v** est petite donc le terme **F_d** est négligeable, alors

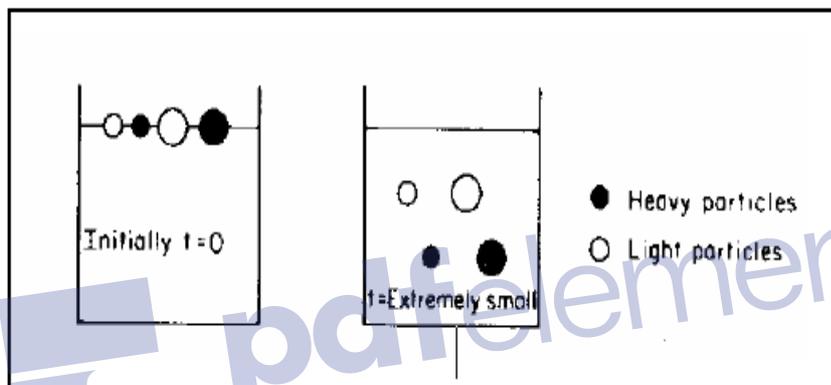
$$dv/dt = [(m - m')/m] g = [(\rho_s - \rho_f) / \rho_s] A g \quad \text{où}$$

ρ_s et ρ_f sont les densités du solide et du fluide.

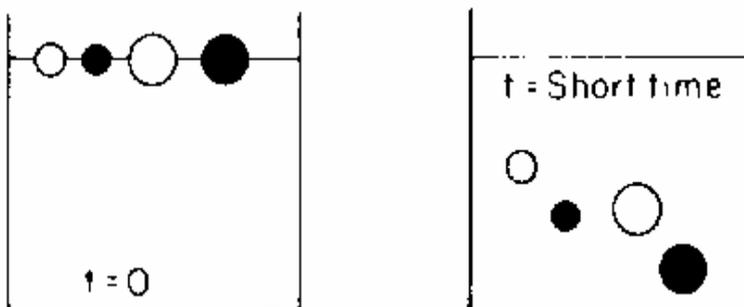
L'accélération initiale des particules minérales est donc indépendante de la dimension. En théorie, si l'action de secousse est très courte et fréquente, on pourrait séparer sur la densité (accélération différentielle initiale) plutôt que sur le diamètre (vitesse terminale), permettant ainsi de séparer des petites particules lourdes des grandes particules légères.

Si on attend assez longtemps, les particules vont atteindre leur vitesse de sédimentation terminale qui est dépendante de leur densité et leur dimension aussi. La sédimentation des particules prend plutôt place en régime entravé, donc avec un rapport de sédimentation minéral lourd/ minéral léger plus grand qu'en sédimentation libre (figure ci-dessous).

Mécanisme de séparation dans un jig

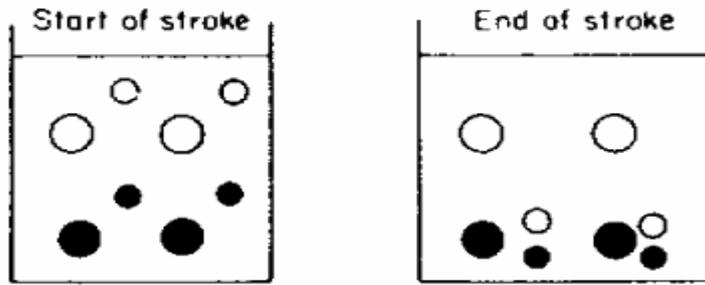


Le flux ascendant d'eau pourrait être réglé de façon à contrecarrer exactement la vitesse de chute des particules fines et légères, donc procédant ainsi à un rejet total d'elles. Si on augmentait encore plus le débit d'eau, on pourrait même réussir à permettre uniquement la sédimentation des grosses particules de minéral lourd. Une séparation entre petites-lourdes et grandes-légères est plus improbable.



À la fin de la période de pulsion, le lit commence à devenir compact, les particules plus petites vont glisser par les interstices laissés entre les grosses particules, sous l'effet de la gravité.

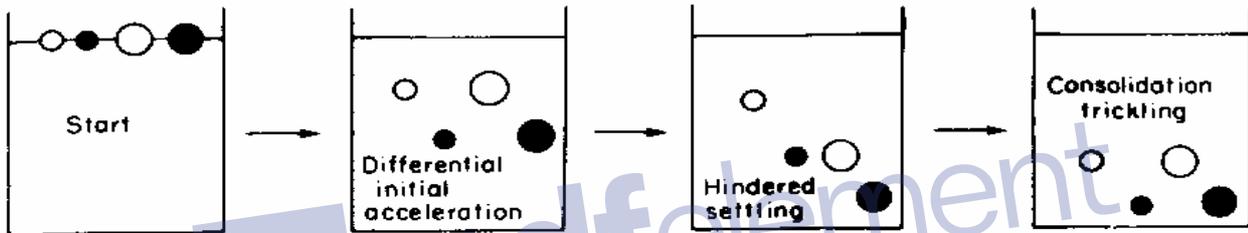
Cette période s'appelle la *filtration interstitielle* ou *consolidation trickling* (voir figure ci-dessus).



Filtration interstitielle

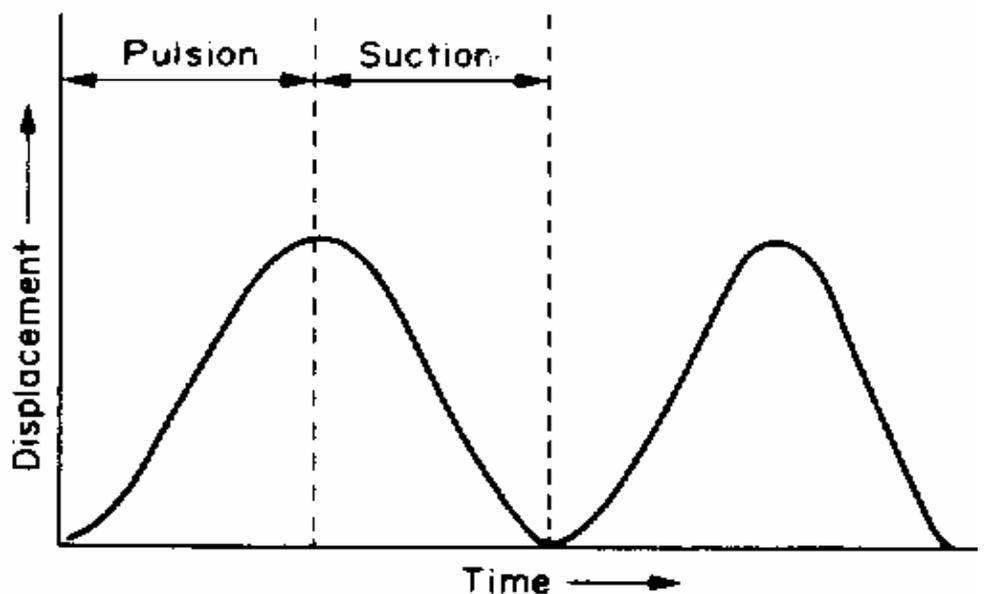
La procédure complète, incluant les différents mécanismes, accélération initiale différentielle, sédimentation entravée et consolidation trickling, est montrée à la figure suivante.

La procédure complète inclut alors trois étapes:



Accélération Différentielle + Sédimentation entravée + Filtration interstitielle

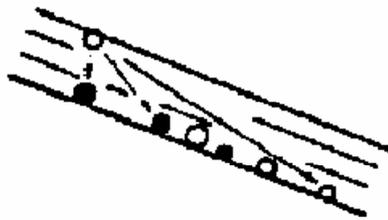
Les flux ascendant et descendant dans une jig sont produits par un piston dont le mouvement est de type sinusoïdal. La vitesse verticale du flux dans le lit est proportionnelle à la vitesse du piston (figure ci-dessous).



7. Séparations par nappe pelliculaire fluente

La longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel s'écoule par gravité un film liquide dépend de deux actions (voir figure suivante):

a) la sédimentation de la particule, b) le déplacement sur le fond.



(a) sédimentation de la particule

(b) déplacement sur le fond

● **lourds**

○ **légers**

L'un des phénomènes mis en jeu est l'*alluvionnement* au cours duquel les grains lourds et grands sont les premiers à rencontrer le support, pouvant s'y retrouver piégés alors que les petites particules sont emportées par le courant. Les particules qui ont atteint le fond vont se déplacer par *saltation* et la vitesse d'entraînement dépend peu de leur dimension, dépendant plutôt de la racine carrée de leur masse volumique apparente. Ainsi, les particules ayant la masse volumique la plus élevée se retrouveront à la partie inférieure (ou intérieure s'il y a rotation) et celles de masse volumique plus faible, à la partie supérieure (ou extérieure). Pour améliorer la séparation, on utilise des pièges (*les riffles*), des contraintes transversales (*tables à secousses*) et/ou la force centrifuge (*spirales*).

On peut classer les appareils utilisant le principe de séparation par nappe pelliculaire fluente en deux catégories: **(a) à plan incliné fixe**, et **(b) à plan incliné mobile**.

Dans la première catégorie et dépendant de la périodicité de soutirage des produits lourds, on retrouve deux types d'appareils:

À soutirage périodique des lourds: **le Siluice**

À soutirage continu des lourds: **le pinched Siluice, le cône Reichert, la spirale.**

Dans la deuxième catégorie, on retrouve aussi les deux mêmes types d'appareils, soit:

À soutirage périodique des lourds: **la table GEC et le séparateur Bartles-Mozzley.**

À soutirage continu des lourds: **la table à secousses, le séparateur multi-gravité.**

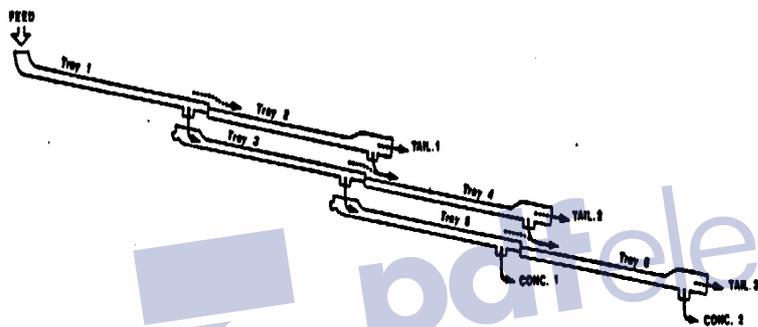
Pinched Siluice

Dans sa forme la plus simple, un *pinched Siluice* est un plateau d'à peu près 1 m de longueur et 200 mm de largeur à l'alimentation et 25 mm de largeur à la décharge, placé en angle avec l'horizontal. Une suspension contenant 50 à 65% de solides stratifie en descendant. À la sortie, cette pulpe stratifiée est séparée soit par des couteaux (splitters) ou par d'autres Siluice. Les variables d'opération plus importantes dans un Siluice

sont le débit volumique, le pourcentage de solides, l'angle du Siluice et l'ouverture des rainures (slots). Les problèmes plus critiques sont la faible capacité et les effets de parois.

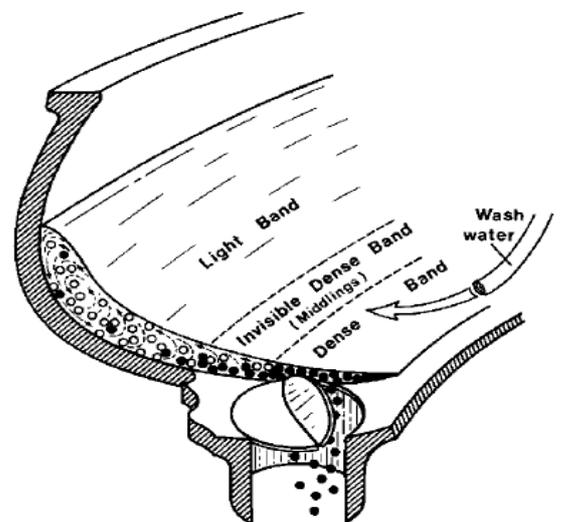
7.1. Pinched Siluice

Dans sa forme la plus simple, un *pinched Siluice* est un plateau d'à peu près 1 m de longueur et 200 mm de largeur à l'alimentation et 25 mm de largeur à la décharge, placé en angle avec l'horizontal. Une suspension contenant 50 à 65% de solides stratifie en descendant. À la sortie, cette pulpe stratifiée est séparée soit par des couteaux (splitters) ou par d'autres Siluice. Les variables d'opération plus importantes dans un Siluice sont le débit volumique, le pourcentage de solides, l'angle du Siluice et l'ouverture des rainures (slots). Les problèmes plus critiques sont la faible capacité et les effets de parois.



7.2. Spirales

La concentration par spirales a été pendant des années la plus utilisée des méthodes gravimétriques surtout pour le traitement de sables contenant des minéraux lourds, tels que ilmenite, rutile, zircon et monazite. La spirale de Humphrey (1943) consiste simplement en un conduit hélicoïdal en fonte de fer de section droite semi-circulaire modifiée; elle ne comporte donc aucune pièce mobile. L'alimentation, ayant entre 15 et 45% de solides dont la granulométrie se retrouve entre 3 mm et 75 µm, est introduite en haut de la spirale et descend suivant l'hélicoïde. Les particules stratifient à cause de l'effet combiné de la force centrifuge, de la vitesse différentielle de sédimentation des divers composants et de la filtration interstitielle à travers le lit de particules en écoulement.



Les particules plus lourdes se rapportent à l'intérieur du flux tandis que les particules plus légères vont se retrouver vers l'extérieur du film descendant. Des ouvertures ayant chacune un mécanisme de réglage de leur grandeur (appelé *cuillère* ou *couteau*) sont prévues tout le long du parcours (près de l'axe) pour évacuer le concentré.

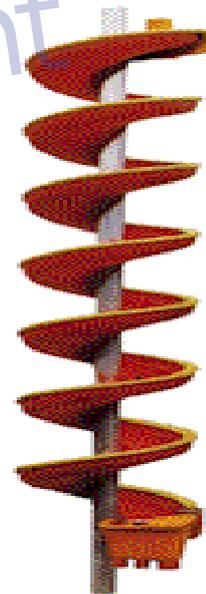
La teneur des concentrés recueillis par les différentes cuillères diminue au fur et à mesure que l'on descend le long de la spirale. Les rejets et les mixtes sont collectés complètement en bas de la spirale. De l'eau de lavage peut être ajoutée à plusieurs endroits dans la partie intérieure du flux et circulera à travers la bande de concentré vers l'extérieur de l'hélicoïde servant à mieux séparer le concentré du centre des particules légères en périphérie.

Pour augmenter la capacité, deux ou trois spirales peuvent être montées sur le même support (spirales doubles ou triples). L'angle d'inclinaison des tours de la spirale peut différer d'un modèle à un autre, dépendant de l'application où l'unité sera utilisée. Des angles faibles sont utilisés pour la récupération de charbon, tandis que des angles plus importants sont utilisés pour la concentration de minéraux lourds. Normalement, une spirale dégrossisseuse est formée de cinq tours, tandis qu'une spirale nettoyeuse n'a que trois ou quatre tours. La capacité d'une spirale oscille entre 1 et 6 t/h de minerai, le pourcentage en solides de l'alimentation étant d'environ 20% à 30%, bien que pour des particules grossières, il peut monter jusqu'à 50%, tandis que pour des particules fines, l'alimentation peut être plus diluée.

Des modifications substantielles ont été introduites dernièrement dans le design des spirales: une seule sortie pour le concentré (en bas), pas d'ajout d'eau de lavage, construction en fibre de verre, etc.

Spirales

- Appareil de concentration gravimétrique le plus utilisé pendant des années
- Consiste en une conduite hélicoïdale en acier ou fibre de verre de section droite circulaire descendant autour d'un axe vertical
- Les particules stratifient (en descendant) comme résultat de:
 - la force centrifuge
 - la vitesse différentielle de sédimentation
 - la "filtration interstitielle" à travers du lit.



7.3. Tables à secousses

Lorsqu'un film d'eau coule sur une surface plate inclinée, l'eau près de la surface est retardée par la friction. La vitesse augmente vers la surface libre de l'eau. Si des particules de minerai sont introduites dans l'eau, les particules plus petites ne se déplacent pas aussi vite que celles plus grandes, puisqu'elles sont submergées dans la partie plus lente du film. En même temps, les particules plus lourdes seront moins entraînées que les particules plus légères (figure ci-dessous).

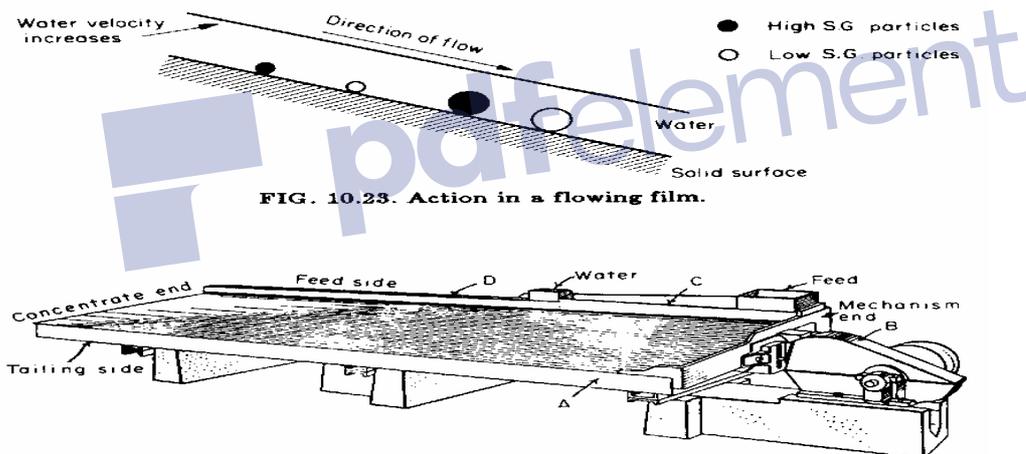
Ainsi, une nette séparation se produira entre des particules grossières et légères et des particules petites et lourdes. Ce type de séparation est exploité dans les tables à secousses, peut être le séparateur le plus parfait qui existe.

Elles consistent en une table inclinée, en longueur et en largeur. L'alimentation, suspension à environ 25% en solides, est introduite dans le coin le plus élevé (voir figure suivante). De l'eau de lavage est introduite aussi du côté de l'alimentation. La table est secouée en sa longueur, avec un mouvement lent en avant et très rapide vers l'arrière. Cette action ouvre le lit de particules, permettant aux plus lourdes de sombrer et facilitant aussi le transport longitudinal. Les particules sont soumises à deux forces: une due aux secousses (qui traîne les particules en longueur) et l'autre, perpendiculaire due au film d'eau.

La table est munie de "riffles" ou *cannelures* qui empêchent les petites particules lourdes de s'en aller vers les rejets, les plus grandes et légères pouvant remonter les riffles (figure sou- dessous).



La hauteur des cannelures décroît vers l'extrême plus éloigné pour permettre un certain nettoyage des particules attrapées à l'intérieur: celles placées au dessus de la couche de particules, à cause de leur densité plus faible, seront entraînées par l'eau de lavage, étant ainsi séparées de celles situées plus au fond, celles-ci étant plus lourdes.



Les variables d'opération les plus importantes sont: angles de la table, densité de la pulpe alimentée, ajout d'eau de lavage, position des couteaux, vitesse de secousses, fréquence. Des variables de design sont: forme de la table, matériel de la surface, forme et disposition des riffles, présentation de l'alimentation.