

1/97
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Minier**

MEMOIRE

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Minier*

THEME



ETUDE NUMERIQUE DES PARAMETRES DE LA SEPARATION PAR MILIEU DENSE

Présenté par:

Mr FERDI Malik

Proposé et encadré par:

Dr M.OULD-HAMOU

PROMOTION 1997

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique
Département Génie Minier**

MEMOIRE

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état
en Génie Minier*

THEME



ETUDE NUMERIQUE DES PARAMETRES DE LA SEPARATION PAR MILIEU DENSE

Présenté par:

Mr FERDI Malik

Proposé et encadré par:

Dr M.OULD-HAMOU

PROMOTION 1997

DEDICACE



A ma mère ;

A mon beau père ;

A mes grands-parents ;

A mes soeurs, Lylia et Karima Djouhra ;

A ma Tante Nacéra et sa fille Hindou ;

A ma Tante Zouhra, son époux Berkane et ses enfants ;

A mon oncle Mourad et son épouse Lamia ;

A mon oncle Tahar et son épouse Nadia ;

A mon oncle Azedine et son épouse louiza ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis, Aïcha, Nawel, Amel, Samia, Sofiane, Walid, Malik,

Salah, Fouhim, Poucla, Annis, Mourad, Miloud et Merouane ;

Je dédie ce mémoire ;

MALIK.



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement, mon promoteur le Dr M. OULD-HAMOU qui a accepté de m'encadrer et de diriger mon travail pendant plusieurs mois.

Je remercie également les membres du jury, qui ont accepté de discuter et d'examiner ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je remercie tout particulièrement ma mère pour son soutien et son aide précieuse.

J'adresse ma profonde reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

RESUME :

Ce projet consiste en l'élaboration d'un logiciel en Visual Basic permettant d'estimer l'aptitude de séparation du milieu dense et de déterminer la densité économique de séparation d'une concentration par milieu dense par utilisation de ses paramètres.

ABSTRACT :

This project consists of the elaboration of a software in Visual Basic allowing to estimate the faculty of separation of heavy medium by using of its parameters.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو إعداد برنامج بلغة Visual Basic الذي يسمح بتقييم قدرة التفريق للوسط الكثيف و تمييز كثافة التفريق الإقتصادية بوسط كثيف ذلك بإستعمال وسيطتها.

SOMMAIRE



INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
I-1 GENERALITES SUR LA CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE	4
I-1-1 OBJECTIFS DE LA CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE	4
I-2 CONCENTRATION PAR ACCELERATION DIFFERENTIELLE	5
I-2-1 PRINCIPE	5
I-2-2 EXEMPLES D'APPAREILLAGES COMMERCIALISES	8
I-3 CONCENTRATION PAR NAPPE PELLICULAIRE FLUENTE	9
I-3-1 Principe	9
I-4 TRAITEMENT DES FINES PARTICULES (< 100 μM)	12
I-4-1 CONCENTRATEURS FAISANT APPEL A UNE CONTRAINTE UNIDIRECTIONNELLE ...	13
I-4-2 CONCENTRATEUR FAISANT APPEL A UNE CONTRAINTE UNIDIRECTIONNELLE	14
I-4-3 CONCENTRATEUR FAISANT APPEL A UNE CENTRIFUGATION	14
I-5- CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE PAR VOIE SECHE	15
CHAPITRE II	
II-1 LE PROCEDE DE LA SEPARATION PAR MILIEU DENSE	17
II-2 LES LIQUEURS	20
II-3 LES SUSPENSIONS	21
II-4 RECUPERATION ET REGENERATION DU MILIEU	25
II-5 APPAREILLAGES DISPONIBLES	28
II-5-1 APPAREILS DE TYPE STATIQUE	28
II-5-2 APPAREILS DE TYPE DYNAMIQUE	31
II-5-2-1 Principaux types d'appareils	32

II-6 LES EPREUVES DE LABORATOIRE SUR LA SUSPENSION LOURDE	34
II-7 DETERMINATION DES COURBES DE LAVABILITE DU BRUT	40
II-7-1 COURBE DENSIMETRIQUE	40
II-7-2 COURBES DE LAVABILITE EN FONCTION DE LA TENEUR	40
II-7-3 UTILISATION DES COURBES DE LAVABILITÉ, DES COURBES DE TOLÉRANCE ET DU CRITÈRE DE LÉONARD ET MITCHELL	42
II-8 LA CONSTRUCTION DE LA COURBE DE PARTAGE	43
 CHAPITRE III	
III-1 ETUDE DES PARAMÈTRES PAR LA MÉTHODE NUMÉRIQUE	49
III-2 ARCHITECTURE DU PROGRAMME	54
 CONCLUSION	 72

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La concentration gravimétrique est la méthode qui, avec le tri manuel, est la plus ancienne de l'histoire industrielle. Pline en décrit déjà certaines pratiques vers l'an 70.[5]

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, ces diverses techniques ont régné sans partage sur l'industrie extractive mondiale.

L'apparition des méthodes faisant intervenir les propriétés physico-chimiques (la flottation), puis les propriétés chimiques (l'hydrométallurgie), a battu en brèche cette domination jusqu'aux alentours de 1975.

La gravimétrie paraissait même une branche de la minéralurgie promise à une extinction inexorable quand un retournement de tendance s'est fait sentir. En effet, la possibilité de traiter des granulométries grossières à des tonnages unitaires importants, l'absence presque totale d'emploi des réactifs coûteux, toujours plus ou moins polluants et les progrès considérables réalisés par les techniques de classification fine, ont été autant de facteurs qui ont séduit les centres de recherche, les industriels fabricants de matériels et les exploitants miniers.

Des nouveautés se sont manifestées ces vingt dernières années. Elles ont pu être appliquées avec succès dans l'industrie minière, et ce d'autant plus que le nombre de mines petites et moyennes se multipliait.

Ces mines qui, par leur taille réduite, étaient limitées en capacité d'investissements importants, ne pouvaient être exploitées que par les méthodes de concentration gravimétrique.

INTRODUCTION

Pour mieux comprendre la méthode de séparation que nous allons étudier nous citerons brièvement dans le chapitre I toutes les méthodes de concentration par milieu dense avec les appareils utilisés pour chaque méthodes.

Dans le chapitre II nous expliquerons la méthode de séparation par milieu dense, et en analysant tous les paramètres qui ont été introduits dans un le programme que nous avons élaboré.

Le déroulement et l'architecture de ce programme sont mis en valeur dans le chapitre III.

CHAPITRE I
GENERALITES

I-1 GENERALITES SUR LA CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE :**I-1-1 OBJECTIFS DE LA CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE :**

La concentration gravimétrique est un processus important de la minéralurgie. Les tonnages traités aux Etats-Unis par gravimétrie sont du même ordre de grandeur que ceux alimentant un circuit de flottation. [5]

En effet, certains minerais pondéraux sont facilement concentrés par l'une ou l'autre technique.

Les étapes de concentration qui suivent chaque étape de comminution permettent de suivre la libération progressive des espèces minérales de valeur, évitant de recourir immédiatement à un broyage poussé à la maille de libération, ce qui économise au mieux la consommation énergétique et minimise le coût du traitement.

Ces procédés sont donc très bien adaptés aux petites installations qui peuvent cependant traiter des tonnages importants. De même ils se prêtent tout particulièrement à la mise en place d'unités mobiles (sur des dragues ou des sites isolés).

Les objectifs de la concentration gravimétrique sont :

- D'une part, l'obtention de concentrés définitifs pour des extractions de charbon, fer minéraux lourds comme la wolframite ou la cassitérite ;
- D'autre part, la production de préconcentrés dans un grand nombre de cas (fluorine, barytine, minerais métallique, recyclage de déchets, etc.), permettant de minimiser l'emploi de méthodes de valorisation plus onéreuses.

Les procédés de concentration par gravité utilisent l'effet combiné de la masse, du volume et de la forme des particules pour obtenir des trajectoires de particules différentes dans un milieu liquide, statique ou en mouvement.

Nous allons ^{à l'in}étudier les méthodes de concentration qui ont été mises au point industriellement. Il s'agit des quatre méthodes suivantes :

- La concentration par accélération différentielle ;
- Concentration par nappe pelliculaire fluante ;
- Traitement des fines particules ($< 100 \mu\text{m}$) ;
- Concentration gravimétrique en voie sèche.

I-2 CONCENTRATION PAR ACCELERATION DIFFERENTIELLE: [2, 3et 5]

I-2-1 PRINCIPE :

Les produits sont soumis à une pulsion verticale alternée au cours de leur écoulement dans un bac.

La pulsation est engendrée soit par le mouvement du bac, soit par la pulsation de l'eau, le bac étant fixe. On appelle ces appareils *jigs* ou *bacs à piston*.

Le jiggage est une des méthodes les plus anciennes qui soit utilisées. Cependant, même à l'heure actuelle, certains des principes de base de son fonctionnement ne sont pas encore bien compris.

La séparation est réalisée dans un lit de particules fluidisées par les courants ascendants d'eau, provoquant ainsi une stratification selon la masse volumique des grains.

Une particule sphérique de diamètre D , de masse volumique ρ_s , tombant par gravité dans un fluide visqueux de masse volumique ρ_f est soumise à trois forces : la gravité, vers le bas, les forces dérivant du fluide déplacé et de la résistance à l'avancement, vers le haut.

Au début de chaque cycle, donc pendant et après la pulsion, l'accélération de la particule peut s'écrire : [5]

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g}{\rho_s}$$

L'accélération différentielle est donc indépendante de la granulométrie des particules, dépendant uniquement des masses volumiques respectives des solides et du fluide.

Théoriquement, si le temps de chute est suffisamment court et la fréquence des cycles élevée, la distance totale parcourue par les particules sera plus affectée par la différence des accélérations différentielles, donc par les masses volumiques, que par les vitesses limites des particules, donc par la granulométrie.

Le lit dans lequel tombent les particules est composé de grains juxtaposés à travers lesquels l'eau s'écoule, le tout formant une suspension épaisse de densité élevée ; les conditions pour que la sédimentation gênée devienne prépondérante sont donc réunies.

Au début de la succion, le lit commence à se compacter ; les particules les plus grosses sont bloquées, seules les fines peuvent encore s'infiltrer dans les

I-2-2 EXEMPLES D'APPAREILLAGES COMMERCIALISES :

Le tableau 1 mentionne les principaux jigs rencontrés dans l'industrie minière. On peut signaler plus particulièrement les types suivants :

- **Jig Denver Mineral :**

Il est largement utilisé, spécialement pour récupérer les minéraux lourds dans un circuit fermé de broyage-classification afin d'éviter leur surbroyage. La valve rotative d'ajout d'eau peut être réglée de façon à être ouverte à un quelconque mouvement du cycle du jig, la synchronisation entre la valve et le diaphragme étant assurée par courroie. On peut ainsi aller de la neutralisation de la succion au parfait équilibre entre pulsion et succion. Le diaphragme a une course de 10 mm environ pour une fréquence de 200 oscillations par minute pour les granulométries supérieures à 6 mm, à 325 oscillations par minute pour les fines. Ces appareils existent en largeurs de 20, 30, 40 et 60 cm.

- **Jig Remer :**

Il possède une particularité consistant dans l'action conjuguée de deux excentriques qui combine les mouvements alternatifs relativement lents des jigs ordinaires, avec une pulsation de fréquence plus élevée, ce qui assure une grande liberté de mouvement aux particules du lit en cours de classement, et le minerai se comporte à la façon d'un produit fluidisé. Seules les particules fines filtrent à travers la grille. Les lourds grenus sont évacués en bout d'appareil par ponction de la strate inférieure, les légers par ponction latérale de la strate supérieure. Ces jigs ont des surfaces de séparation de 1,5 m de large et 3,35 ou 4,875 m de long, ce qui leur assure un débit de 30 à 50 t/h.

Diffèrent types de jigs [2]						
Type	Méthode de pulsion		Jig pour minerai : recueil des lourds		Jig pour charbon : recueil des lourds	
			sur la grille	à travers la grille	sur la grille	à travers la grille
Grille mobile			Halkyn James	Hancock	Wilmot Pan	
Grille fixe	Mécanisme	Piston	Harz Woodbury McLanahan Stone	Cooley Collom May	ORC Elmore Reading	Faust
		Diaphragme	Bendelari Ruoss	Denver Mineral Wemco / Remer Yuba Richards Pan Am. Placer Pan Am. Kraut IHC	Jeffrey	
	Pulsateur	Pneumatique	OPM	Batac	Batac Baum	Cortex Feldspar
		Vanne d'eau		Pan Am Neil		Vissac

Tableau 1

I-3 CONCENTRATION PAR NAPPE PELLICULAIRE FLUENTE: [2, 3 et 5]

I-3-1 Principe :

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 (Figure 2) :

- La sédimentation de la particule.
- Le déplacement sur le fond.

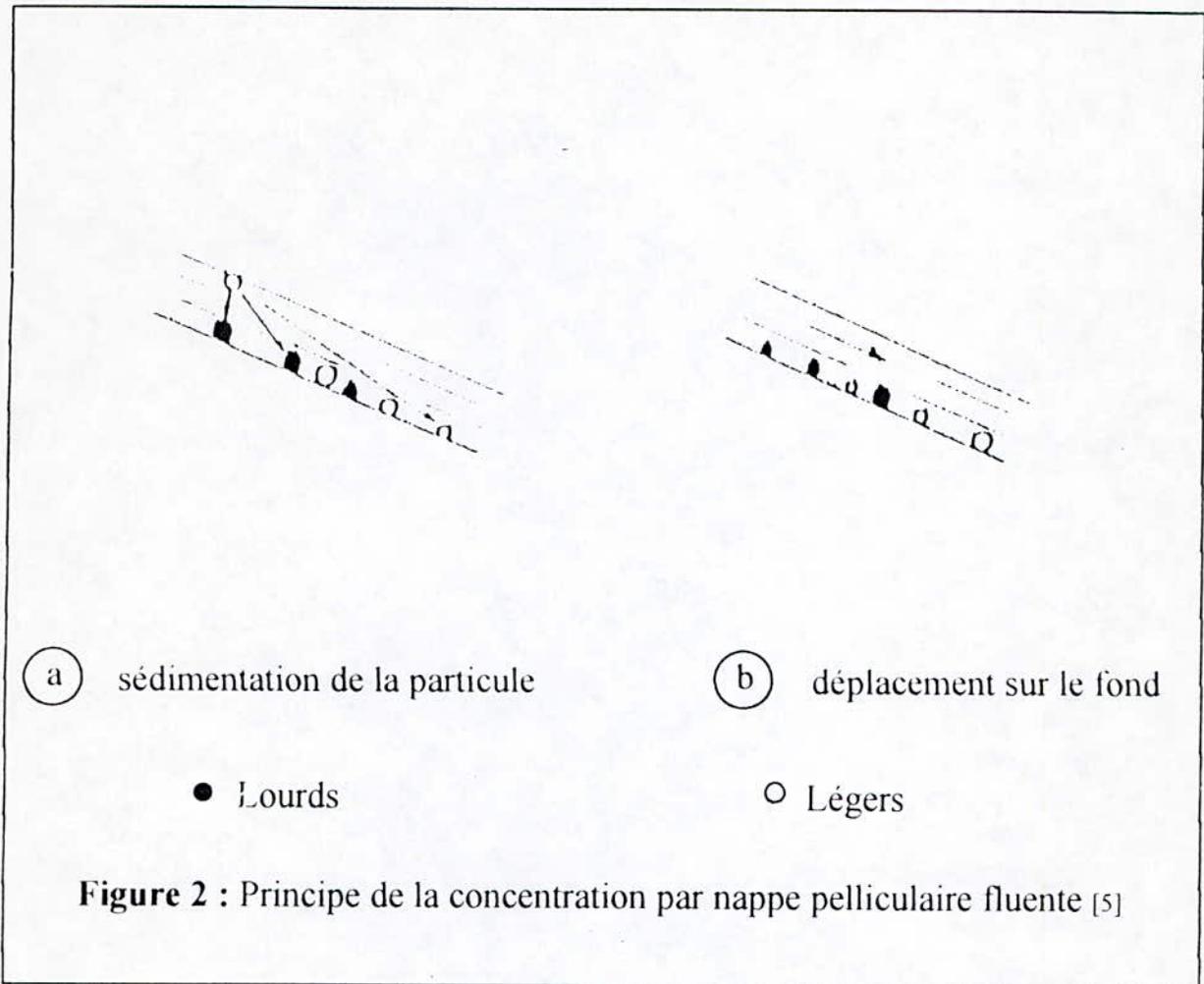
L'un des phénomènes mis en jeu est l'alluvionnement au cours duquel les grains lourds et gros sont les premiers à rencontrer le support et peuvent se trouver piégés alors que les grains légers et fins sont emportés par le courant.

Les grains qui ont atteint le support se meuvent par saltation c'est à dire déplacement par bonds successifs des particules entraînées par l'eau. La vitesse d'entraînement dépend peu de leur dimension mais de la racine carrée de leur masse volumique apparente.

Ainsi, les grains ayant la masse volumique la plus élevée se trouveront à la partie basse (ou intérieure s'il y a rotation) et ceux de masse volumique la plus faible, à la partie haute (ou extérieure).

La répartition résultant des grains est à l'opposé de la sédimentation libre, d'où l'appellation de sédimentation inverse.

Pour améliorer la séparation, on utilise des pièges (les rifles), des contraintes transverses (plan incliné mobile) et/ou la force centrifuge (plan incliné hélicoïdal).



Le tableau 2 donne les différents types d'appareils à concentration par nappe pelliculaire fluente.

Différents types d'appareils (nappe pelliculaire fluente) [5]	
Plan incliné	Soutirage
Fixe	Périodique : Sluice Continu : Pinched, cône Reichert et Spirales
Mobile	Périodique : Séparateur Bartles-Mozley tables GEC Continu : table à secousses, crossbelt et séparateur multigravité

Tableau 2

I-4 TRAITEMENT DES FINES PARTICULES (< 100 μM) : [5]

Les forces dues à la gravité décroissent rapidement au-dessous de 100 μm et celles dues à la dynamique des fluides prennent vite la première place. Il en résulte une très importante perte d'efficacité et de rendement des appareillages précédemment décrits.

Il est donc nécessaire de concevoir d'autres équipements pouvant élargir vers les fines granulométries les valorisations gravimétriques. C'est ainsi que sont apparus, ces vingt dernières années, des appareils basés sur l'action :

- de contraintes unidirectionnelles discontinues (tel que les tables GEC) ou non ;
- de contraintes orbitales (séparateurs Bartles-Mozley ; concentrateur Crossbelt) ;
- de contraintes unidirectionnelles et de la force centrifuge (concentrateur multigravité).

D'autres, ont perpétué les concepts plus anciens, comme les tables à secousses, les bandes sans fin, le tambour Johnson, le vannier à secousses.

D'autres, enfin, ont disparu après une carrière plus ou moins longue, comme les aires de lavage, les tables et les cadres circulaires, les tables corduroy et basculantes Buckman, les vanniers et bacs à tamis mobile, le séparateur Hodgson, le séparateur à cône tournant, etc.

I-4-1 CONCENTRATEURS FAISANT APPEL A UNE CONTRAINTE UNIDIRECTIONNELLE :

- **Bande sans fin :**

Elle a été développée en Afrique du Sud pour remplacer les tables Corduroy. Elle reste relativement peu connue en dehors de ce pays.

Elle est composée d'une bande sans fin en caoutchouc, munie à sa partie extérieure de riffles en forme de dents dissymétriques de 5 mm espacés de 10 mm.

Entre tambours, la bande fait 3 m, sa largeur étant de 1,5 m. Elle a une pente de 3 à 12°, le plus souvent de 8 à 10°. Son mouvement, inverse de celui de la pulpe, est de 0,3 m/min. ?

Elle travaille habituellement en tant que finisseuse pour un préconcentré d'or issu du tambour Johnson.

- **Tambour Johnson :**

Il fournit depuis 75 ans dans les mines d'or d'Afrique du Sud un préconcentré gravimétrique.

Il consiste en un tambour d'axe légèrement incliné (2 à 5 °), de 3,6 m de long et de 0,75 m de diamètre, équipé d'un revêtement intérieur rifflé (de façon analogue à la bande sans fin) en caoutchouc.

Il est alimenté par une pulpe aussi concentrée que possible. Il tourne à la vitesse de 0,1 à 0,3 tr/min et les fractions lourdes piégées dans les riffles sont recueillies dans une goulotte intérieure, les légers suivent la pente du tambour au fil de l'eau.

I-4-2 CONCENTRATEUR FAISANT APPEL A UNE CONTRAINTE UNIDIRECTIONNELLE : *orbitale*

La contrainte orbitale, créée sur une surface par la rotation contrôlée d'un balourd dans le plan de cette surface, s'est révélée être un des mécanismes les plus efficaces pour récupérer les très fines particules.

Le chemin parcouru de l'écuelle dite batée aux appareils industriels été long, mais fructueux.

- **Concentrateur Crossbelt-Bartles :**

C'est une bande en PVC de 2,4 m de large (et 2,8 m entre tambours) dont la partie axiale, où se fait l'alimentation sous forme de pulpe de 15 à 20 % en solides, est soulevée par une ride qui produit une pente transversale, alors que longitudinalement, la bande est parfaitement horizontale.

La vitesse d'avancement de la bande est un paramètre peu influant, il faut trouver sa valeur en fonction du temps de résidence optimal dans la zone d'alimentation. Son débit peut atteindre 500 kg/h et la tranche granulométrique où son efficacité est reconnue est de 5 à 150 μm .

I-4-3 CONCENTRATEUR FAISANT APPEL A UNE CENTRIFUGATION :

- **Concentrateur *Kneison Hydrostatique* (Lee-Mer industrie)**

C'est un appareil discontinu, développé au Canada pour la récupération de paillettes d'or. Il possède une double paroi et le bol central est conique et rifflé. L'alimentation en pulpe se fait dans la partie centrale. Les lourds restent prisonniers des riffles alors que les fractions légères sont rejetées. Pour éviter le

compactage du lit de lourds, de l'eau est injectée sous pression par des orifices percés dans la paroi conique du bol. L'accélération peut atteindre 60 G.

Le débit d'un appareil de 750 mm de diamètre est de 45 t/h pour une pulpe à 30 % en solides au maximum, constituée de graviers de 6 mm de taille maximale. Le débit de l'eau de contre-pression peut représenter 24 m³/h et sa pression est de 2 à 3 bars pour les fins jusqu'à 7 à 8 bars pour des graviers. Les concentrés sont éliminés lorsque les riffles sont pleins (environ 150 kg pour une unité de 750 mm).

I-5- CONCENTRATION GRAVIMETRIQUE PAR VOIE SECHE : [3 et 5]

La séparation des minéraux en fonction de leur masse volumique est réalisée en utilisant l'air comme fluide de suspension des particules. Cependant ce n'est qu'une voie de concentration marginale quant au choix des équipements et les cas d'adoption de ces méthodes restent limités.

C'est un sujet qui a été souvent sous-estimé par les techniciens, chercheurs ou exploitants. Il en résulte une connaissance très imparfaite des principes et des mécanismes régissant la séparation gravimétrique par voie pneumatique, qui est encore très empirique plutôt que théorique.

CHAPITRE II

**LA SEPARATION PAR
MILIEU DENSE**

II-1 LE PROCEDE DE LA SEPARATION PAR MILIEU DENSE:[1, 2,3,4 et 5]

C'est le plus simple de tous les procédés de séparation par gravité il a été longtemps une méthode ordinaire de laboratoire pour séparer des minéraux de densité spécifique différente.

On emploie des suspensions lourdes de densité convenable, si bien que tous les minéraux de densité moindre flottent à la surface, tandis que ceux plus denses plongent (Figure 3).

La séparation se fait suivant la poussée d'Archimède, simple ou multipliée par un coefficient de force centrifuge. Cette poussée agit de la même façon quelle que soit la dimension des particules.

La précision de la séparation dépend essentiellement des qualités du fluide et du degré de libération atteint.

Depuis que la plupart des liquides employés dans les laboratoires sont toxiques, ou donnent des vapeurs nocives ; le médium lourd employé dans des séparations industrielles est une suspension épaisse (appelée aussi pulpe) de certains solides lourds dans l'eau, lesquels se comportent comme une suspension lourde.

Le procédé offre certains avantages sur d'autres procédés de traitement :

- Il est possible de traiter de très importantes quantités de minerais. Des débits dépassant 10 000 t par jour ne représentent pas une impossibilité technique.

- Il peut effectuer une séparation aiguë à toute densité nécessaire, avec un haut degré d'efficacité même en présence d'un grand pourcentage de matière de densité proche.

- La densité de séparation peut être contrôlée étroitement, dans une densité relative de plus ou moins de 0,005 kg/l et peut être entretenue, sous des conditions normales, pour des périodes indéfinies.

- Elle peut en outre, être changée à volonté, équitablement et rapidement, selon les exigences que l'on peut rencontrer.

- Enfin, il est particulièrement intéressant de noter que le traitement par liquide dense permet d'augmenter la teneur des tout venants pauvres.

Il facilite le traitement dans ses étapes suivantes, réalisant ainsi une préconcentration visant à obtenir des stériles définitifs. Il en résulte une réduction en importance de l'usine de concentration proprement dite et parfois une simplification des méthodes.

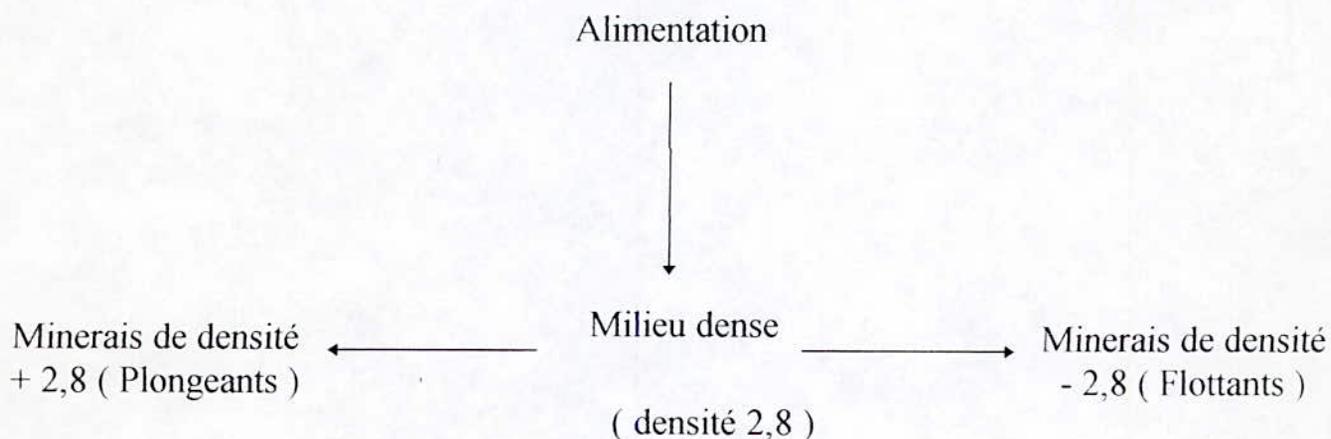


Figure 3 : Principe de la séparation par milieu dense [4]

La séparation par milieu dense est applicable à tout minerai dans lequel, après un degré convenable de libération en concassage, il y a assez de différence dans la densité spécifique entre les particules à séparer en minerais et stérile.

Le procédé est appliqué plus largement quand la différence de densité survient à des particules de grosse taille, car l'efficacité de séparation diminue avec la taille ; ce qui est dû à la lenteur de la vitesse d'écoulement de sédimentation des particules.

Les particules doivent de préférence être de 3 mm de diamètre, afin que la séparation soit efficace sur une différence de densité spécifique de 0,1 ou moins.

La séparation pour les particules de diamètre de 500 μm et moins, peut être faite par l'emploi de séparateurs centrifuges.

Tant qu'il y a une différence de densité, il n'y a aucune limite supérieure de taille sauf celle déterminée par la capacité de la laverie à manier le produit.

La séparation par milieu dense est possible avec des minerais dans lesquels les minéraux sont gros dans l'ensemble.

Si les minerais sont finement disséminés dans la gangue, alors une différence convenable de densité entre les particules concassées ne peut être développée par un concassage rude.

La séparation par milieu dense est plus souvent utilisée pour des minerais métallifères associés à une gangue relativement légère. Ainsi finement disséminées, la galène et la sphalérite surviennent souvent avec la pyrite comme dépôts de remplacement dans des roches tels que le calcaire ou la dolomie.

Parallèlement dans une partie de la Corniche du minerai d'étain la cassitérite est trouvée dans des filons avec un certain degré de structure en bande dans

laquelle il est associé avec un autre minéral de haute densité spécifique tel que les sulfures de fer, arsenic, cuivre, et les oxydes de fer.

Les fragments de filon contenant ces minéraux ont donc une plus grande densité que la silice stérile, ce qui permet une séparation rapide.

II-2 LES LIQUEURS : [3, 4 et 5]

Les liqueurs denses sont largement employées dans les laboratoires pour l'évaluation de la densité de séparation technique sur des minerais.

Les tests de liqueur dense peuvent être exécutés pour déterminer la faisabilité de la séparation par milieu dense sur un minerai particulier, et déterminer la densité économique de séparation. Ils peuvent aussi être employés pour évaluer l'efficacité d'un actuel circuit de milieu dense en exécutant des essais sur les produits plongeants et flottants.

L'objectif est de séparer les échantillons de minerai en une série de fractions selon la densité et établir le rapport entre les minéraux de densité basse et haute.

Les liqueurs les plus souvent utilisés sont :

Le Tétrabromoéthane ($(\text{CHBr}_2)_2$), avec une densité spécifique (*Masse volumique*) de 2,96 est communément employé. Il peut être dilué avec de l'acétone ou l'éther pour donner une gamme de densités en dessous 2,96.

Le Bromoforme (CHBr_3), avec une densité spécifique de 2,89 ; il peut être mélangé avec le carbone tetrachloride pour donner une densité dans la gamme de 1,58 a 2,89.

Pour des densités supérieures à 3,3 l'Iodure de méthylène est utilisé, dilué si nécessaire avec le triéthyl orthophosphate.

La solution aqueuse de polytungstate de sodium a certains avantages par rapport aux liqueurs organiques. En effet, elle est très peu volatile, non toxique et permet d'atteindre aisément des densités de plus de 3,1.

La liqueur de Clérici (Formiate et malonate de thallium) permet la séparation, à des densités allant jusqu'à 4,2 à 20°C, et 5,0 à 90°C.

La séparation allant jusqu'à 12,0 kg^l⁻¹ peut être réalisée par la méthode magnétohydrostatique, c'est à dire l'utilisation de la force gravitationnelle supplémentaire produite dans une solution d'un sel paramagnétique, quand il est situé dans un gradient de champ magnétique. Ce type de séparation est applicable principalement aux minéraux non magnétiques avec une limite granulométrique inférieure de 50µm.

Beaucoup de liqueurs denses donnent des vapeurs toxiques et doivent être employées avec une ventilation adéquate: Les liqueurs de Clérici sont extrêmement nocives et doivent être maniées avec un soin extrême. L'emploi des liqueurs sur une échelle industrielle n'est pas praticable, et les procédés industriels emploient des particules fines suspendues dans l'eau.

II-3 LES SUSPENSIONS : [3]

C'est une concentration volumétrique en dessous de 30%, de fines suspensions moulues dans l'eau qui se comportent essentiellement comme un simple fluide Newtonien. Au-dessus de cette concentration, la suspension n'est plus Newtonienne.

Une certaine force minimale, doit être appliquée avant que le mouvement des particules ne commence et que la séparation survienne. Ainsi les petites particules, sont incapables de surmonter la rigidité offerte par le médium avant que le mouvement ne puisse être réalisé.

Dans la pratique le médium n'est jamais statique, ce mouvement est assumé par les écumeurs, l'air, et notamment par le mouvement provoqué par le plongement de la matière, où la densité de séparation est dissimulée au plus près de la densité du médium dans le bac.

Dans le but de produire une suspension stable de densité suffisamment haute, avec une viscosité raisonnablement basse, il est nécessaire d'employer avec perfection, des particules avec une grande densité qui ne doivent pas briser pendant les opération sous peine de nuire à la récupération et de faire varier la viscosité. Les particules doivent être dures avec aucune tendance à l'épaississement.

Une agitation est nécessaire pour maintenir la suspension et baisser la viscosité apparente, car la viscosité et stabilité sont les deux paramètres à contrôler pour garantir la qualité de la suspension.

On peut être amené à ajouter de la bentonite ou de l'argile à la suspension pour améliorer la stabilité. Inversement pour éliminer un excès d'ultrafines provenant du minerai ou créées par l'usure du médium.

La viscosité croît rapidement avec la nécessité d'obtenir des milieux de densité supérieure (Figure 4).

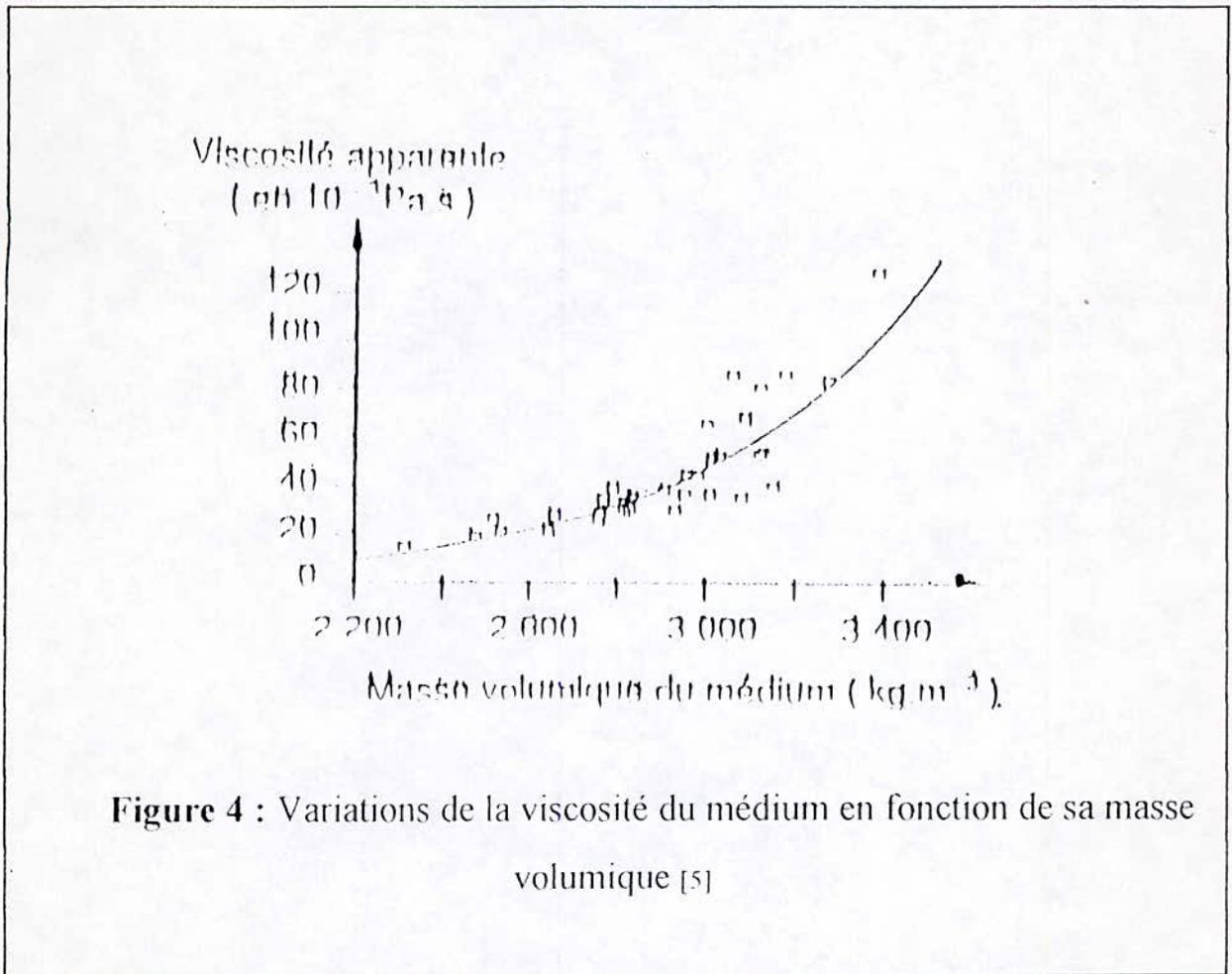


Figure 4 : Variations de la viscosité du médium en fonction de sa masse volumique [5]

Il faut noter aussi que la dégradation du médium augmente la viscosité apparente en augmentant la superficie du médium.

Le médium doit être enlevé aisément des surfaces minérales en lavant, et doit être aisément récupérable des particules fines du minerai lavé.

Il ne doit pas être affecté par la constitution du minerai et doit résister à l'attaque chimique, comme la corrosion.

La galène était initialement employée comme médium, et quand elle est pure, elle peut donner une densité de bain de près de 4,0. Au-dessus de ce niveau, la séparation de minerai est ralentie par la résistance de la viscosité.

La flottation, qui est un procédé coûteux, était employée pour nettoyer le médium contaminé, mais le principal inconvénient est que la galène est assez douce et tend à écumer aisément. Elle a aussi tendance à oxyder, ce qui endommage l'efficacité de la flottation.

La galène est encore employée comme médium dans quelques concentrateurs de zinc, tel que le concentrateur Sullivan au Canada.

Actuellement, le médium le plus largement employé pour les minerais métallifères est le ferrosilicium, tandis que la magnétite est employée dans la préparation du charbon. La récupération du médium dans les deux cas se fait par la séparation magnétique.

La magnétite de densité 5,1 est relativement peu coûteuse, et est employée pour entretenir des densités de bain allant jusqu'à $2,5 \text{ kg l}^{-1}$ pour une maille de broyage de $150 \mu\text{m}$.

Le ferrosilicium de densité entre 6,7 et 6,9 est une combinaison de fer et de silicium qui ne devrait pas contenir moins de 82% de Fe et 15 à 16% de silicium. Si le contenu de silicium est inférieur à 15%, la combinaison tendra à corroder, tandis que s'il est de plus de 16%, la susceptibilité magnétique sera très réduite.

Les pertes de ferrosilicium d'un circuit de milieu dense varient largement. Elles vont de 0,1 à plus que 2,5 kg/t de minerai traité. Les pertes, hormis les déversements, surviennent essentiellement de la séparation magnétique et par l'adhérence du médium aux particules de minerai.

La corrosion se traduit habituellement par des pertes relativement réduites, et peut être empêchée efficacement en maintenant le ferrosilicium dans son état passif. Ce qui se réalise par diffusion d'oxygène dans le médium, ou par l'addition de petites quantités de nitrite de sodium.

A 15% de Si, la densité de ferrosilicium est de 6,8 et un médium de densité 3,2 peut être préparé.

Diverses tailles sont produites de 95% - 150 μ m à 95% - 40 μ m. La matière la plus fine étant employée pour le traitement de minerai plus fin.

Le ferrosilicium atomisé consiste en des particules arrondies qui produisent des viscosités apparentes basses, et peut être employé pour produire des densités de bain allant jusqu'à 3,4 kg l⁻¹.

II-4 RECUPERATION ET REGENERATION DU MILIEU : [3 et 5]

La récupération et la régénération du médium revêtent une importance technique et économique puisqu'elles conditionnent la préparation et la rentabilité du procédé.

A la sortie de l'appareil de traitement, les produits lourds et légers entraînent avec eux du médium qui doit être récupéré.

Dans une première phase, on recueille par simple égouttage du médium dont la densité est voisine ou égale à celle du bain.

Dans une deuxième phase, un lavage sur crible permet de récupérer un médium dilué, qu'il s'agit d'épurer et de concentrer par procédé magnétique (magnétite, ferrosilicium) ou par flottation (Figure 5 et Figure 6) jusqu'à ce qu'il ait la densité du bain.

La qualité de la récupération conditionne une perte minimale de médium ; selon les cas, cette perte peut être de 100 à 1 000 g par tonne traitée.

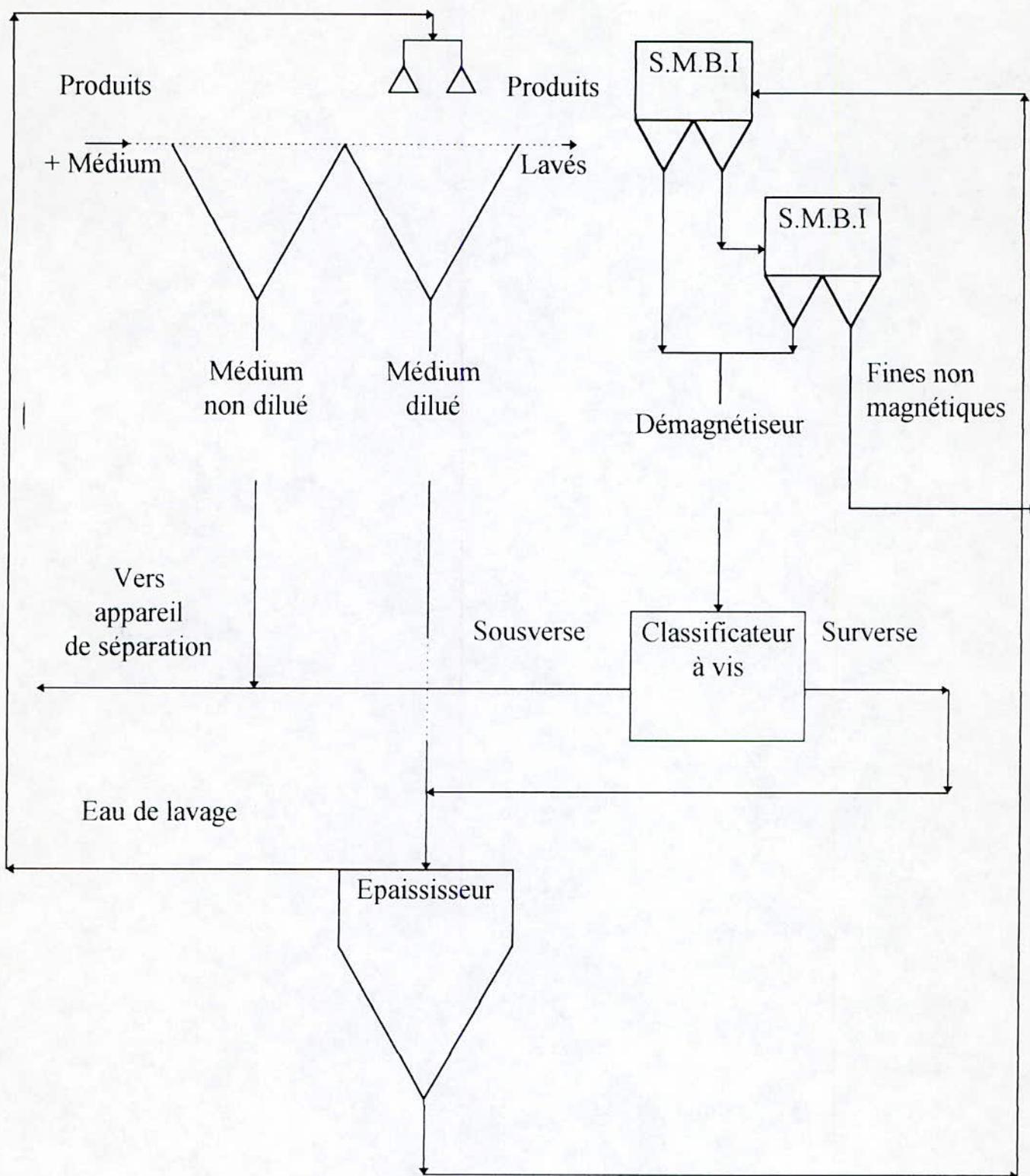


Figure 5 : Récupération d'un médium dilué à base de magnétite ou de férrosilicium [5]

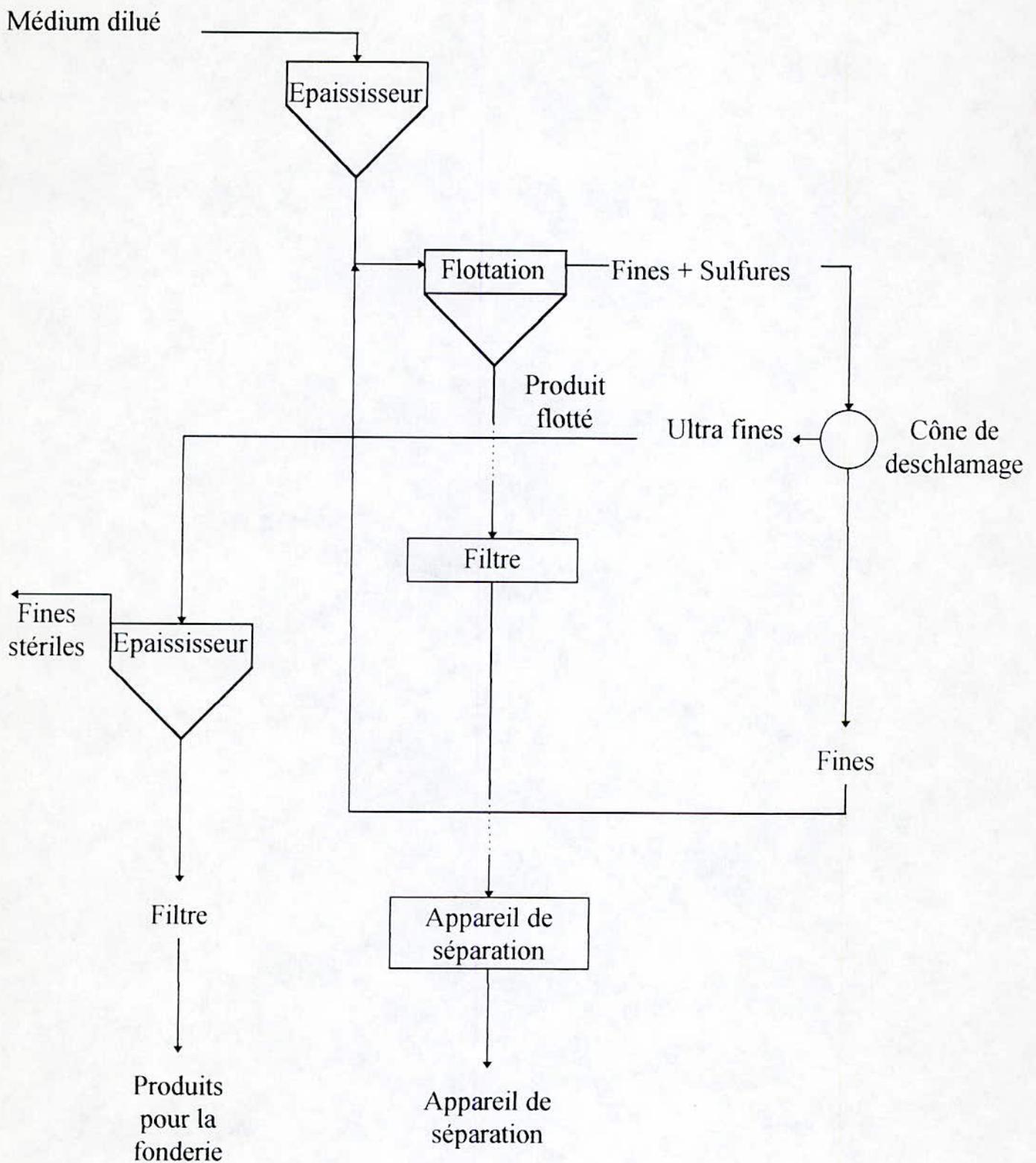


Figure 6 : Récupération d'un médium dilué à base de galène [5]

II-5 APPAREILLAGES DISPONIBLES :

Plusieurs types de bac séparateurs sont utilisés. Ils peuvent être classés en bacs gravitationnels (statique) et centrifuges (dynamique).

II-5-1 APPAREILS DE TYPE STATIQUE :

Ce sont les appareils qui ont les plus grand débits, les plus grandes dimensions et des écarts probables faibles puisque ne travaillant que sur des granulométries grossières.

On peut les classer suivant le mode d'évacuation des plongeants : dans le type tambour (Figure 7), l'auge tourne et sert à relever les plongeants.

Dans d'autres catégories, l'auge est fixe et munie d'un dispositif de relevage soit par courant de liqueur (cône Wemco, bac Static PIC-FCB, Figure 8), soit par roue verticale (bac Teska, Figure 9), soit par roue inclinée (Drewboy, Figure 10).

Les performances sont très variables selon les cas ; citons par exemple :

- pour les bacs, des débits jusqu'à 100 et même 500 t/h de minerai de 3 à 80 mm,
- pour les tambours, des débits de 350 t/h de minerai ou de charbon de 10 à 200 mm,
- pour le Drewboy, des débits de 1000 t/h de charbon de 3 à 1000 mm.

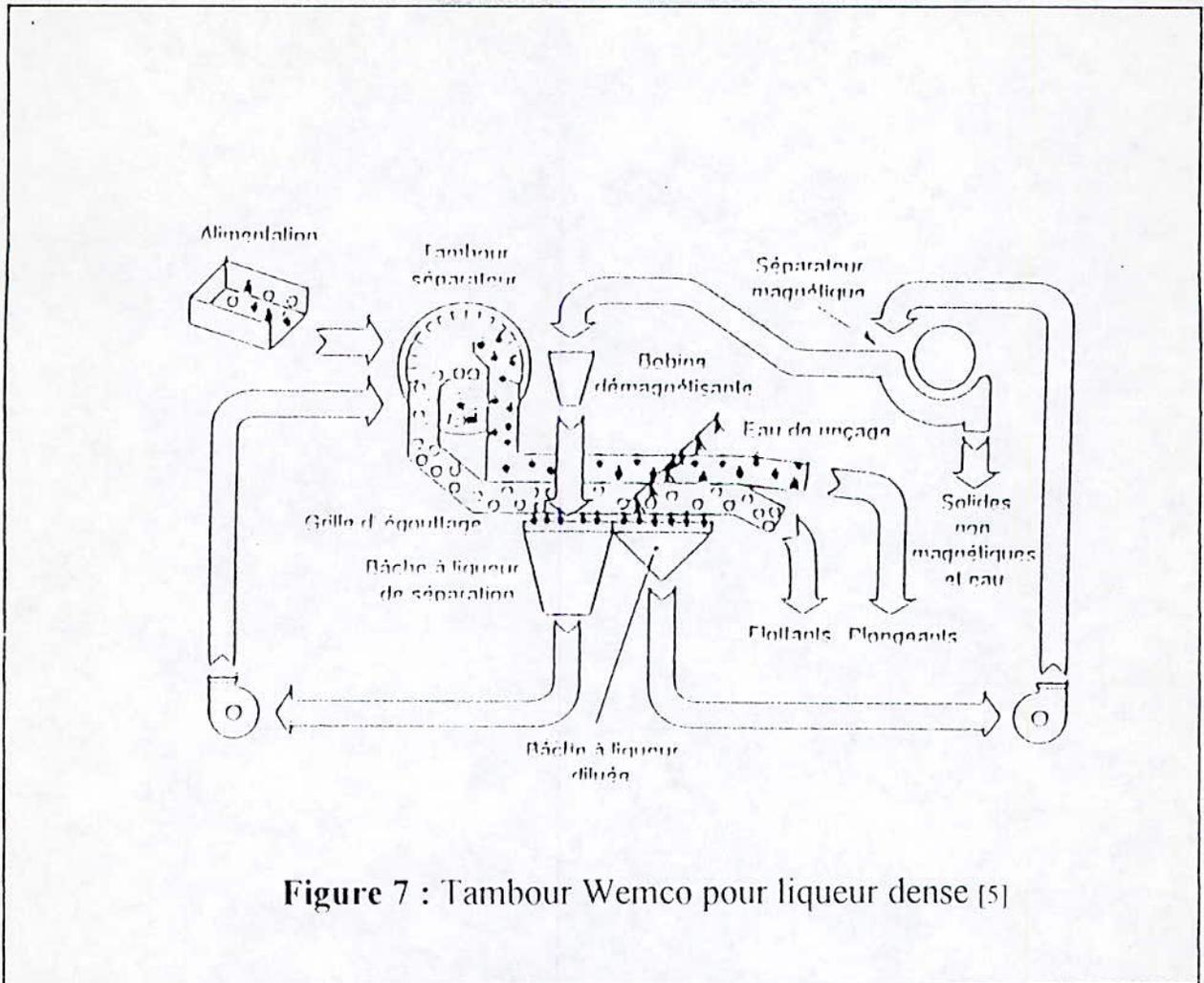


Figure 7 : Tambour Wemco pour liqeur dense [5]

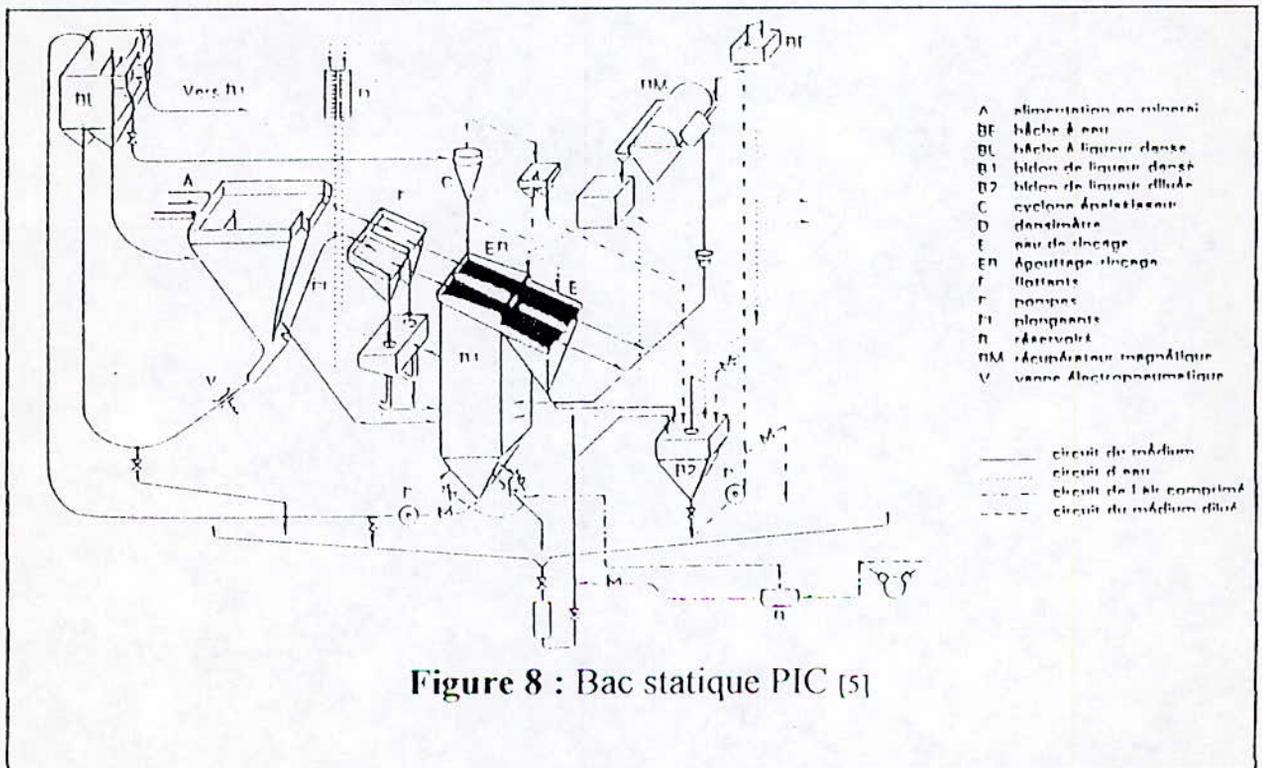


Figure 8 : Bac statique PIC [5]

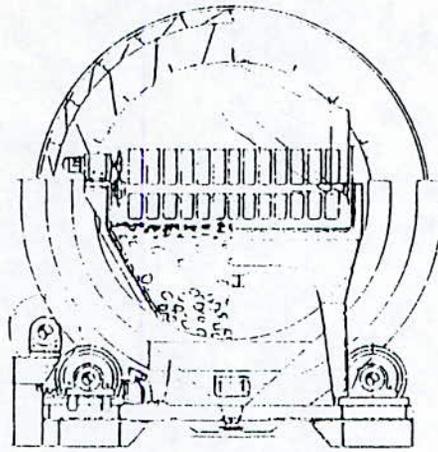


Figure 9 : Bac Teska [3]

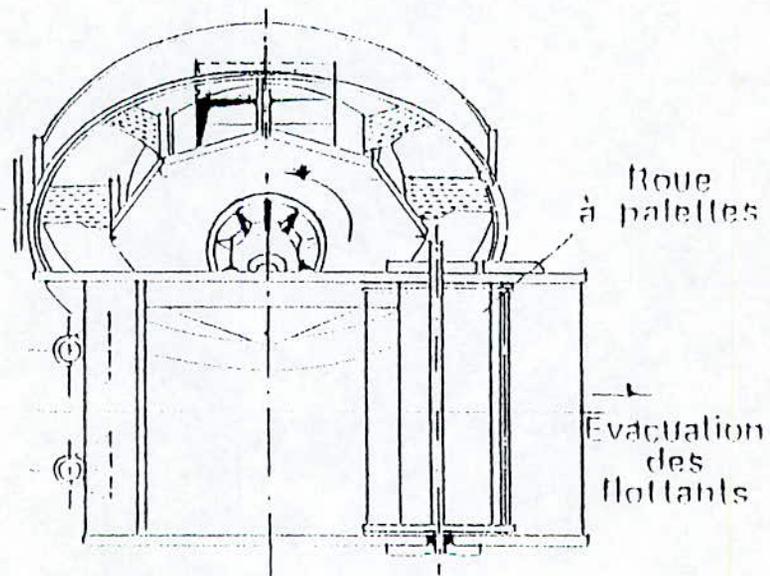


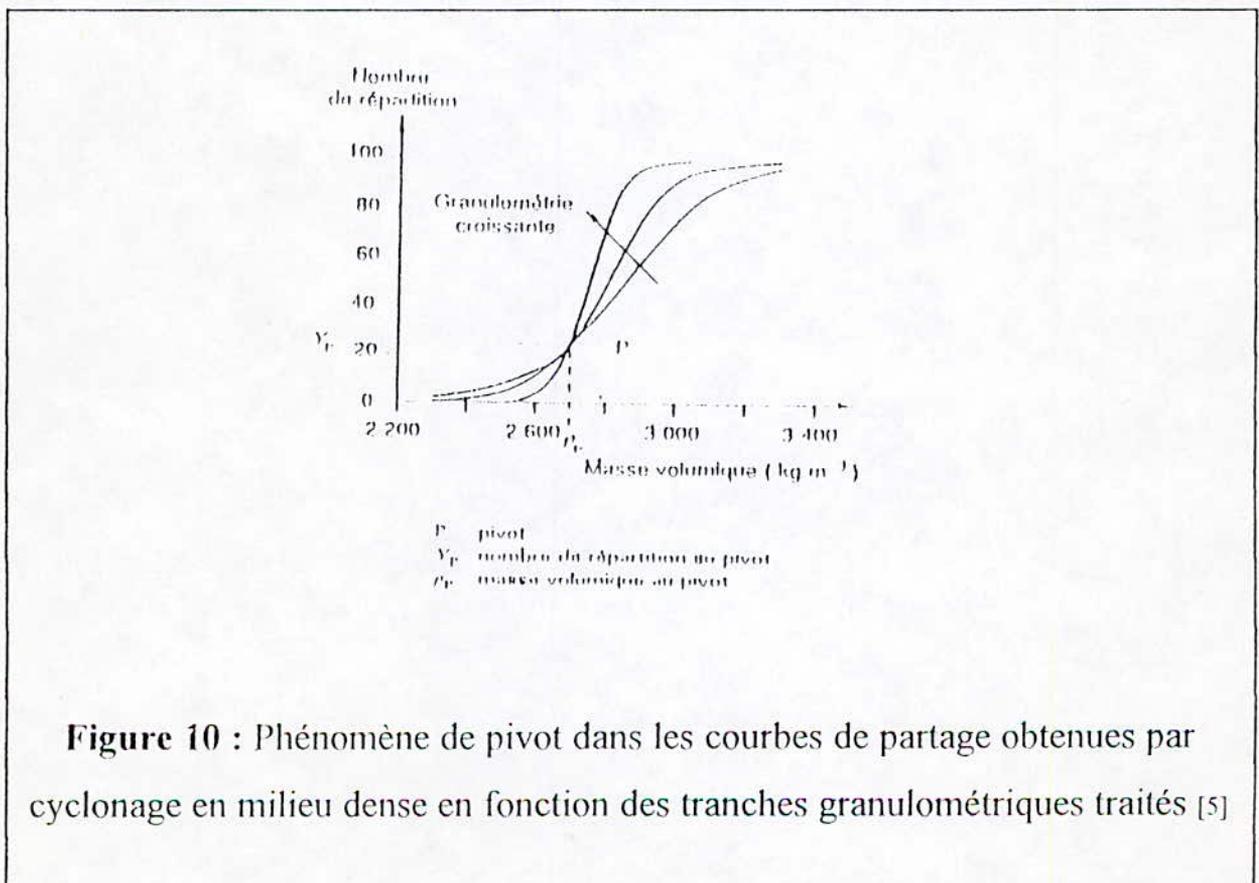
Figure 10 : Procédé Drewboy [3]

II-5-2 APPAREILS DE TYPE DYNAMIQUE :

Ce sont des appareils utilisant la force centrifuge pour accélérer la sédimentation des lourds et lutter contre la viscosité des suspensions en cas de traitement des fractions les moins grenues (en général, comprises entre 20 ou 30 mm et 1 mm, parfois 500 ou 300 μm dans les opérations les plus pointues).

Ils ont le grand avantage de pouvoir travailler à une densité de coupure supérieurs à celle de la suspension par suite de la centrifugation du médium.

Cependant les chercheurs australiens ont signalé que, lorsque l'on réalise les courbes de partage de séparations tranche granulométrique par tranche granulométrique avec un cyclone en liqueur dense, ces courbes pivotent autour d'un point induit par le comportement du médium dans le cyclone, et qui serait défini par la densité et le rendement du médium a la sousverse (Figure 10)



II-5-2-1 Principaux types d'appareils :

- *Les cyclones :*

Ils sont tous issus des travaux des charbonnages hollandais (Stamicarbon-DSM). Ils peuvent atteindre des diamètres de 750 mm dans le cas du charbon et traiter 130 t/h ; pour les minerais industriels ou métalliques, un tel débit est atteint avec des diamètres de 350 mm. L'égouttage des produits est effectué sur grille courbe et le rinçage sur des cribles (Figure 11).

- *Le Dyna-Whirlpool :*

C'est un appareil cylindrique incliné où le minerai est introduit axialement et la suspension injectée tangentiellement. Il délivre également deux produits et peut traiter des débits d'au moins 100 t/h de particules pouvant atteindre 50 mm (Figure 12) ; la variante *Larcodem* est utilisée dans les charbonnage pour des granulométries de 0,5 à 100 mm à des débits pouvant atteindre 250 t/h.

- *Le Tri-Flo :*

Dérivé du précédent il incorpore un second étage (simple ou double) de séparation, ce qui est avantageux lorsque l'alimentation est très variable : l'appareil délivre donc deux produits lourds, issus d'un double traitement à la même densité ou de deux étapes à densités différentes, ce qui permet d'obtenir un concentré riche, un mixte et un stérile correctement épuré (Figure 13).

- *Les cyclones à eau :*

Se sont des cyclones classificateurs modifiés où le fluide dans lequel s'opère la séparation est l'eau ; les forces mises en jeu dans la classification sont minimisées en augmentant l'angle du cône (60 à 120°) et en allongeant le diaphragme.

Ils peuvent avoir 600 mm de diamètre, traiter 65 t/h d'un minerai de 30 mm ; les densités de coupures s'échelonnent entre 1,5 et 2,7 ; il sont utilisés essentiellement pour le charbon.

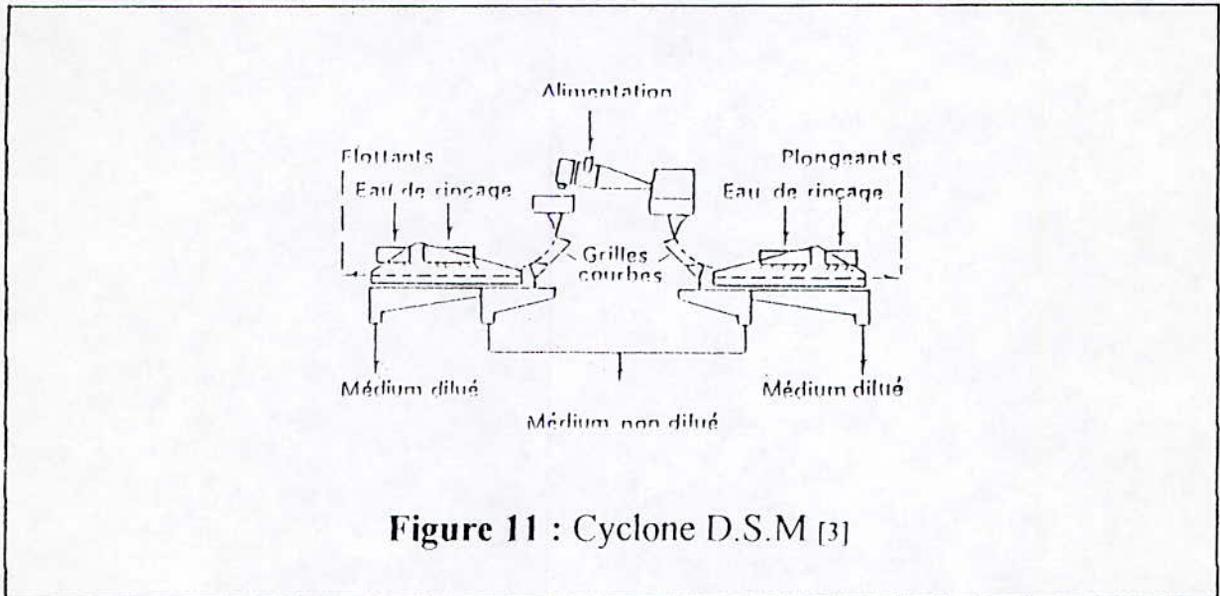


Figure 11 : Cyclone D.S.M [3]

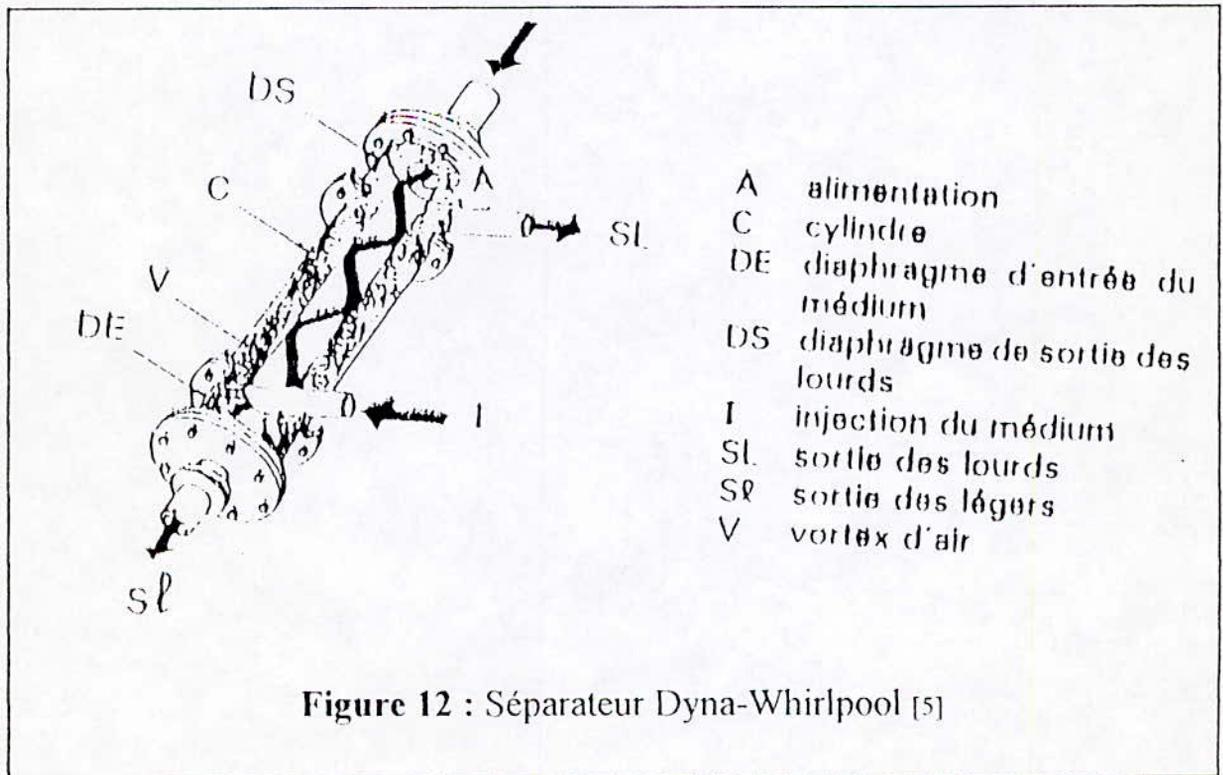
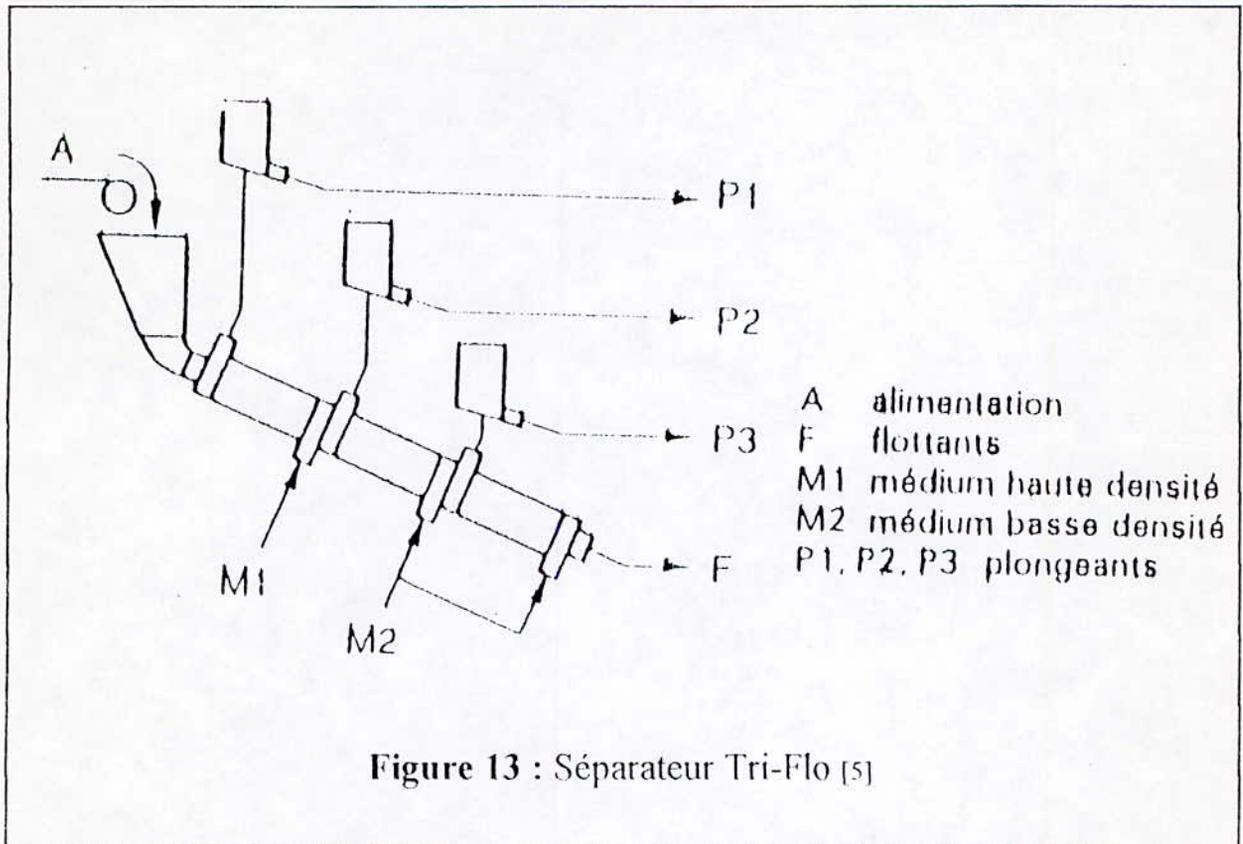


Figure 12 : Séparateur Dyna-Whirlpool [5]



II-6 LES EPREUVES DE LABORATOIRE SUR LA SUSPENSION LOURDE : [1, 2, 3, 4 et 5]

Les essais de laboratoire sont exécutés sur les minerais pour estimer l'aptitude de séparation du milieu dense sur les matériaux écrasés et déterminer la densité économique de séparation.

On prépare un liquide couvrant une rangée de densités dans un accroissement échelonné, et l'échantillon représentant le minerai écrasé est introduit dans le liquide de plus haute densité.

Le produit flottant est enlevé, lavé et mis dans le liquide suivant, de densité plus basse, puis il est transféré au liquide suivant de densité plus basse et ainsi de suite.

Le produit plongeant final est égoutté, lavé et séché, et ensuite pesé, avec le dernier produit flottant, pour donner la distribution de la densité de l'échantillon par poids.

Lorsque on évalue les fines particules de minerais on prend le soin de considérer qu'un temps suffisant est donné pour que les particules se sédimentent dans des tranches appropriées.

La centrifugation est souvent utilisée en dehors des particules fines pour augmenter le temps de sédimentation, mais celle-ci doit être faite avec soin, car les flottants ont tendance à être entraînés dans la tranche des plongeants.

Des résultats peu satisfaisant sont fréquemment obtenus avec un produit poreux, tel que le minerais de la magnésite. Ceci est dû à l'infiltration du liquide dans les pores, changeant ainsi la densité apparente des particules.

Les tranches en teneur de métal, la distribution de la densité du produit et le métal dans les tranches de l'échantillon étant analysés, ils peuvent être disposé en tableau. Le tableau 3 montre une semblable répartition d'essais accompli sur un minerais d'étain.

Résultat d'épreuve sur la suspension lourde [5]					
(1) Densité	(2) Poids %	(3) Poids % cumulé	(4) Teneur %(Sn)	(5) Distribution % (Sn)	(6) Distribution % (Sn) cumulé
-2,55	1,57	1,57	0,03	0,04	0,04
2,55-2,60	9,22	10,79	0,04	0,33	0,37
2,60-2,65	26,11	36,90	0,04	0,93	1,30
2,65-2,70	19,67	56,57	0,04	0,70	2,00
2,70-2,75	11,91	68,48	0,17	1,81	3,81
2,75-2,80	10,92	79,40	0,34	3,32	7,13
2,80-2,85	7,87	87,27	0,37	2,60	9,73
2,85-2,90	2,55	89,82	1,30	2,96	12,69
+2,90	10,18	100,00	9,60	87,31	100,00

Tableau 3

On peut observer dans les colonnes 3 et 6 du tableau que si la densité de séparation a été choisie à 2,75 ; alors 68,48 % des matières plus légères que 2,75 serait débarrassés deux comme un produit flottant, et seul 3,81 % d'éteint serait perdu dans cette tranche.

De la même façon, 96,19% d'étain serait récupéré dans le produit plongeant, lequel équivaut à 31,52% du poids original d'alimentation.

Pour une évaluation plus précise des résultats de tests du laboratoire ces derniers doivent être représentés graphiquement.

Les tests sur la suspension sont importants dans la préparation du charbon pour déterminer la densité nécessaire de séparation et le rendement espéré de charbon de teneur en cendre nécessaire.

La " teneur en cendre" détermine le montant de charbon incombustible. Vu que le charbon est plus léger que le contenu des minéraux, plus la densité de séparation est grande, plus le rendement est grand mais en contre partie la teneur en cendre croit.

$$\left(\text{Rendement} = \frac{\text{Poids de produit flottant du charbon} \times 100 \%}{\text{Poids total alimenté}} \right)$$

La teneur de la cendre de chaque tranche de densité de la suspension d'essai est déterminée à partir de la plus grande tranche, cette dernière est placée dans un four bien aéré et on augmente la température progressivement jusqu'à ce que l'on atteigne les 815°C ; on maintient l'échantillon à cette température jusqu'à ce que l'on obtienne un poids constant. Le résidu est rafraîchi et pesé.

Le contenu de la cendre est exprimé comme étant le pourcentage du poids de la cendre de l'échantillon initialement pris.

(1) Densité de fraction	(2) Poids %	(3) Cendre %	(4) Produit de la cendre	(5) Densité de séparation	(6) (7) (8) Flottants cumulés			(9) (10) (11) Plongeants cumulés		
					Poids %	Produit de la cendre	Cendre %	Poids %	Produit de la cendre	Cendre %
-1,30	0,77	4,4	3,39	1,30	0,77	3,39	4,4	99,23	2213,16	22,3
1,30-1,32	0,73	5,6	4,09	1,32	1,50	7,48	5,0	98,50	2200,67	22,4
1,32-1,34	1,26	6,5	8,19	1,34	2,76	15,67	5,7	97,24	2201,48	22,6
1,34-1,36	4,01	7,2	28,87	1,36	6,77	44,54	6,6	93,23	2172,64	23,3
1,36-1,38	8,92	9,2	82,06	1,38	15,69	126,60	8,1	84,31	2090,55	24,8
1,38-1,40	10,33	11,0	113,63	1,40	26,02	240,23	9,2	73,98	1976,92	26,7
1,40-1,42	9,28	12,1	112,29	1,42	35,30	352,52	10,0	64,7	1864,63	28,8
1,42-1,44	9,00	14,1	126,90	1,44	44,30	479,42	10,8	55,70	1737,73	34,2
1,44-1,46	8,58	16,0	137,28	1,46	52,88	616,70	11,7	47,12	1600,45	34,0
1,46-1,48	7,79	17,9	139,44	1,48	60,67	756,14	12,5	39,33	1461,01	37,1
1,48-1,50	6,42	21,5	138,03	1,50	67,09	894,17	13,3	32,91	1322,98	40,2
+1,50	32,91	40,2	1322,98		100,00	2215,15	22,2	0,00	0,00	0,0
Total	100,00		2217,15							

Tableau 4 [3]

Le tableau 4 montre les résultats des tests de la suspension effectués sur un échantillon de charbon.

Le charbon a été classé en densité de fraction (colonne 1), et suivant son poids densimétrique et sa teneur en cendre (colonne 2 et 3 respectivement).

Le pourcentage en poids de chaque produit est multiplié par la teneur en cendre pour donner la production en cendre (colonne 4).

Les totaux de produits des flottants et plongeants aux différentes densités de séparation disposées dans la colonne 5 sont classés dans les colonnes 6 et 11.

Pour obtenir le pourcentage cumulatif pour chaque densité de séparation, les colonnes 2 et 4 sont cumulées de haut en bas pour donner respectivement les colonnes 6 et 7. La colonne 7 est divisée par la colonne 6 pour obtenir le pourcentage de cendre cumulatif (colonne 8). La cendre des plongeants cumulative est obtenu essentiellement de la même manière, excepté les colonnes 2 et 4 qui sont cumulées de bas en haut pour donner les colonnes 9 et 10 respectivement.

Les résultats du tableau 4 sont représentés sur la figure 14 qui est la courbe typique de lavabilité.

Supposons que la teneur nécessaire en cendre est de 12 % dans le produit de charbon.

On peut constater dans la courbe de lavabilité qu'un tel charbon serait produit avec un rendement de 55 % (pourcentage cumulatif des flottants), et que la densité de séparation nécessaire est de 1,465.

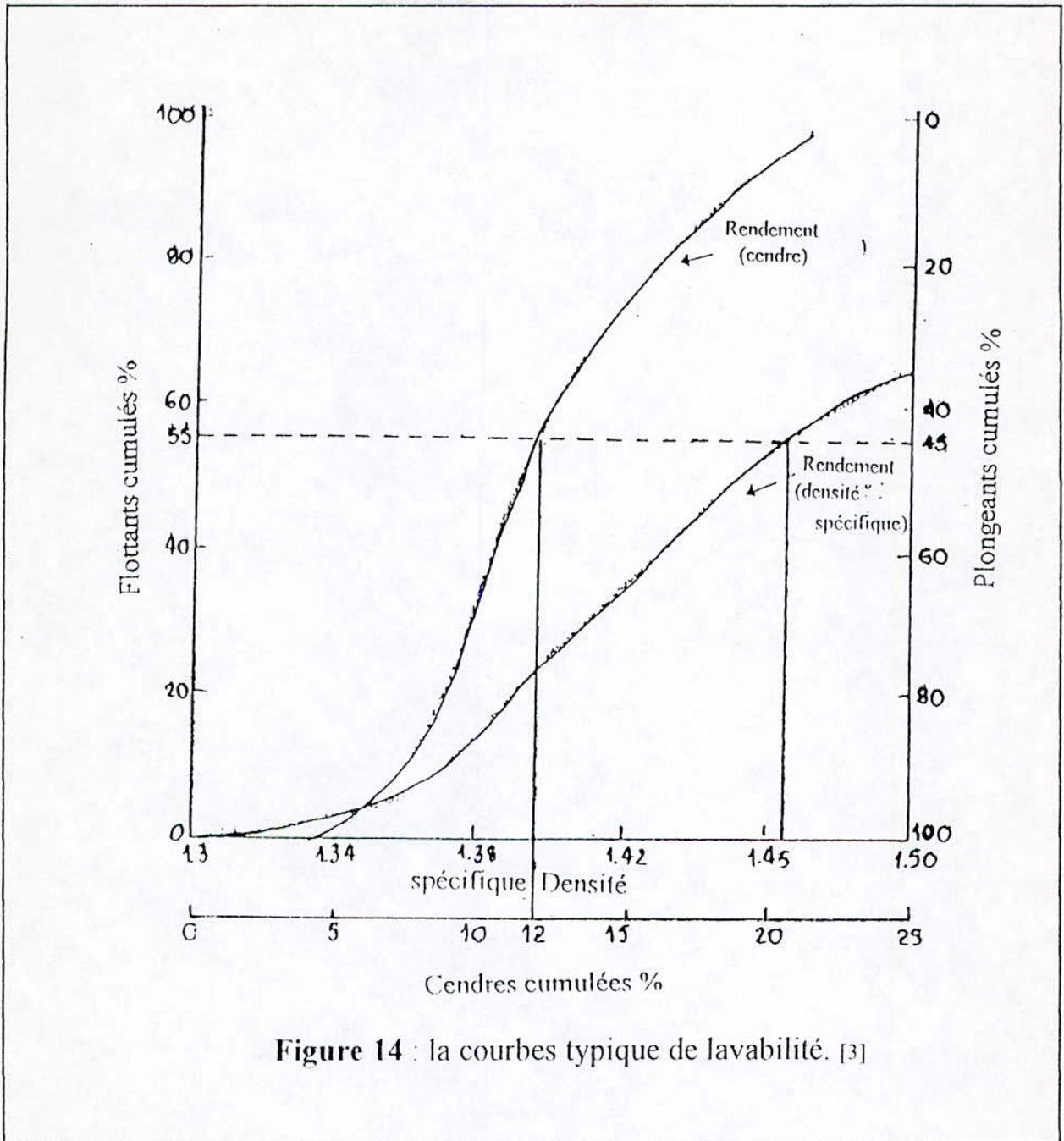


Figure 14 : la courbes typique de lavabilité. [3]

La difficulté de séparation dans l'opération de contrôle dépend principalement de la composition du produit d'alimentation qui détermine la densité de séparation.

Si l'alimentation était composée entièrement de charbon pur à une densité spécifique de 1,3 et de schiste à une densité de 2,7 la séparation serait facilement effectuée avec une grande marge de densité de travail.

Si cependant, l'alimentation consiste en une appréciable densité moyenne, alors seul une petite variation dans cette densité pourra affecter sérieusement le rendement et la teneur de la cendre du produit.

II-7 DETERMINATION DES COURBES DE LAVABILITE DU BRUT :

Ces courbes (Figure 15) permettent de juger de l'aptitude du minerai vis-à-vis d'une séparation par gravité et d'orienter le choix de la technique séparative.

II-7-1 COURBE DENSIMETRIQUE :

Elle donne la proportion en masse des plongeants en fonction de la densité de la suspension.

II-7-2 COURBES DE LAVABILITE EN FONCTION DE LA TENEUR :

Elles sont au nombre de trois, et représentent :

- Soit la proportion masse des plongeants en fonction de la teneur moyenne en élément utile (ou nuisible) :

- des produits de masse volumique $< d$ (courbe des légers) ;

- des produits de masse volumique $> d$ (courbe des lourds) ;

- Soit la teneur de la tranche densimétrique (d_i à d_{i+1}) en fonction de la proportion en masse des flottants à d_i augmentée de la moitié du rendement pondéral de la tranche densimétrique (d_i à d_{i+1}). Elle coïncide avec la courbe des légers pour 0 % de flottants et avec la courbe des lourds pour 0 % de plongeants. Sa forme préfigure l'aptitude du minerai à la séparation.

On appelle d_i la densité de la $i^{\text{ème}}$ liqueur et d_{i+1} celle de la liqueur de rang immédiatement supérieur (courbe élémentaire).

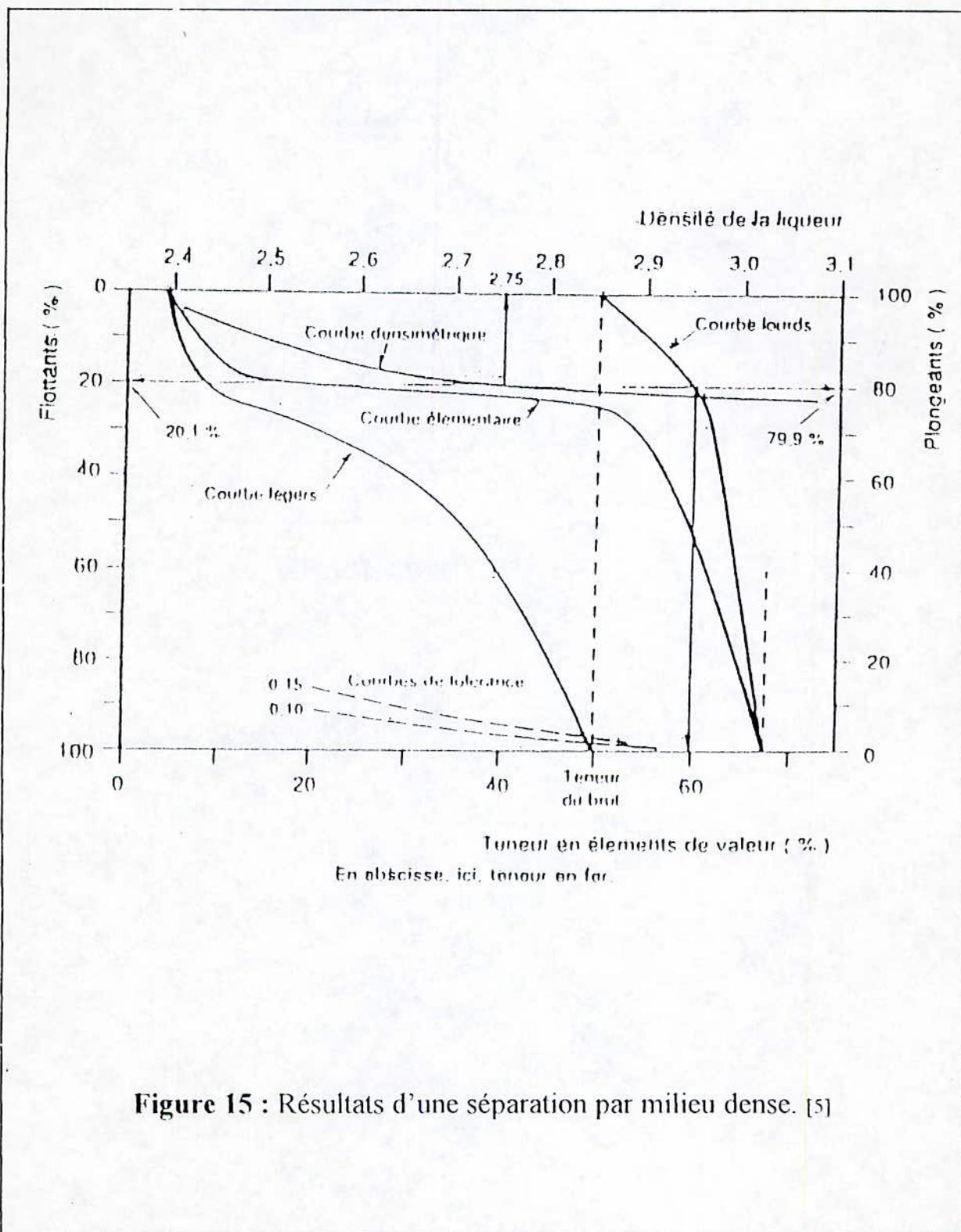


Figure 15 : Résultats d'une séparation par milieu dense. [5]

II-7-3 UTILISATION DES COURBES DE LAVABILITÉ, DES COURBES DE TOLÉRANCE ET DU CRITÈRE DE LÉONARD ET MITCHELL :

A partir des courbes de lavabilité il est possible de déterminer la densité de séparation pour un objectif donné.

Dans la pratique, cette densité varie autour de la consigne suivant le type d'appareil choisi ; $d \pm 0,02$ à $0,05$ pour un milieu dense ; $d \pm 0,10$ à $0,15$ pour les autres méthodes.

Les courbes de tolérance sont tracées en exprimant la proportion en masse de produits compris dans le domaine $d \pm t$ en fonction de d (t étant la tolérance densimétrique variant de $0,02$ à $0,15$).

Léonard et Mitchell évaluent le degré de difficulté de la séparation en fonction d'une tolérance densimétrique moyenne à $0,1$ (Tableau 5).

Relation empirique entre la tolérance densimétrique et le type de procédé utilisable [5]			
% en masse dans le domaine $d \pm 0,1$	Degré de difficulté escompté	Qualité du procédé recommandé	Type d'appareillage utilisé
0 à 7	Simple	Procédés à faible Ep	Jig, table, sluice, cône, spirale, SMD, vanner ...
7 à 10	Modérément	Procédés à faible Ep	
10 à 15	Difficile	Procédés à faible Ep Bons opérateurs	
15 à 20	Très difficile	Procédé à faible Ep	SMD
20 à 25	Très très difficile	Très bon opérateur	
> 25	Exceptionnel	procédés rares Très bons opérateurs	SMD avec contrôle très sérieux

Tableau 5

II-8 LA CONSTRUCTION DE LA COURBE DE PARTAGE :

L'erreur de séparation probable d'une opération par milieu dense peut être déterminée en échantillonnant les produits des flottants et plongeants et en exécutant des essais de liqueurs lourdes ; cela permet de déterminer en même temps la somme de matière égarée dans chacun des produits.

La gamme de densités de la liqueur appliquée doit envelopper la densité de travail du milieu dense.

Pour mieux comprendre nous reprendrons les résultats d'essais de la liqueur dense sur des échantillons de flottants et plongeants d'un bac séparant le charbon (flottant) du schiste (plongeant) qui sont illustrés dans le tableau 6.

Densité	(1) Masse en % (Flottants)	(2) Masse en % (Plongeants)	(3) Pourcentage de flottant par rapport à l'alimentation	(4) Pourcentage de plongeant par rapport l'alimentation	(5) L'alimentation en %	(6) Densité Moyenne	(7) Coefficient de partage
-1,30	83,34	18,15	68,83	3,15	71,98		4,39
1,30-1,40	10,50	10,82	8,67	1,89	10,56	1,35	17,80
1,40-1,50	3,35	9,64	2,77	1,68	4,45	1,45	37,75
1,50-1,60	1,79	13,33	1,48	2,32	3,80	1,55	61,05
1,60-1,70	0,30	8,37	0,75	1,45	1,71	1,65	85,38
1,70-1,80	0,16	5,85	0,13	1,02	1,15	1,75	88,70
1,80-1,90	0,07	5,05	0,06	0,88	0,91	1,85	93,62
1,90-2,00	0,07	4,34	0,06	0,75	0,81	1,95	92,68
+2,00	0,12	24,45	0,35	4,25	4,60		92,39
Totals	100,00	100,00	82,60	17,40	100,00		

Tableau 6 [3]

Les colonnes 1 et 2 sont les résultats d'essais de laboratoire sur les produits des flottants et plongeants.

Les colonnes 3 et 4 lient ces résultats à la distribution totale de la matière d'alimentation aux flottants et plongeants qui doivent être déterminés en pesant le produit.

La fraction pondérale peut être additionnée dans les colonnes 3 et 4 qui donnent ensemble la distribution reconstituée du poids d'alimentation dans chaque fraction densimétrique (colonne 5). La colonne 6 donne la densité spécifique nominale de chaque gamme de densités, c'est à dire la matière de densité dans la tranche de 1,30-1,40 est supposée avoir une densité spécifique située au milieu de ces densités (1,35).

Le coefficient de partage (colonne 7) est le pourcentage de la matière d'alimentation d'une certaine densité spécifique nominale qui repose au fond,

c'est à dire
$$\frac{\text{La colonne 4}}{\text{La colonne 5}} \times 100.$$

La courbe de partage peut donc être construite en complétant le coefficient de partage avec la densité spécifique nominale, dont l'erreur de séparation probable du bassin peut être déterminée.

Il existe une méthode plus rapide, pour déterminer la courbe de partage d'un séparateur, laquelle utilise des traceurs de densité.

Il s'agit du « **colour-coded plastic tracers** » qui peut être ajouté au procédé, les produits morcelés étant recueillis et donnés au tri par la densité (couleur). Ainsi il est simple de construire la courbe de partage, directement, en notant la proportion de chaque traceur de densité rapportant à l'un ou l'autre produit des flottants ou plongeants. L'application des méthodes de traceur a montré que des incertitudes considérables peuvent exister dans la détermination expérimentale des courbes de partages à moins qu'un nombre adéquat de traceurs soit employé.

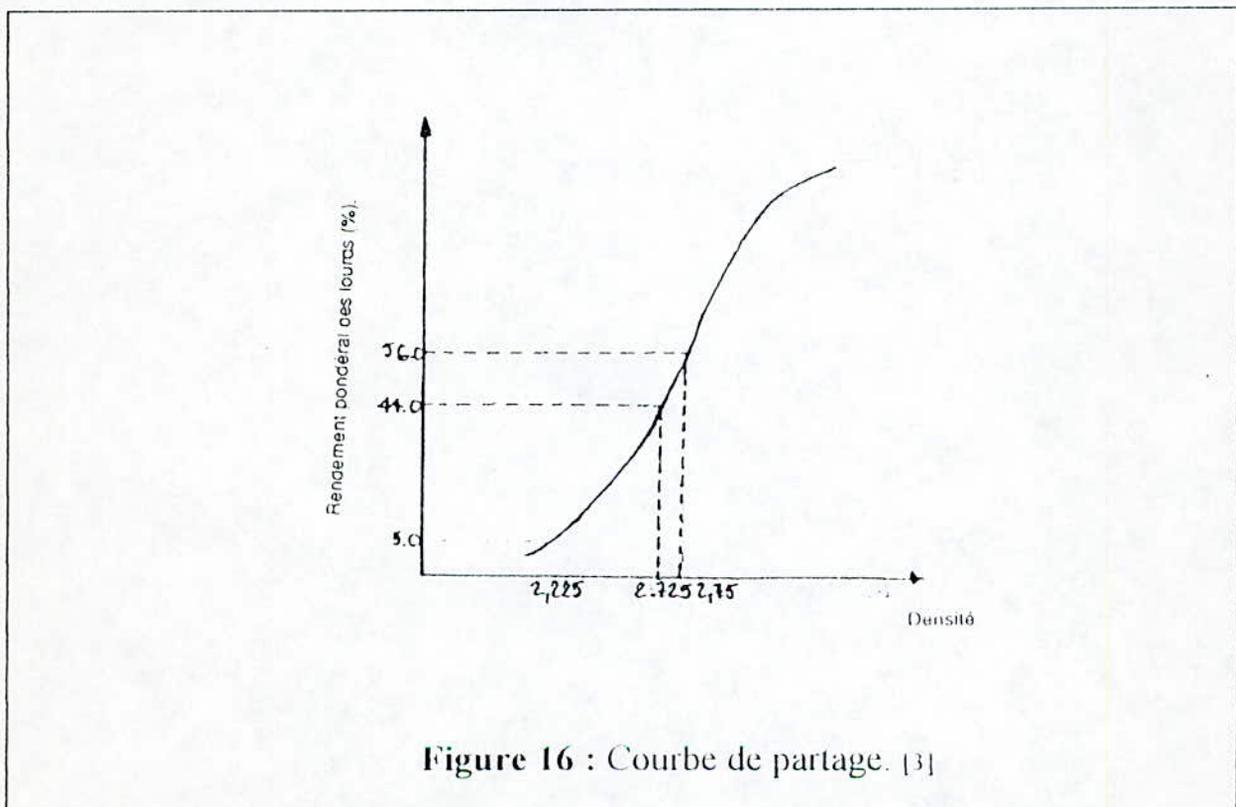
Les courbes de partage peuvent être employées pour prévoir les produits qui seraient obtenus si le tout-venant ou la densité de séparation étaient changés. Les

courbes sont spécifiques au bassin pour lequel elles sont établies et ne sont pas affectées par le type de tout-venant fourni.

La courbe de partage pour un bac peut être employée pour déterminer la somme de matière égarée qui se rapportera aux produits pour toute matière d'alimentation particulière.

Par exemple, la distribution des produits du minerai d'étain, qui ont été évalués par les essais de la liqueur dense (Tableau 3), peut être déterminé pour le traitement dans un séparateur de travail. La figure 16 montre une courbe de partage pour un séparateur qui a un E_p de 0,07.

La courbe peut être transférée légèrement le long de l'abscisse jusqu'à la densité efficace de séparation correspondant à la densité de séparation évaluée au laboratoire qui est de 2,75. La distribution de matière en plongeants et flottants peut maintenant être évaluée. Par exemple à une densité spécifique nominale de 2,725 ; 44% du tout-venant est rapporté aux plongeants et 56% aux flottants



Densité	Densité Moyenne	L'alimentation			Distribution en %		Plongeurs			Flottants		
		(1) Poids %	(2) Sn %	(3) Dist %	(4) Plongeurs %	(5) Flottants %	(6) Poids %	(7) Sn %	(8) (Alimentation) Dist %	(6) Poids %	(7) Sn %	(8) (Alimentation) Dist %
-2,55		1,57	0,03	0,04	0,00	100,00	0,00	0,03	0,00	1,57	0,003	0,04
2,55-2,60	2,575	9,22	0,04	0,33	5,0	94,00	0,35	0,04	0,02	8,67	0,04	0,31
2,60-2,65	2,625	26,11	0,04	0,93	13,5	86,5	3,52	0,04	0,13	22,59	0,04	0,80
2,65-2,70	2,675	19,67	0,04	0,70	27,0	73,0	5,51	0,04	0,19	14,35	0,04	0,51
2,70-2,75	2,725	11,91	0,17	1,81	44,0	56,0	5,24	0,17	0,80	6,67	0,17	1,01
2,75-2,80	2,775	10,92	0,34	3,32	63,0	37,0	6,88	0,34	2,09	4,04	0,34	1,23
2,80-2,85	2,825	7,87	0,37	2,60	79,5	20,5	6,26	0,37	2,07	1,61	0,37	0,53
2,85-2,90	2,875	2,55	1,30	2,96	90,5	9,5	2,32	1,30	2,68	0,24	1,30	0,28
+2,90		10,18	9,60	87,31	100,00	0,00	10,18	9,60	7,31	0,00	9,60	0,00
Totaux		100,00		100,00			40,26		95,29	59,74		4,71
T(moyenne)			1,12					2,65			0,09	

Tableau 7 [3]

$$T(\text{moyenne}) = \frac{\sum_{i=1}^9 P_i \times T_i}{\sum_{i=1}^9 P_i}$$

La performance évaluée dans le tableau 7 colonnes 1, 2 et 3 montre les résultats des essais de liqueur dense, qui étaient illustrés dans le tableau 3.

Les colonnes 4 et 5 sont les distributions en plongeants et flottants de la matière pour chaque densité spécifique nominale. Les colonnes 6 et 9 montrent le poids de chaque fraction du minerai se reportant aux plongeants et aux flottants respectivement (colonne 6 = colonne 1 x colonne 4).

La teneur de chaque fraction est supposée être la même que le matériel plonge ou flotte.

La distribution totale du tout-venant en plongeants est la somme de toute la fraction dans la colonne 6, c'est à dire 40,26%, tandis que la récupération d'étain dans les plongeants est la somme des fractions dans la colonne 8 c'est à dire 95,29%. On peut donc dans une séparation idéale assimiler une distribution de 31,52% à une récupération de 96,16% d'étain.

CHAPITRE III

ETUDE DES PERAMETRES NUMERIQUES

III-1 ETUDE DES PARAMÈTRES PAR LA MÉTHODE NUMÉRIQUE :

La méthode d'évaluation de la performance d'un séparateur sur un tout-venant particulier telle que nous l'avons vue dans le chapitre II est pénible. Cependant elle est idéale pour l'approche informatisée.

Pour cela il suffit de créer un programme. Nous avons établi à titre d'exemple un programme en langage Basic en annexe. Le programme crée doit évaluer la performance d'un séparateur sur un tout-venant particulier en utilisant les résultats de tests du laboratoire lesquels se définissent en :

- Densité de séparation des flottants pour chaque fraction ;
- Teneur des flottants pour chaque fraction ;
- Poids des flottants pour chaque fraction ;
- Poids des plongeants à la dernière fraction ;
- Teneur des plongeants à la dernière fraction.

Avec la saisie de ces données, le programme nous affiche sous forme de tableau ces résultats avec d'autres paramètres qu'il va calculer. Ces autres résultats sont :

- Le poids des flottants en pourcentage (P_{pc}), lequel est le poids de chaque fraction des flottants $PF(i)$ sur le poids totale TP ;
- La distribution des flottants en pourcentage ($Dist_{pc}$), lequel est le poids des minerais des flottant pour chaque fraction (teneur \times poids = $T(i) \times P(i)$) sur le poids total des minerais TM ;

- Le poids cumulé en pourcentage CP ;
- La densité cumulé en pourcentage.

Après l'affichage du tableau, nous devons déterminer les résultats de prévision, suivant deux possibilités :

a) Première possibilité : Nous devons au préalable, connaître les données de partage du bac c'est à dire la fraction du poids des plongeants (C) pour chaque densité $ND(i) = \frac{D(i) + D(i-1)}{2}$, ainsi, ces données seront saisies et le programme va calculer :

- Le poids des plongeants

$$PP = \sum_{i=2}^N P(i) \times C$$

- Le poids du minerai plongeant

$$MP = \sum_{i=2}^N M(i) \times C$$

- Le poids des flottants

$$PF = TP - PP$$

- Le poids du minerai flottant

$$MF = TM - MP$$

- Le poids des flottants en pourcentage

$$P_{pcF} = \frac{PF \times 100}{TP}$$

- Le poids du minerai flottant en pourcentage

$$M_{pcF} = \frac{MF \times 100}{TM}$$

- La teneur des flottants

$$FF = \frac{MF}{PF}$$

- Le poids des plongeants en pourcentage

$$P_{pcP} = 100 - P_{pcF}$$

- Le poids du minerai plongeant

$$M_{pcP} = 100 - M_{pcF}$$

- La teneur des plongeants

$$FP = \frac{MP}{PP}$$

Ensuite vont s'afficher des données sous forme de tableau : lequel déterminera le poids en pourcentage, la teneur et la distribution tant des plongeants que des flottants.

b) Deuxième possibilité : Nous devons partir d'une densité de séparation (D_{50}) et d'un écart probable (E_p) tout en supposant que l'équation pour la courbe de partage est connue.

La courbe de partage ayant une forme 'S', Loveday supposait que la quantité de matériau égaré diminuait exponentiellement avec l'augmentation de la différence entre la densité spécifique et la densité de séparation.

La symétrie de la courbe de partage est telle que si la densité spécifique (x) du composant est plus petite que la densité de séparation (x').

Nous obtenons l'équation suivante :

$$Y(x) = 100 - 50 \cdot e^{-\frac{x - x'}{Z}}$$

Sachant que $Y(x)$ est la récupération des composant en fraction de flottants (%) et Z une constante.

Quand $x > x'$:

$$Y(x) = 50 \cdot e^{\frac{x - x'}{Z}}$$

et quand $x = x'$:

$$Y(x) = 50$$

Quand $Y(x) = 75\%$, $x' - x = E_p$, et :

$$Z = \frac{-E_p}{\text{Ln}(0,5)}$$

Le programme développé emploie les données de séparation pour calculer les points de la courbe de partage. Il est utilisé pour déterminer diverses performances.

En saisissant ces données le programme va procéder aux 10 étapes suivantes :

- Calcul de la constante Z

$$Z = \frac{-E_p}{2,303 \times \log(0,5)}$$

- Il fera une comparaison pour chaque densité $ND(i)$ avec la densité de séparation D50, Cette comparaison se fera N fois comme suit :

Si $ND(i) = D50$ alors $C = 0,5$;

Si $ND(i) < D50$ alors $C = 0,5 \times e^{\frac{D50 - ND(i)}{Z}}$;

Si $ND(i) > D50$ alors $C = 1 - (0,5 \times e^{\frac{D50 - ND(i)}{Z}})$.

Après avoir fait la comparaison il calcule pour chaque densité ND(i)

- ◆ Le poids des plongeants

$$PP = \sum_{i=2}^N P(i) \times C$$

- ◆ Le poids du minerais plongeant

$$MP = \sum_{i=2}^N M(i) \times C$$

- Calcul du poids des flottants

$$PF = TP - PP$$

- Calcul du poids du minerai flottant

$$MF = TM - MP$$

- Calcul du poids des flottants en pourcentage

$$P_{pcF} = \frac{PF \times 100}{TP}$$

- Calcul du poids du minerai flottant en pourcentage

$$M_{pcF} = \frac{MF \times 100}{TM}$$

- Calcul de la teneur des flottants

$$FF = \frac{MF}{PF}$$

- Calcul du poids des plongeants en pourcentage

$$P_{pcP} = 100 - P_{pcF}$$

- Calcul du poids du minerai plongeant

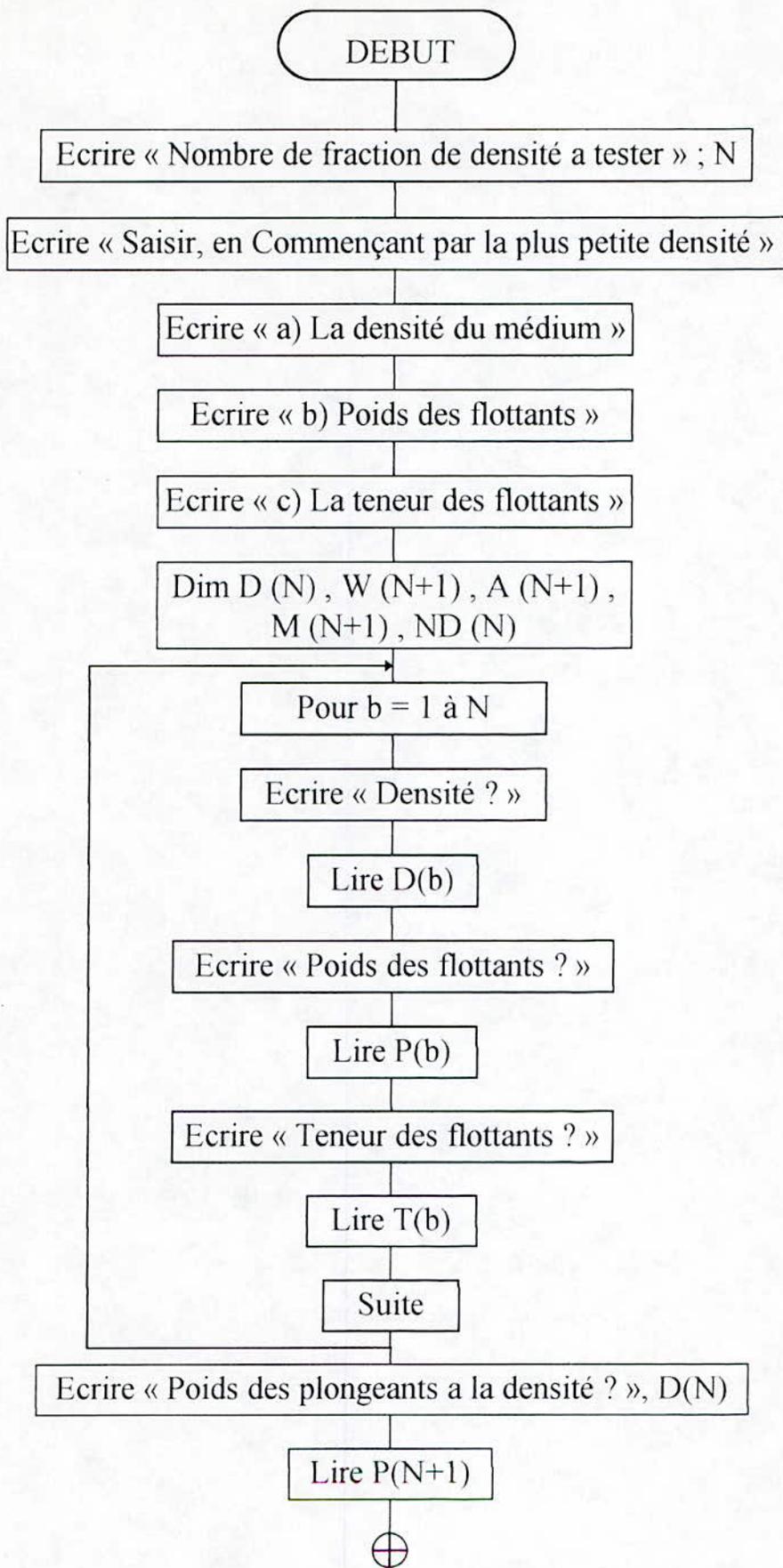
$$M_{pcP} = 100 - M_{pcF}$$

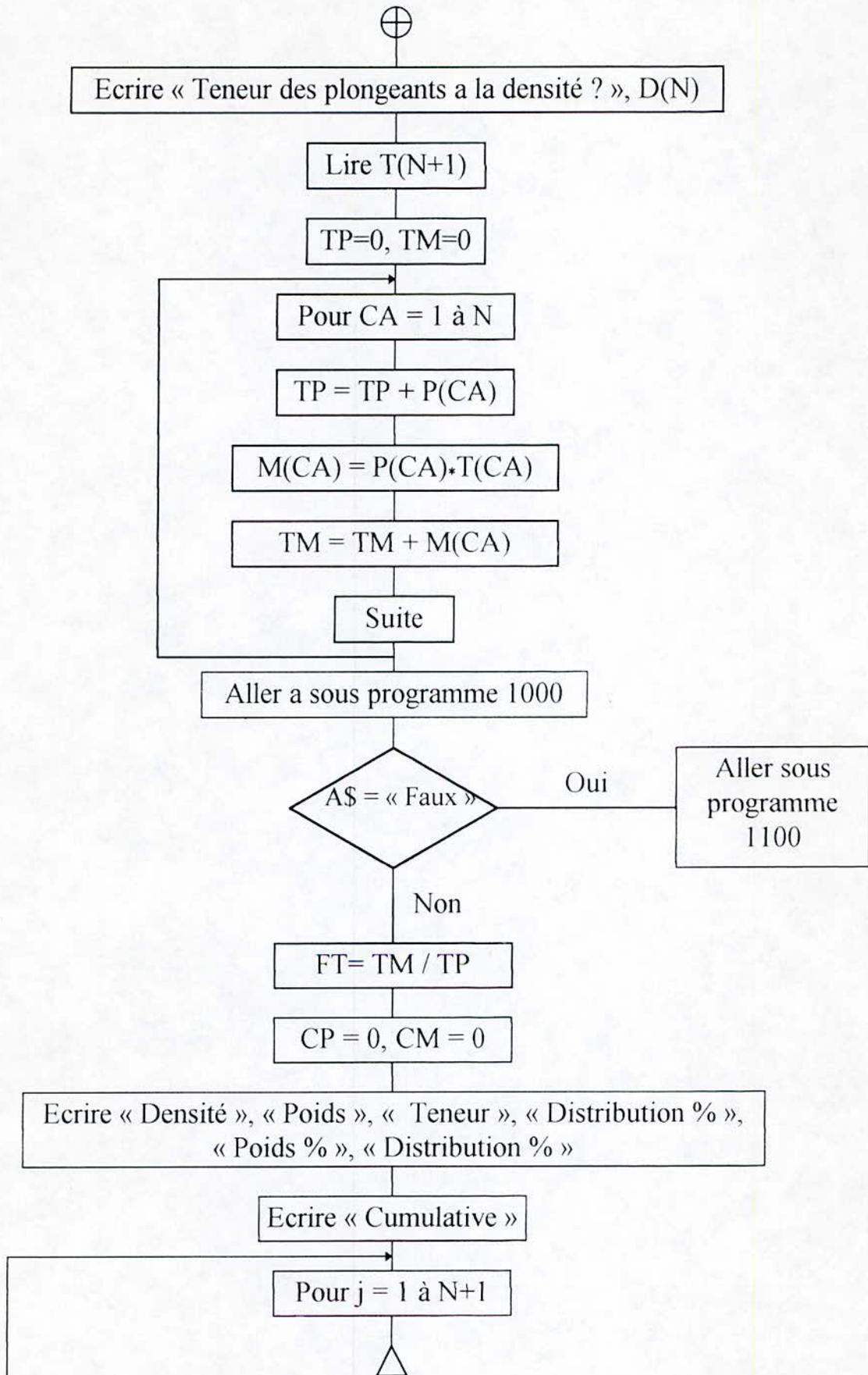
- Calcul de la teneur des plongeants

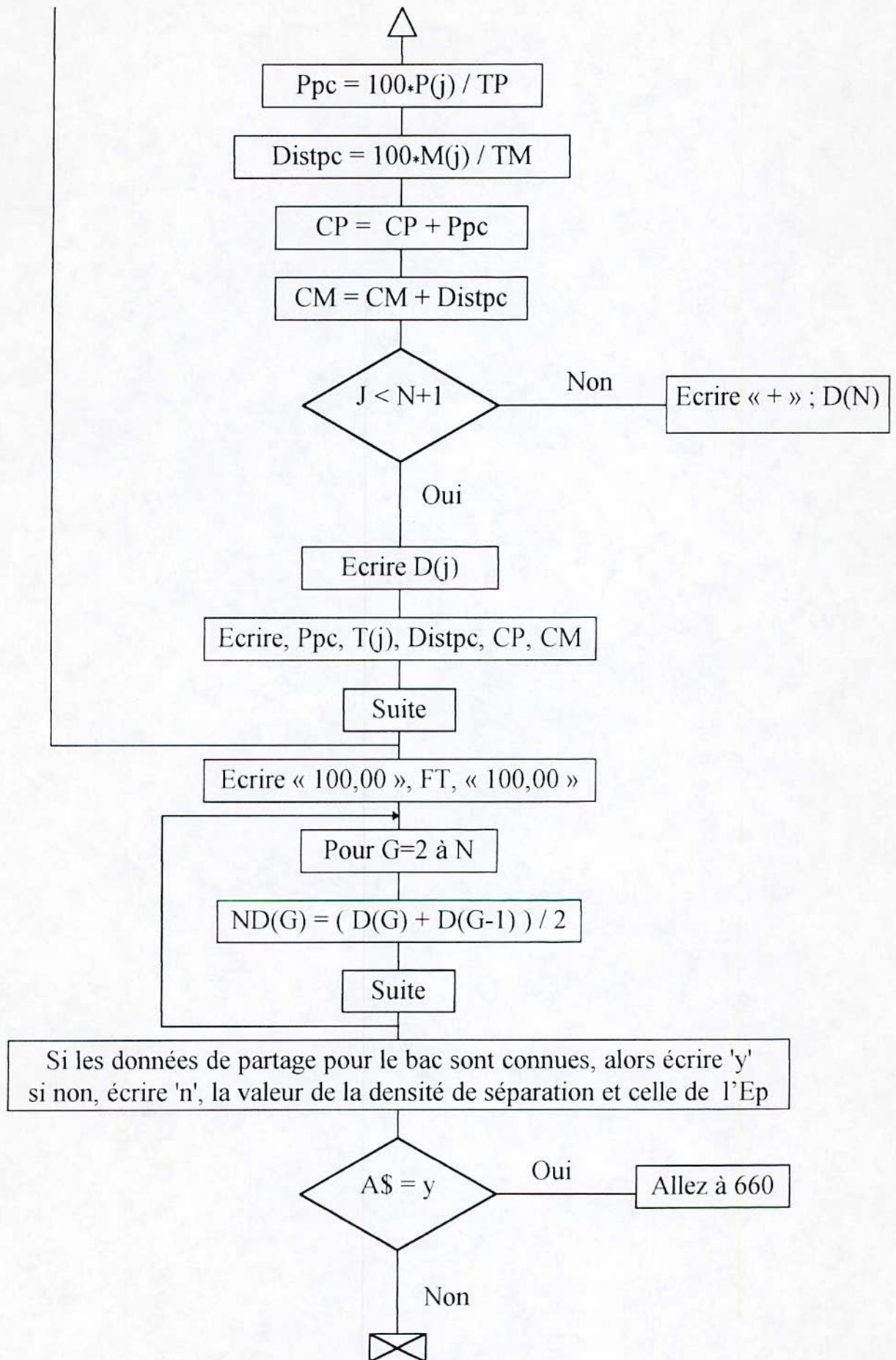
$$FP = \frac{MP}{PP}$$

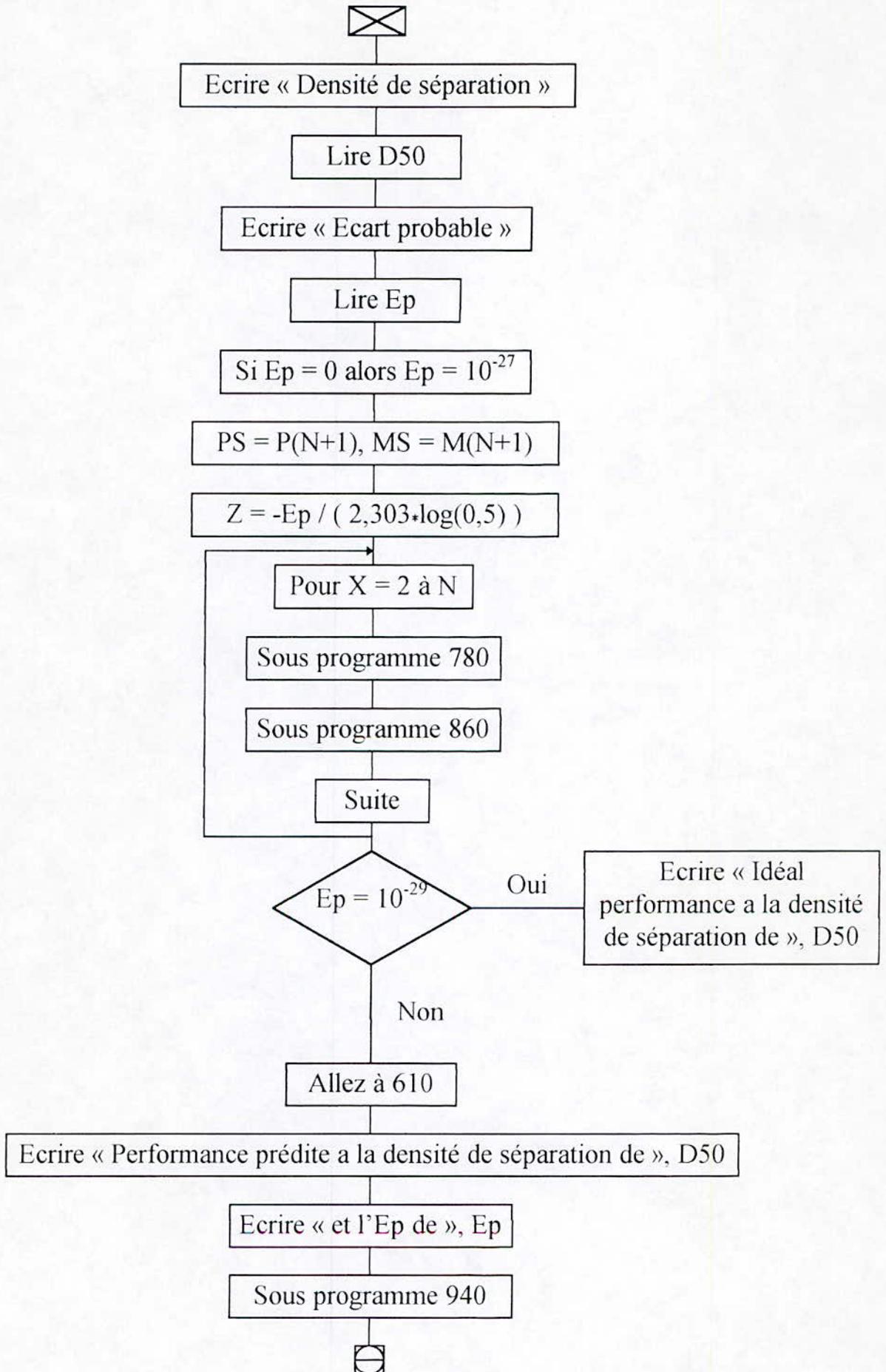
Toutes ces étapes étant effectuées, le programme va nous afficher les données sous forme de tableau, où apparaîtront le poids en pourcentage, la teneur et la distribution tant des plongeants que des flottants.

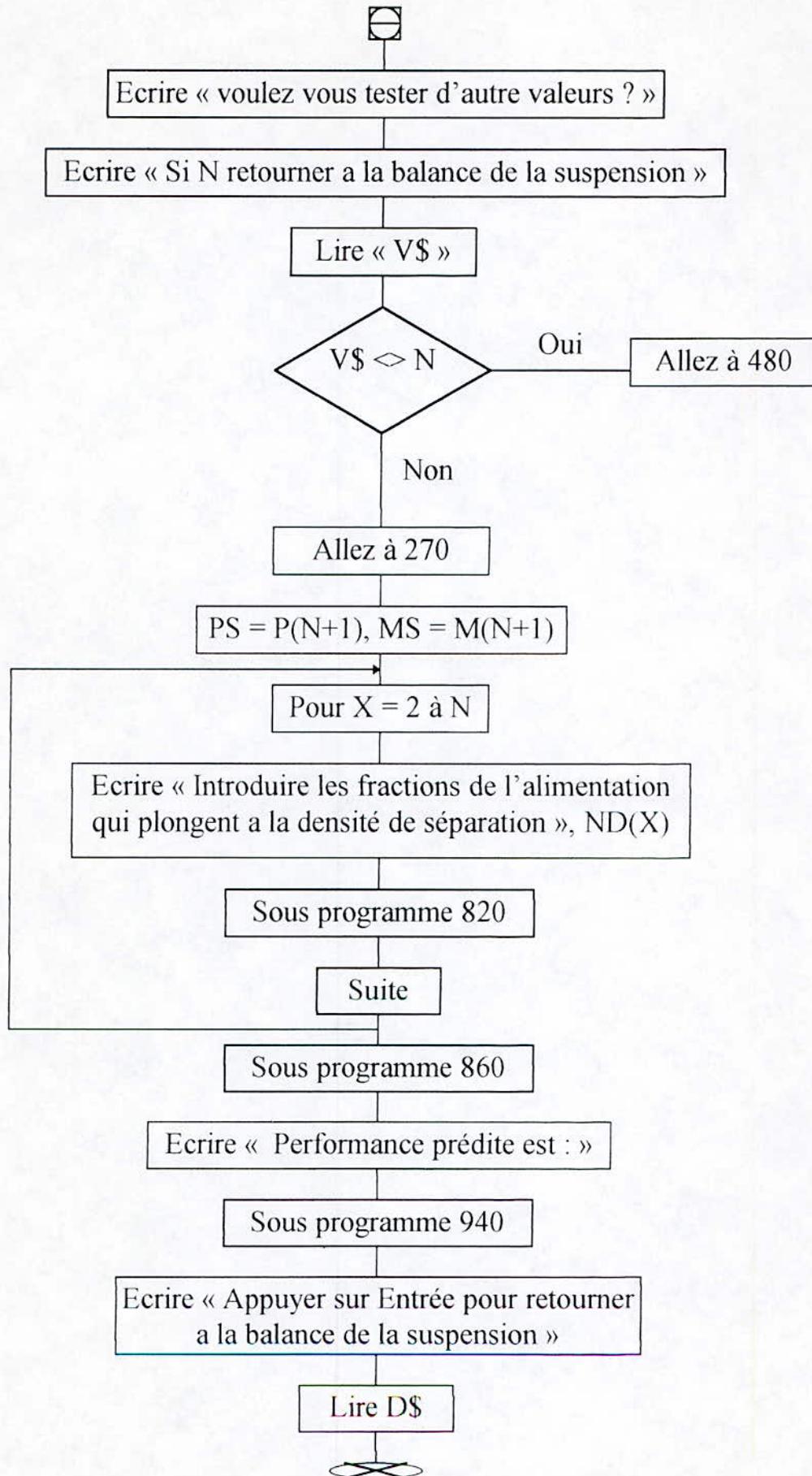
L'organigramme ci-dessous nous permet de comprendre comment procéder pour effectués tous les calculs présentés ci-dessus.

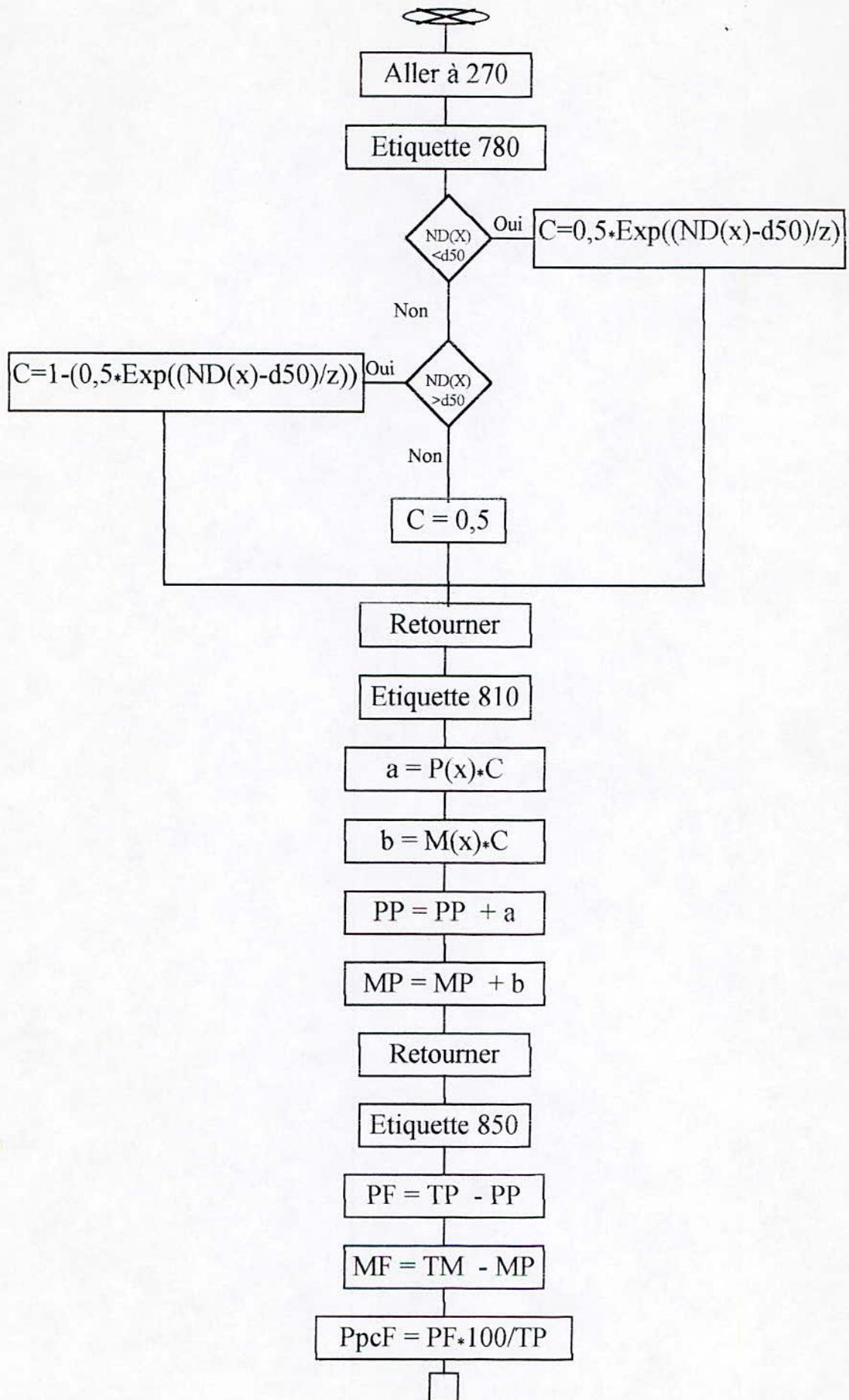


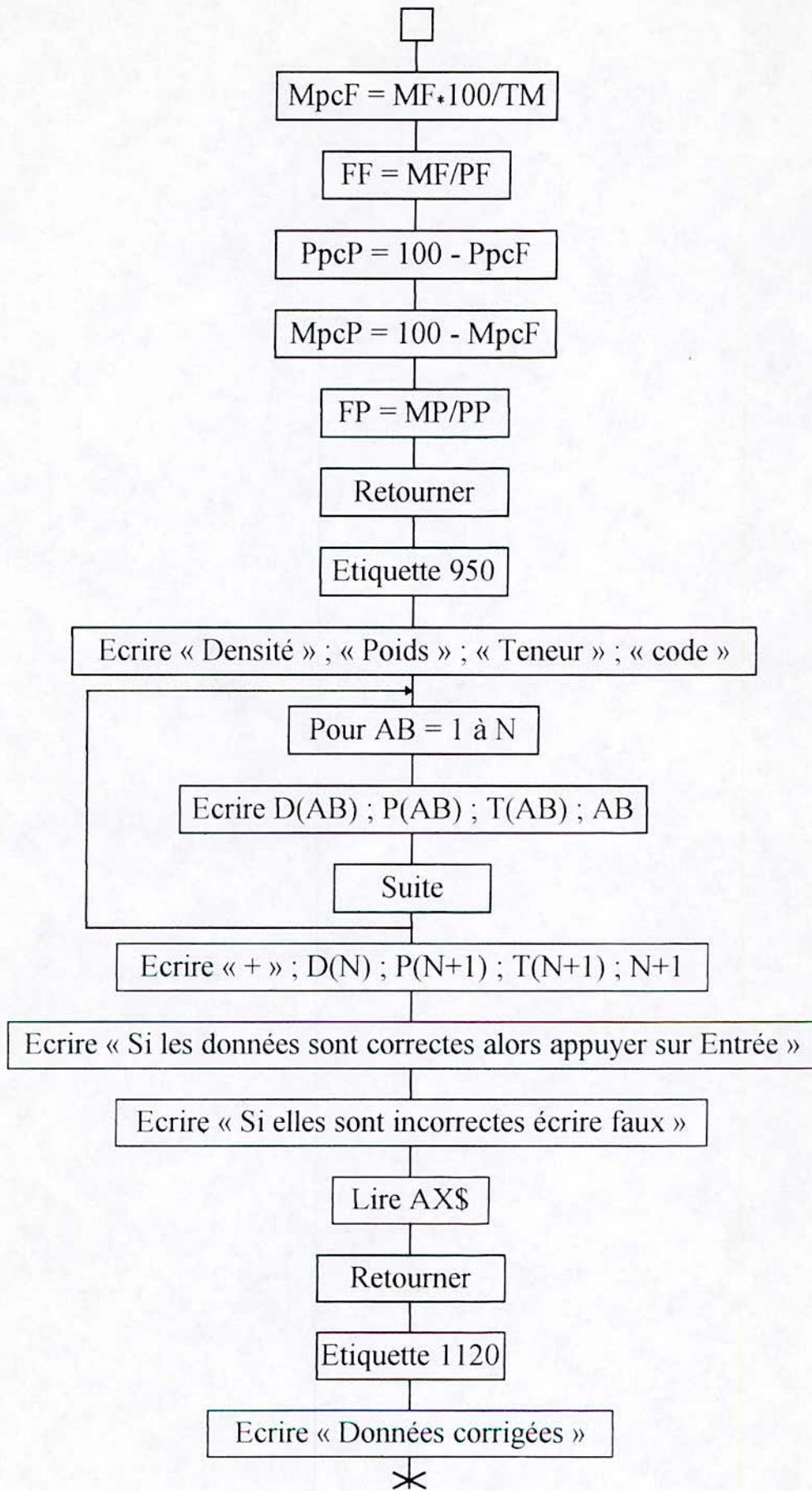


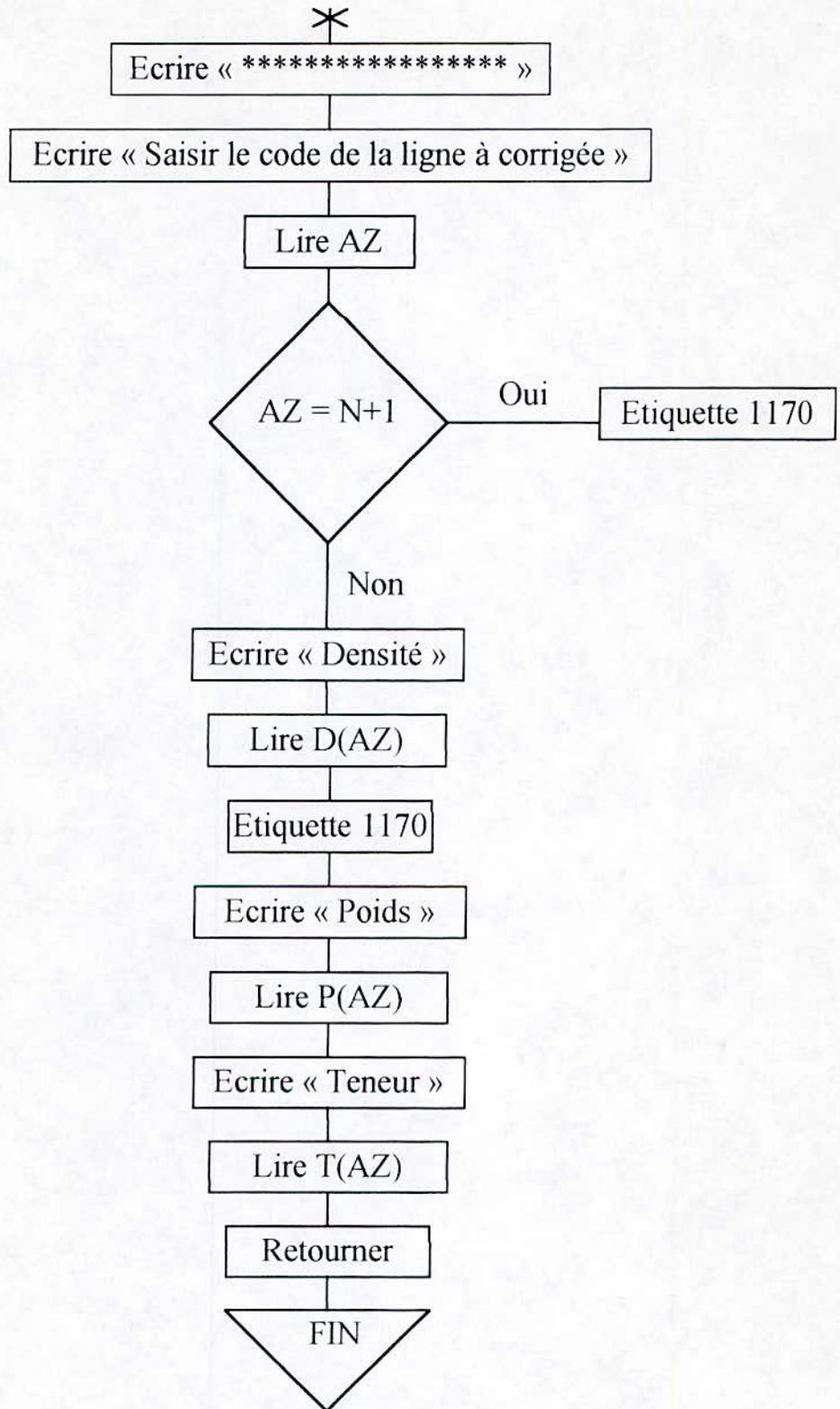












III-2 ARCHITECTURE DU PROGRAMME :

A L'exécution du programme, la feuille principale (Figure 17) s'affiche déterminant deux étapes :

- La première consiste en la saisie des données des tests de laboratoire. Cette saisie se fera comme suit :

Il faut saisir le nombre de densités à tester, en l'écrivant dans la zone de texte qui est à coté du message

Ensuite il faut saisir dans les zones de texte qui figurent à coté de chaque message, la densité des flottants, le poids des flottants et la teneur des flottants en commençant par la plus petite densité. La saisie se fera pour ces trois paramètres simultanément en cliquant à chaque fois sur la case **Saisie**.

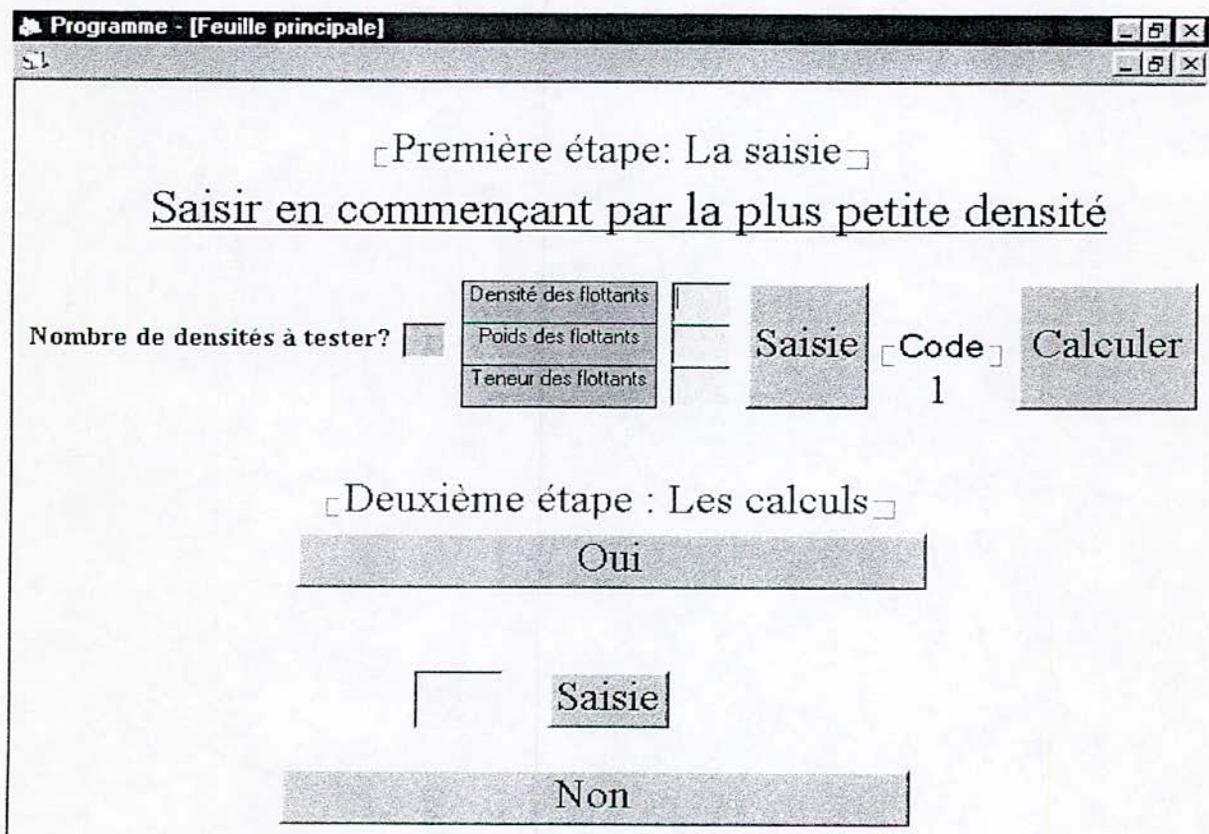


Figure 17

A chaque fois que nous cliquons sur la case **Saisie** le code augmente d'une fois et à la dernière saisie c'est à dire quand le code atteint le nombre de densités à tester, une boite de dialogue (Figure 18) apparaît et nous demande de saisir le poids des plongeurs à la dernière densité. Pour cela il suffit d'écrire ce poids dans la zone de texte de cette boite de dialogue et de cliquer sur la case **OK** de cette même boite de dialogue.

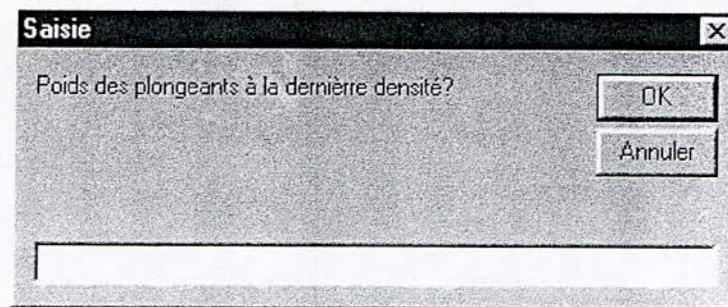


Figure 18

En cliquant sur la case **OK**, une autre boite de dialogue (Figure 19) apparaît. Cette boite de dialogue nous demande de saisir la teneur des plongeurs à la dernière densité.

Pour cela nous notons la teneur des plongeurs dans la zone de texte de cette boite de dialogue et nous cliquons sur la case **OK**.

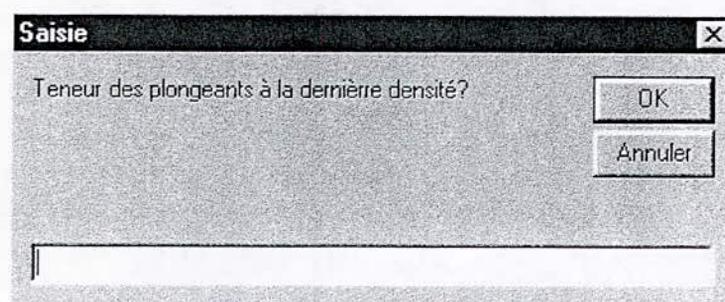


Figure 19

La saisie étant terminée, nous passons au calculs. Il faut donc cliquer sur la case **Calculer** pour obtenir la feuille des résultats des testes de laboratoire (Figure 20) sur laquelle s'affichera un tableau qui illustre ces mêmes résultats.

Densité	Poids%	Teneur	Distribution%	Poids% Cumulative	Dsitribution%
2,55	01,57	0	00,00	01,57	00,00
2,6	09,22	0,04	00,33	10,79	00,33
2,65	26,11	0,04	00,93	36,90	01,27
2,7	19,67	0,04	00,70	56,57	01,97
2,75	11,91	0,17	01,81	68,48	03,78
2,8	10,92	0,34	03,32	79,40	07,10
2,85	07,87	0,37	02,60	87,27	09,70
2,9	02,55	1,3	02,96	89,82	12,66
+ 2,9	10,18	9,6	87,34	100,00	100,00

OK

Figure 20

Après avoir vérifié que les données affichées sont correctes nous cliquons sur la case **OK** ce qui nous ramènera à la feuille principale (Figure 17) mais avec une boîte de dialogue (Figure 21) qui s'affichera et demandera de cliquer sur la case **OUI** si nous connaissons les données de partage pour le bac, ou sur la case **NON** si c'est données ne sont pas connues.

En appuyant sur la case **OK** la boîte de message (Figure 21) disparaît et on passera à la deuxième partie qui permet de déterminer les résultats des prévision.



Figure 21

Deux cas de figure se présentent :

a) si nous clickons sur la case **OUI** un message s'affichera sur la feuille principale (Figure 22).

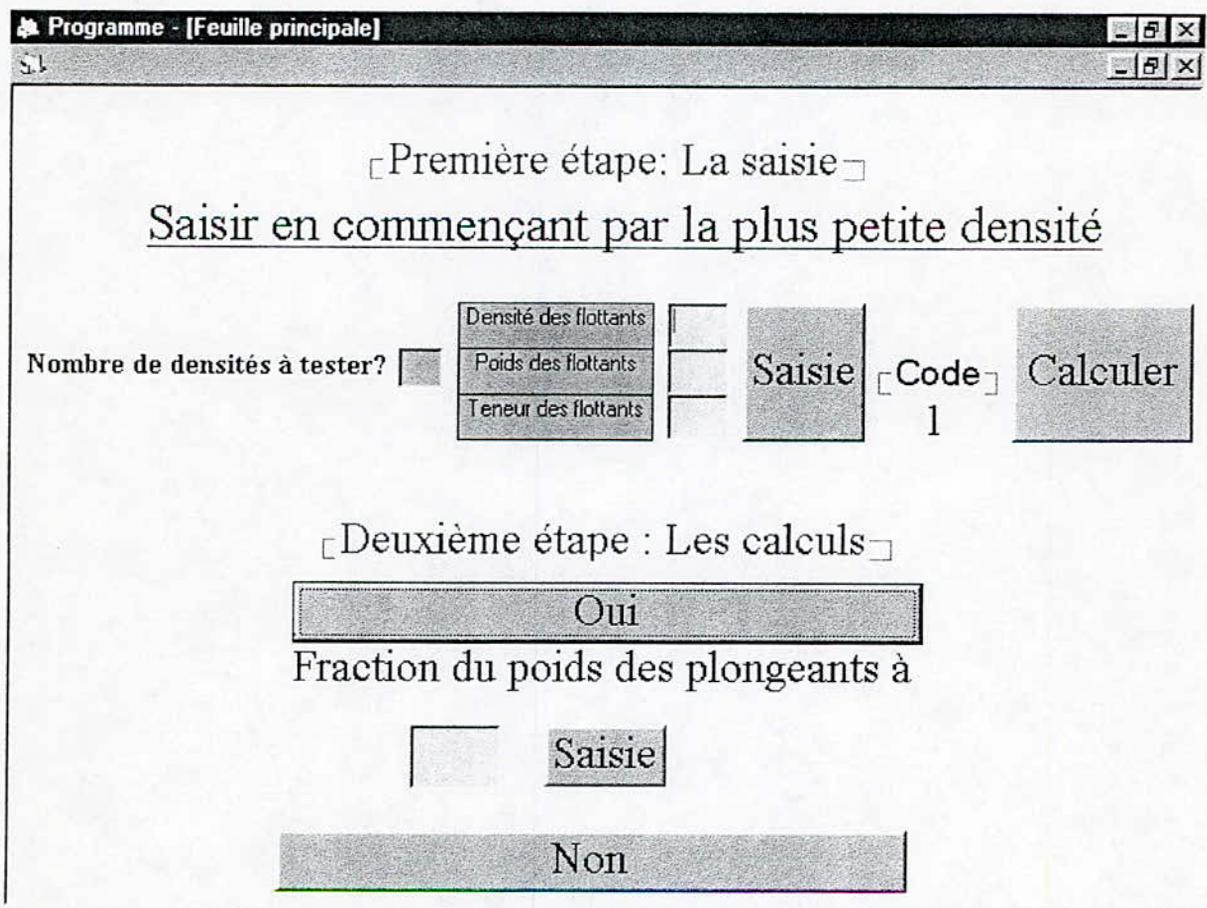


Figure 22

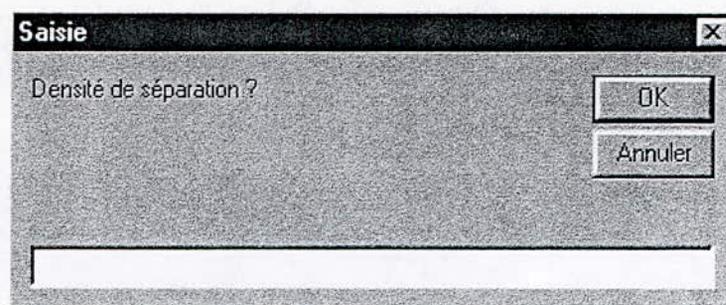
Ce message nous demande de saisir la fraction du poids plongeants pour chaque densité $ND(i) = \frac{D(i) + D(i-1)}{2}$.

Pour cela il faut noter le poids de chaque fraction dans la zone de saisie et cliquer sur la case **Saisie** qui se trouve juste au dessus du message. Après la dernière saisie la feuille des résultats de prévision (Figure 23) apparaît avec ces même résultats.

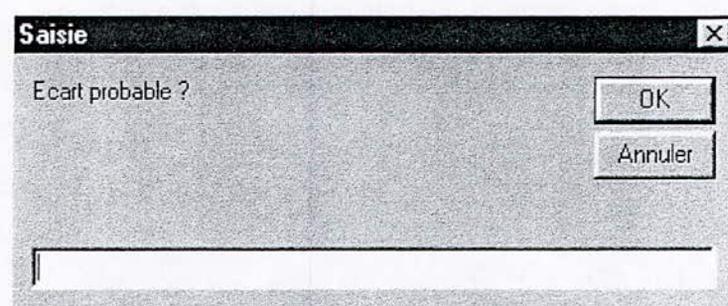


Figure 23

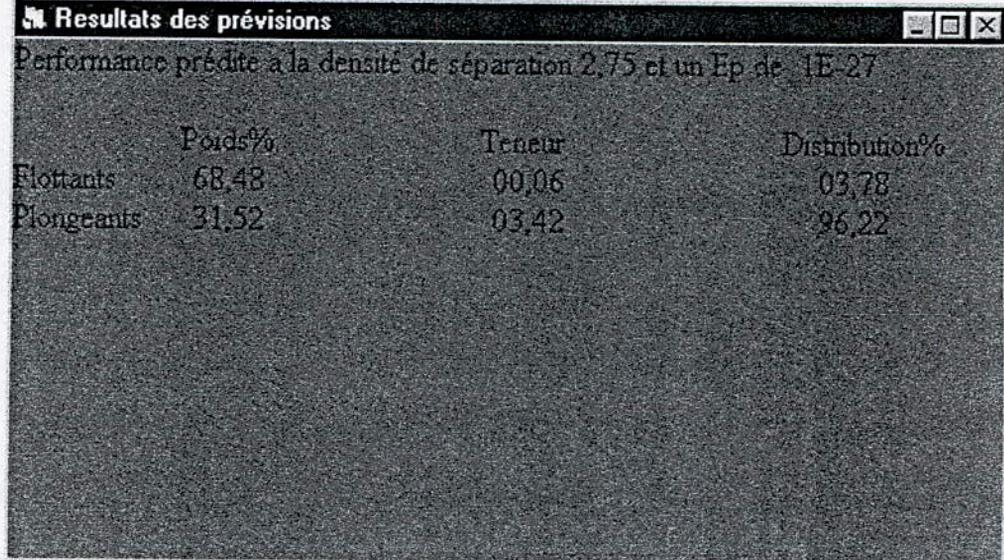
b) Si nous clickons sur la case **NON**, une boîte de dialogue (Figure 24) apparaît. Elle nous demande de saisir la densité de séparation. Pour cela il faut noter la densité de séparation dans la zone de texte puis cliquer sur la case **OK**.

**Figure 24**

Après avoir cliqué sur la case **OK** de la boîte de dialogue de la figure 24 une autre boîte de dialogue (Figure 25) apparaît, nous de demandant de saisir l'écart probable. Pour cela il suffit d'écrire l'écart probable dans la zone de texte et de cliquer sur la case **OK**.

**Figure 25**

On cliquant sur la case **OK** une autre feuille des résultats de prévision (Figure 26) apparaît affichant ces même résultats.



Resultats des prévisions

Performance prédite a la densité de séparation 2.75 et un Ep de 1E-27

	Poids%	Teneur	Distribution%
Flottants	68.48	00.06	03.78
Plongants	31.52	03.42	96.22

Figure 26

CONCLUSION

CONCLUSION :

L'appauvrissement et l'extinction des grands gisements dans le monde, le coût élevé des produits chimiques pour le traitement des minerais et la protection de l'environnement nous incite à nous tourner vers des méthodes de traitements peu coûteuses et plus efficaces.

La méthode de séparation par milieu dense est un bon exemple. L'étude des paramètres de cette méthode pour l'évaluation des performances de son séparateurs sur un tout-venant est pénible et longue.

C'est pour cette raison que l'outil informatique est nécessaire pour simplifier ces démarches et ainsi réduire le temps du traitement.

Pour une approche plus pratique du problème, le langage Visual Basic a été le plus approprié.

ANNEXE

ANNEXE

```
10 REM PROGRAMME SUR LA SEPARATION PAR MILIEU DENSE
20 PRINT : INPUT " Nombre de densité à tester "; N
30 PRINT : PRINT : PRINT "Saisir, en Commencent par la plus petite densité "
40 PRINT " a) La densité du médium "
50 PRINT " b) Poids des flottants "
60 PRINT " c) La teneur des flottants "
80 DIM D(N), P(N + 1), A(N + 1), M(N + 1), ND(N)
90 FOR b = 1 TO N
100 PRINT : PRINT : INPUT " Densité ? "; D(b)
110 PRINT : PRINT : INPUT " Poids des flottants ? "; P(b)
120 PRINT : PRINT : INPUT " Teneur des flottants ? "; A(b)
130 NEXT
140 PRINT : PRINT : PRINT " Poids des plongeurs a la densité ? "; D(N):
    INPUT P(N + 1)
150 PRINT : PRINT : PRINT " Teneur des plongeurs a la densité ? "; D(N):
    INPUT T(N + 1)
160 TP = 0: TM = 0
170 FOR CA = 1 TO N + 1
180 TP = TP + P(CA)
190 M(CA) = P(CA) * T(CA)
200 TM = TM + M(CA)
210 NEXT CA
220 GOSUB 1000
230 IF AX$ = "Faux" THEN GOSUB 1110: GOTO 160
240 IF AX$ = "" THEN 260
250 IF AX$ <> "" THEN 220
260 FT = TM / TP
270 CP = 0: CM = 0
280 PRINT : PRINT : PRINT TAB(2); " DENSITE "; TAB(13); " POIDS % ";
    TAB(26); " TENEUR "; TAB(38); " DISTN % "; TAB(53); " POIDS % ";
    TAB(69); " DISTN % "
290 PRINT TAB(60); " CUMULATIVE ": PRINT : PRINT
300 FOR J = 1 TO N + 1
310 Ptpc = 100 * P(J) / TP
320 Distpc = 100 * M(J) / TM
330 CP = Ptpc + CP
340 CM = Distpc + CM
360 IF J < (N + 1) THEN PRINT TAB(5); D(J), ; : GOTO 380
370 PRINT TAB(4); "+"; D(N), ;
380 PRINT TAB(15); Ptpc; TAB(28); T(J); TAB(40); Distpc; TAB(55); CP;
    TAB(67); CM
```

```

390 NEXT J
400 PRINT : PRINT : PRINT TAB(15); " 100.00 "; TAB(28); FT; TAB(55); "
    100.00 "
410 FOR G = 2 TO N
420 ND(G) = (D(G) + D(G - 1)) / 2
430 NEXT G
440 PRINT " Si les données de partage pour le bac sont connu, alors écrire 'O' si
    non, écrire 'N', la valeur de la densité de séparation et celle de l'Ep ";
450 INPUT A$
470 IF A$ = "O" THEN 660
480 PRINT : PRINT : INPUT " Densité de séparation "; d50
490 PRINT : PRINT : INPUT " Ecart probable "; Ep
500 IF Ep = 0 THEN Ep = 1D-27
510 PP = P(N + 1): MP = M(N + 1)
520 Z = -Ep / (2.303 * LOG(.5))
530 FOR X = 2 TO N
540 GOSUB 780
550 GOSUB 830
560 NEXT X
570 GOSUB 860: PRINT : PRINT : PRINT
580 IF Ep = 9.999999999999999D-30 THEN PRINT " Idéal performance a la
densité de séparation de "; d50: GOTO 610
590 PRINT " Performance prédite a la densité de séparation de "; d50
600 PRINT " et un Ep de "; Ep
610 GOSUB 940
620 PRINT : PRINT : PRINT " voulez vous tester d'autre valeurs ? O/N "
630 INPUT " Si N retourner a la balance de la suspension "; V$
640 IF V$ <> "N" THEN 480
650 GOTO 270
660 PP = P(N + 1): MP = M(N + 1)
670 FOR X = 2 TO N
680 PRINT : PRINT : PRINT " Introduire les fractions de l'alimentation qui
    plongent a la densité de séparation "; ND(X);
685 INPUT c
690 GOSUB 820
700 NEXT X
710 GOSUB 860
720 PRINT : PRINT : PRINT " Performance prédite est : "
730 GOSUB 940
740 INPUT "Appuyer sur Entrée pour retourner a la balance de
    la suspension"; D$
750 GOTO 270
760 END

```

```

780 IF ND(X) = d50 THEN c = .5
790 IF ND(X) < d50 THEN c = .5 * EXP((ND(X) - d50) / Z)
800 IF ND(X) > d50 THEN c = 1 - (.5 * EXP((d50 - ND(X)) / Z))
810 RETURN
830 a = P(X) * c : b = M(X) * c
840 PP = PP + a : MP = MP + b
850 RETURN
860 PF = TP - PP : MF = TM - MP
870 PpcF = PF * 100 / TP
880 MpcF = MF * 100 / TM
890 FF = MF / PF
900 PpcP = 100 - PpcF
910 MpcP = 100 - MpcF
920 FP = MP / PP
930 RETURN
950 PRINT TAB(20); " Poids% "; TAB(30); " Teneur "; TAB(40); " Dist "
960 PRINT : PRINT : PRINT " Flottants ", PpcF, FF, MpcF
970 PRINT : PRINT : PRINT " Plongeurs ", PpcP, FP, MpcP
990 RETURN
1000 PRINT : PRINT : PRINT "          Données "
1020 PRINT "          ***** "
1030 PRINT : PRINT : PRINT " Densité ", " Poids ", " Teneur ", " Code "
1040 FOR AB = 1 TO N
1050 PRINT ; TAB(4); D(AB); TAB(17); P(AB); TAB(31); T(AB);
      TAB(45); AB
1060 NEXT AB
1070 PRINT " +"; D(N); TAB(17); P(N + 1); TAB(31); T(N + 1);
      TAB(45); N + 1
1080 PRINT : PRINT : PRINT " Si les données sont correcte alors
      appuyer sur Entrée "
1090 INPUT " si elles sont incorrecte écrire faux "; AX$
1100 RETURN
1110 REM CORRECTION DES DONNEES
1120 PRINT : PRINT : PRINT "          Données corrigées "
1130 PRINT "          ***** "
1140 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT " Saisir le code de la ligne
      à corrigée "; AZ
1150 IF AZ = N + 1 THEN 1170
1160 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT " Densité "; D(AZ)
1170 PRINT : PRINT : INPUT " Poids "; P(AZ)
1180 PRINT : PRINT : INPUT " Teneur "; T(AZ)
1190 RETURN

```

REFERENCE

- [1] MISE EN VALEUR DES GISEMENTS METALLIFERES
J.Sandier
- [2] GRAVITY CONCENTRATION TECHNOLOGY
Richard O.Burt
- [3] LA VALORISATION DES MINERAIS
Pierre Blazy
- [4] MINERAL PROCESSING TECHNOLOGY
Wel
- [5] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR
(Article 190 et 191)

BIBLIOGRAPHIE

LIVRE D'OR Visual Basic 4.0

Gérard Frantz

HYDROCYCLONES

L.Svarovsky

MISE EN VALEUR DES GISEMENTS METALLIFERES

J.Sandier

GRAVITY CONCENTRATION TECHNOLOGY

Richard O.Burt

LA VALORISATION DES MINERAIS

Pierre Blazy

MINING & MINERAIS ENGINEERING

(revue)

MINERAL PROCESSING TECHNOLOGY

Wel

TECHNIQUE DE L'INGENIEUR

(Article 190 et 191)