

## Chapitre II : Les opérations unitaires

### II-1 - Séparation solide/fluide après lixiviation

Cette étape permet de séparer le résidu inerte de la solution de lixiviation. Il est intéressant que la séparation soit la plus réalisable afin que :

- la solution de lixiviation comporte, après séparation, le minimum de résidu, ce dernier représentant une impureté pour la suite du procédé ;
- le résidu comporte le minimum de solution de lixiviation. Cela signifierait, dans le cas opposé, une perte de métal et une pollution du résidu.

#### II-1-1-Flottation

La flottation (figure II-1-1) [15] est un procédé de séparation le plus utilisé dans l'industrie. Le principe consiste à introduire des bulles au sein d'une phase continue, dont on veut extraire une phase dispersée, qui peut être solide ou liquide. Ces bulles captent, pendant leur ascension au sein du liquide, les particules en suspension et les drainent vers la surface du bain où elles s'accumulent pour former une couche à la surface, qui est éliminée par raclage.

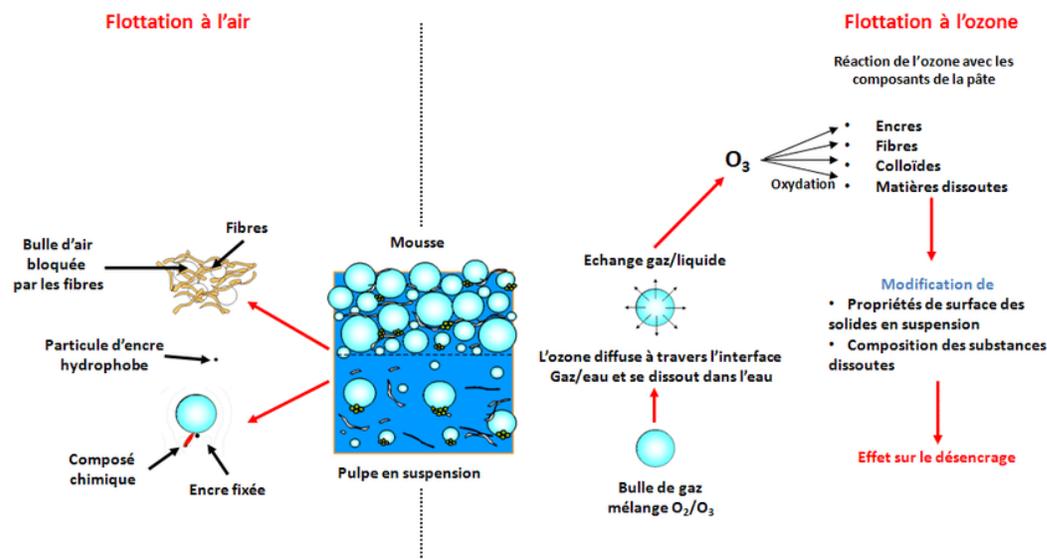


Figure II-1 -1-Schéma conceptuel du processus de flottation à l'air et à l'ozone [15]

Quelle que soit la configuration envisagée, le principe fondamental est la différence de tension superficielle à l'interface particule / phase continue et particule / collecteur. De façon synthétique, si la tension superficielle particule / collecteur est plus faible que la tension superficielle particule / phase continue, alors les particules sont susceptibles

d'adhérer au collecteur, et ainsi d'être éliminées. Ce processus physique a pendant très longtemps été utilisé empiriquement de diverses façons. On l'utilise par exemple pour la récupération de bitume à partir de sables huileux, le dé-encreage de la pâte à papier, le traitement d'effluents toxiques dans les industries chimiques et minières, l'extraction de solides dispersés dans le traitement des eaux domestiques ou industrielles, etc.

### **II-1-2- Décantation**

La décantation (figure II-1-2) est la technique la plus utilisée ; elle permet une opération en continu des installations. Elle consiste en un transfert dans un milieu fluide de particules solides sous l'action du pesanteur. Elle utilise des décanteurs de grande capacité ainsi que l'addition au préférable de flocculants ou de coagulants. Les particules sont retirées au fond des décanteurs sous forme de boues qui sont alors filtrées.



**Figure II-1-2- Bassin de décantation (Wikipédia)**

### **II-1-3- Filtration**

La filtration (figure II-1-3) est réalisée en continu sur des filtres à bande ou en discontinu sur des filtres-presses. Cette procédure est la plus adaptée pour éliminer la plus grande quantité de la solution de lixiviation présente dans les résidus. La masse de matières sèches par rapport masse totale des gâteaux produit est parfois élevée (20 à 70 %) ; les gâteaux peuvent être lavés sur les filtres afin d'obtenir la solution de lixiviation incluse dans le liquide interstitiel des gâteaux.

### **II-1-4- Centrifugation**

C'est un processus de séparation (figure II-1-4), par action de la force centrifuge. Elle consiste à appliquer aux particules en suspension un champ de forces centrifuges plus grand que le champ de la pesanteur par un mouvement de rotation.

L'opération est sensible aux variations de température, type de particules... Une addition de floculant avant centrifugation est habituellement nécessaire. Du fait du coût de maintenance élevé et des contraintes imposé par l'appareillage, cette technique n'est utilisée que si la décantation ou la filtration sont impossibles



Figure II-1-3 -Le filtre à vide de disque pour la métallurgie (CITICHL )

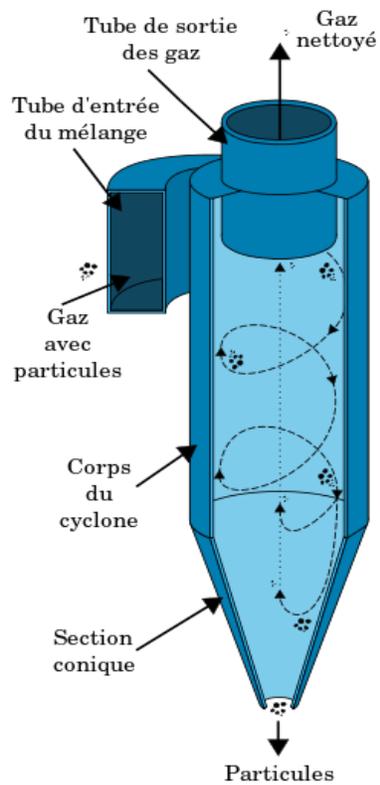


Figure II-1-4-Schéma simplifié d'un cyclone (wikipédia)

## **II-2-Les opérations de séparation d'une phase fluide**

### **II-2-1- Condensation**

La condensation est un processus métallurgique pour séparer les métaux d'un minerai ou d'un alliage .Elle est basé sur le changement de l' état physique de la matière de la phase gazeuse à la phase liquide

### **II-2-2- Sublimation**

Dans la métallurgie extractive la sublimation est un processus de séparation basé sur le passage d'un composé directement de l'état solide à l'état gazeux<sup>1,2</sup>, sans passer par l'état liquide. Par conséquent, cette transformation se fait sans passer par une étape de fusion .La sublimation est un processus endothermique de séparation qui se produit à des températures et à des pressions inférieures à ceux de point triple d'une substance dans son diagramme de phases , ce qui correspond à la pression la plus basse à laquelle la substance peut exister sous forme liquide

### **II-2-3- La liquation :**

La liquation est un processus métallurgique pour séparer les métaux d'un minerai ou d'un alliage . Le matériau doit être chauffé jusqu'à ce que l'un des métaux commence à fondre et s'écoule de l'autre et puisse être collecté. Cette méthode a été largement utilisé pour éliminer l' antimoine minéraux du minerai et d' affiner l' étain .

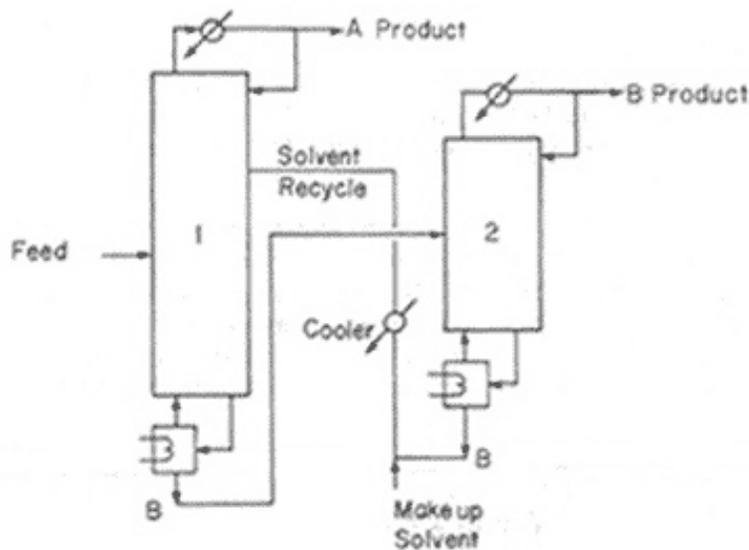
### **II-2-4 distillation**

La distillation, comme processus de séparation, est basé sur la différence de volatilité des composants du mélange à purifier. Dans un mélange binaire non azéotropique, le constituant le plus volatil aura la température d'ébullition la plus basse et le constituant le moins volatil aura la température d'ébullition la plus haute. La séparation des mélanges ne cause pas de problème si la différence de volatilité des constituants ou la volatilité relative est assez élevée.

### **II-2-5-Distillation extractive**

La distillation extractive (Figure II-2-1) est réservée au procédé où le tiers corps additionné dans le système binaire pour accroître la volatilité proportionnelle des composants

préférentiellement ne forme ni azéotrope ni deux phases liquides avec les composants du mélange initial. Si le tiers corps, qui ne forme pas de nouvel azéotrope ni ne provoque d'immiscibilité partielle avec les composants du mélange binaire initial, est alimenté continuellement au mélange durant la séparation la méthode est qualifiée de distillation extractive homogène. Si l'addition du tiers corps provoque une immiscibilité partielle avec l'un des composants du mélange binaire initial, le mode opératoire est qualifié de distillation extractive hétérogène. Dans ce cas, le tiers corps peut aussi provoquer l'apparition d'un azéotrope hétérogène avec le composant binaire impliqué dans l'immiscibilité partielle. Dans tous les procédés de distillation extractive, le distillat produit en tête a une composition voisine d'un composant pur ou d'un mélange azéotrope de température d'ébullition intermédiaire dans la région de distillation concernée. C'est une différence notable avec les procédés de distillation non extractive. En rectification non extractive, le distillat a une composition proche d'un constituant pur ou d'un mélange azéotrope de température d'ébullition minimale dans la région de distillation concernée.



**Figure II-2-1- organigramme typique de distillation extractive**

## **II-3-Les opération unitaire chimique et les réacteurs en pyrométallurgie.**

### **II-3-1- Les réacteur « gaz-solide »**

Pour un empilement de particules donné, l'état de la suspension change en fonction du débit ou de la vitesse du gaz passant les particules solides. Les trois grands types de lit de particules sont les lits fixes, fluidisés et transportés. Autres dispositifs à particules Il existe d'autres modes de contact solide-gaz parmi lesquels :

- Le lit mobile : il est généralement constitué d'un empilement de particules mais dans ce cas le lit est animé d'un mouvement de translation de haut en bas sous l'effet des forces de gravité. Le lit peut habituellement être entraîné horizontalement. Le lit peut être à co-courant, à contrecourant ou à courant croisé.

- Le lit vibré : il s'agit également d'un lit à empilement de particules mais il est soumis à une excitation extérieure dans l'objectif d'améliorer la fluidisation lorsque celle-ci est rendue difficile par l'utilisation de particules soit trop grosses soit trop fines.

- Le lit rotatif : un lit de particules est déposé à l'intérieur d'un cylindre incliné de quelques degrés par rapport à l'horizontale et tournant sur lui-même. Un courant gazeux parcourt le cylindre tout en étant en contact avec le lit de particules.

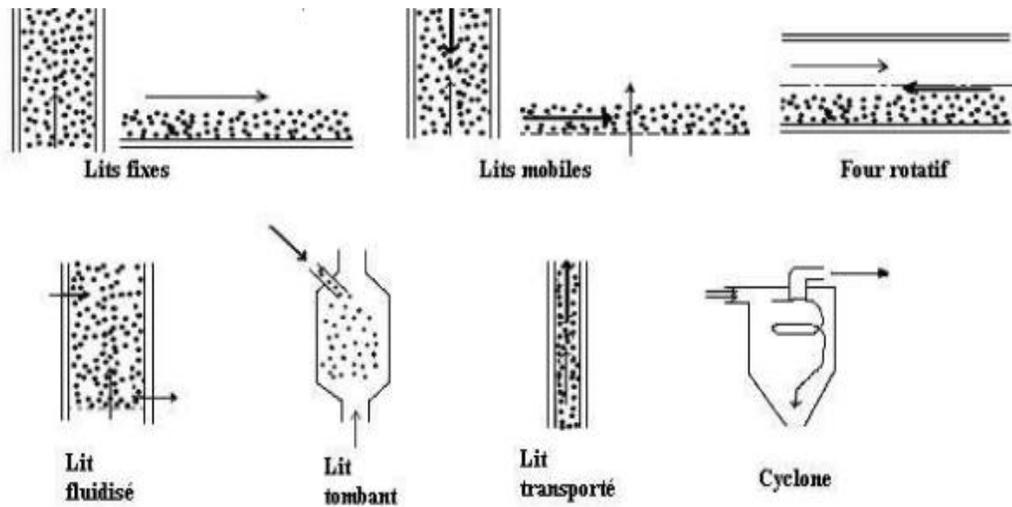
- Le cyclone : cet appareil permet normalement de séparer les fines particules solides contenues dans une phase gazeuse. Il peut cependant être utilisé en tant que réacteur pour des réactions nécessitant de fortes températures. Villermaux a classé les différents dispositifs qui représentent les modes de contacts gaz-solide :

- Les lits à empilements de solide : fixe, mobile, brassé, vibré.

- Les lits fluidisés et suspendus : lit fluidisé, lit soufflé, lit tombant.

- Les lits transportés : transport pneumatique et cyclone. Les différents modes de contact des phases solide et gazeuse dans les réacteurs et récepteurs solide-gaz sont représentés par la figure I-3-1.

L'utilisation de l'un des modes de contact solide-gaz parmi ceux cités précédemment peut dépendre de nombreux facteurs comme la taille des particules et le temps de séjour du gaz dans le lit. Dans le domaine de la conversion électrique de l'énergie solaire, le gaz doit être dépourvu de particules à l'entrée de la turbine et il doit être à très hautes températures.

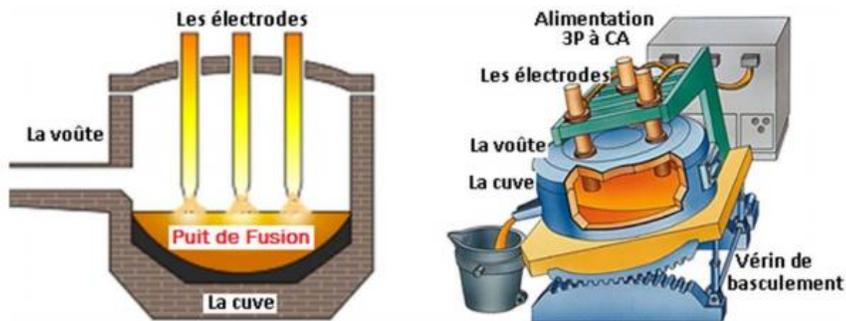


**Figure II-3-1- Différents modes de contact entre phase solide et phase gazeuse dans les réacteurs solide-gaz**

### II-3-2- Les réacteurs de traitement de minerai ou de matte liquide

#### II-3-2-1- Four à arc électrique :

Le four à arc est un système électrothermique utilisant l'énergie fournie par un arc électrique pour chauffer une charge. Les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, le métal fond à travers les arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Le four à arc est un matériel électrique très spéciale à cause de l'instabilité et la variation de l'arc électrique. Les perturbations obtenues sont aléatoires. En plus de sa la non linéarité de l'arc produit des harmoniques ainsi que des phénomènes rayonnés, et le déséquilibre.



**Figure II-3-2- Coupe et extérieure d'un four à arc électrique [16]**

### II-3-2-1-1-Four alimenté en courant alternatif

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé (Figure II-3-3). Il contient trois électrodes verticales en graphite. Les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal. Sa tension d'arc réduite quand le courant accroît. En fait, le système possède constamment une impédance non linéaire. Le métal fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Quand ces puits sont fermés, les arcs travaillent sur un bain liquide dont le volume augmente en cours de la fusion.

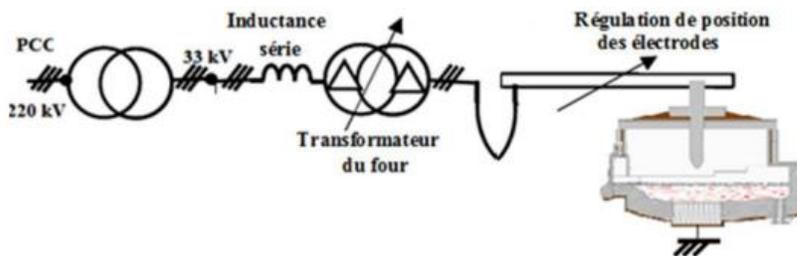


Figure II-3-3-Alimentation de four à arc à courant alternatif [17]

### II-3-2-1-2-Four alimenté en courant continu

Le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif (Figure II-3-4). Il s'en différencie toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole. Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentées chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipé la grande majorité des fours à courant continue

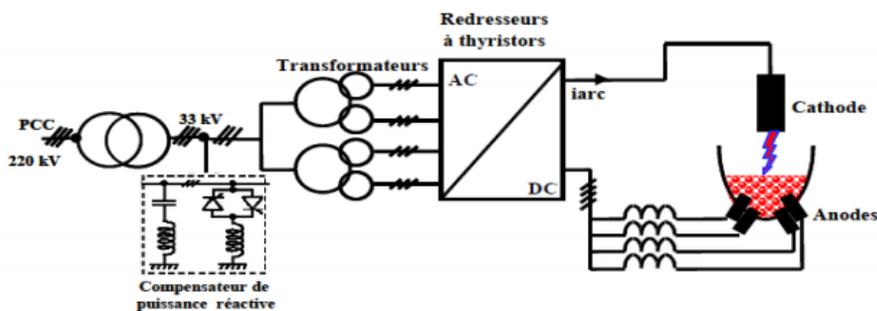


Figure II-3-4-Alimentation de four à arc à courant continu [18]

### II-3-2-3- Convertisseurs

### II-3-2-3- 1-Convertisseurs Bessemer et Thomas

Dans le procédé Bessemer, la fonte liquide est introduite dans le convertisseur (grande cornue en tôle épaisse revêtue intérieurement de briques réfractaires siliceuses capables de résister à 500 opérations). Le bas est traversé de bas en haut par un courant d'air froid sous pression, et l'oxygène de l'air diminue progressivement la teneur en carbone de la fonte, brûle les impuretés et convertit celle-ci en acier.

Dans le procédé Thomas, l'élaboration de la fonte en acier est analogue à celle qui s'opère dans le convertisseur Bessemer, mais le garnissage acide est remplacé par un garnissage basique formé de briques réalisées en malaxant, avec 10 % de goudron, de la dolomie (carbonate double de chaux et de magnésie).

### II-3-2-3- 2-Convertisseur à oxygène

Le convertisseur (Figure II-3-5) est formé d'une coque en acier renforcé à l'intérieur par un revêtement de briques réfractaires (magnésie ou dolomie). L'ensemble est soutenu par un épais anneau d'acier équipé de tourillons permettant de faire basculer le convertisseur autour d'un axe pour couler l'acier en poche par le trou de coulée. Les principaux éléments d'un convertisseur à oxygène : le haut du convertisseur (N), la lance à oxygène (L), la ceinture à tourillon (B), le tourillon (T), le mécanisme de basculement (M) et le trou de coulée (H).

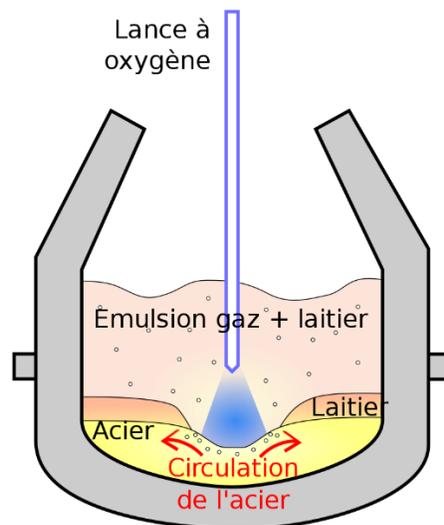


Figure II-3-5- Vue éclatée du convertisseur à oxygène (Wikipédia)

### **Procédé à injection par lance**

Dans les procédés LD (Linz-Donawitz) par lance, l'affinage s'effectue dans un convertisseur à fond plein, basculant des deux côtés et muni dans sa partie supérieure d'un trou de coulée permettant de vider l'acier.

### **Procédés à injection par tuyères au fond du convertisseur**

Dans ces procédés, le fond du convertisseur est amovible pour pouvoir le remplacer si son revêtement réfractaire et les tuyères s'usent avant le revêtement de la cuve et du bec.

### **Procédé avec brassage**

Les modifications à apporter aux aciéries LD existantes pour y appliquer les procédés avec brassage par le fond sont relativement simples ; elles comprennent un aménagement du fond des convertisseurs, l'installation de tuyauteries et d'un système de commande de l'injection de gaz, le plus souvent de l'azote et de l'argon, parfois du dioxyde de carbone.

## **II-4-Les opérations unitaires chimique et les réacteurs en hydrométallurgie**

### **II-4-1- Les réacteurs de lixiviation et de précipitation**

Cette technique est aussi couramment employée ; elle permet de travailler à une température d'ébullition supérieure à celle obtenue à pression atmosphérique, ce qui a pour effet d'améliorer la cinétique, les phénomènes de transfert ainsi que la filtrabilité du résidu. Les autoclaves doivent pouvoir résister aux conditions de température et de pression qui peuvent atteindre plus de 200 °C et plusieurs mégapascals. Leur conception en acier inoxydable, en titane ou en alliages spéciaux leur permet de résister à la corrosion.

### **II-4-2-Mélangeur -décanteurs**

Le mélangeur-décanteur de figure II-4-1 est un simple appareillage et très utilisé en hydrométallurgie. Les phases organique et aqueuse sont mélangées dans un premier réacteur qui se décharge par débordement dans un second réacteur où les phases se séparent par sédimentation. Le mélangeur fournit l'agitation indispensable à la dispersion des phases, mais doit aussi garantir un temps de contact suffisant pour permettre le transfert de matière entre les phases aqueuse et organique. La capacité du contacteur est choisie en fonction de la cinétique de la réaction et des débits à traiter. Les solutions aqueuse et organique entrent dans le mélangeur par le dessous (figure II-4-1) ce qui permet un meilleur mélange. La plupart des mélangeurs-décanteurs utilisés en industrie incluent seulement une unité de mélange (figure II-4-1), mais on trouve également des usines qui utilisent des mélangeurs-décanteurs avec deux unités de mélange (figure II-4-2). Des chicanes sont installées dans les mélangeurs pour réduire le risque de séparation des phases par l'effet centrifuge durant l'opération (figure II-4-3). La dispersion des phases dans les mélangeurs se fait par un agitateur similaire à celui montré à la figure II-4-4. Ce type d'agitateur produit des gouttes de diamètre faiblement distribuées autour d'une moyenne.

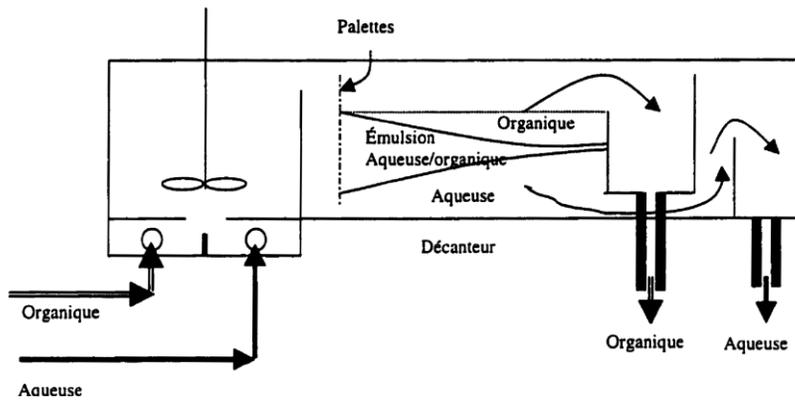


Figure II-4-1- Mélangeur-décanteur

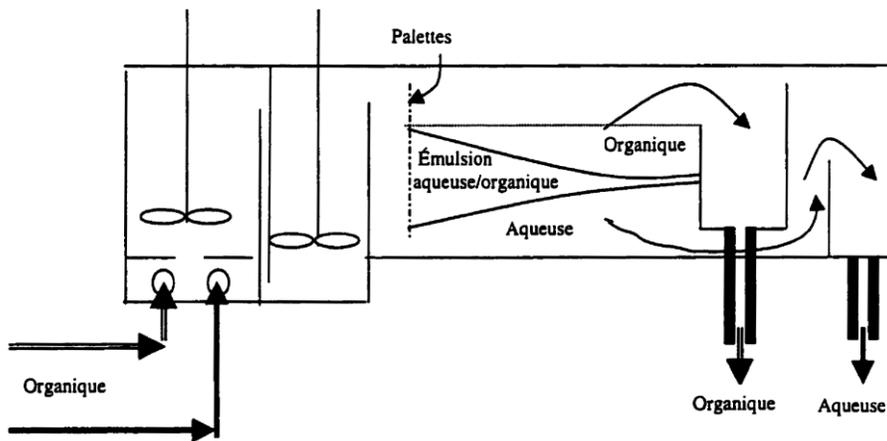


Figure II-4-2-Mélangeur-décaanteurs a deux unités de mélange

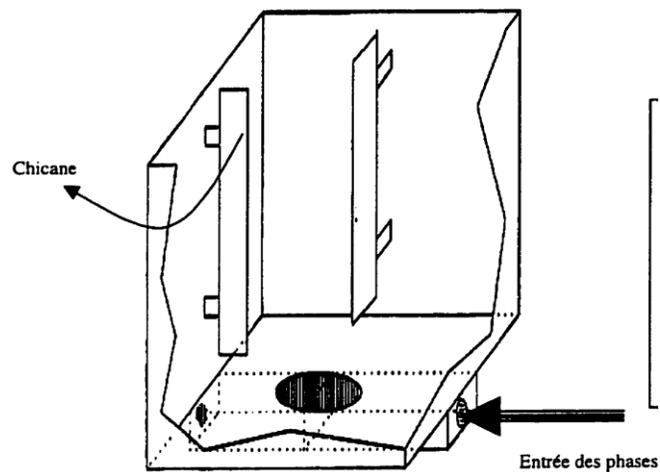
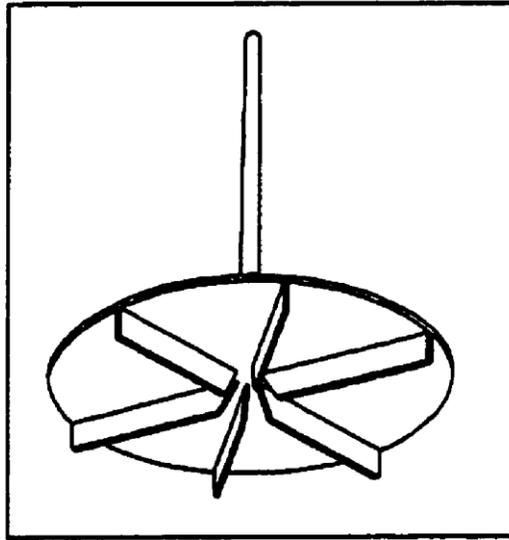


Figure II-4-3- Mélangeur avec des chicanes



**Figure II-4-4- Agitateur**