

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDERRAHAMANE MIRA- BEJAIA  
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
Département des sciences Biologiques de l'Environnement

## **MEMOIRE DE FIN DE CYCLE**

*En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Ecologie et  
Environnement*

*Option : Pathologie des écosystèmes*

# *Thème*

**Le traitement des eaux usées industrielles par  
Electroflottation**

*Présenté par :*

M<sup>r</sup>. TRAORE Bandiougou

*Jury :*

M<sup>r</sup>. BENHAMICHE

*President*

M<sup>r</sup>. MADANI K.

*Promoteur*

M<sup>r</sup>. BEKDOUCHE F.

*Examineur*





# Remerciements

*Nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin,  
ont contribué à réaliser notre mémoire*

*Nos remerciements vont en particulier à :*

*-Notre encadreur, Monsieur MADANI pour son aide,  
sa disponibilité et ses précieux conseils*

*Pour que ce travail soit une réussite.*

*-Au Personnel de SONATRACH BEJALA pour leur  
aide et disponibilité.*

*-Les membres du jury pour l'honneur d'avoir accepté de  
juger ce modeste travail.*

*-Et sans oublier le personnel de notre département.*



## ***DEDICACES***

Je dédie ce travail :

A ma chère mère

En témoignage de ma profonde gratitude et de mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices, toute la confiance qu'elle m'a accordé et tout l'amour avec lequel elle m'inonde chaque jour.

A mon cher père

Qui est le meilleur père dans ce monde, pour son encouragement, sa confiance, son soutien moral et matériel et son amour infini.

A mes sœurs; frères et cousins que j'aime, en leur souhaitant pleins de succès dans leur vie.

A tous mes amis, merci pour vos conseils et votre soutien de tous les jours.

***Bandiougou Traoré***

# SOMMAIRE

## Liste des Nomenclatures

## Liste des tableaux et figures

## Introduction générale.....01

## Chapitre I Pollution des eaux résiduaires

### I.1. Caractéristiques des eaux usées.....03

#### I.1.1. Introduction.....03

#### I.1.2. Origine et nature des eaux usées .....03

##### I.1.2.1. Origines des eaux usées.....03

##### I.1.2.2. Composition des eaux usées.....03

#### I.1.3. Principaux paramètres de la pollution.....04

##### I.1.3.1. Les Paramètres physiques de la pollution.....04

##### I.1.3.2. Les paramètres chimiques de la pollution.....06

##### I.1.3.3. Les paramètres biologiques de la pollution.....07

### I.2. Caractérisation des rejets industriels .....07

#### I.2.1. Différents types de rejets liquides industriels.....07

##### I.2.1.1 Eaux des circuits de refroidissement.....07

##### I.2.1.2 Eaux de lavage des sols et des machines.....08

##### I.2.1.3 Eaux de fabrication.....08

##### I.2.1.4 Rejet des services généraux.....08

#### I.2.2. L'industrie pétrolière.....09

##### 1.2.2.1. Production du pétrole.....09

##### 1.2.2.2. Transport du brut et des produits raffinés.....10

1.2.2.3. Raffineries.....	10
I.2.3. Impact des rejets industriels.....	12
I.2.4. Valeurs limites des rejets industriels.....	12

## Chapitre II Procédés d'épuration des eaux résiduaires industrielles

II.1. Introduction.....	13
II.2. Traitement primaire.....	13
II.3. Traitement secondaire.....	13
II.3.1. Traitement biologique.....	13
II.3.2. Traitement physico-chimique.....	14
II.4. Séparations des phases solide-solide ou liquide-liquide par.....	17
II.4.1. Principes et mécanismes théoriques de la flottation.....	17
II.4.2. Dimension et vitesse des bulles.....	18
II.4.3. Technologie des procédés de flottation.....	19
II.4.2.1. Flottation par air dissous ou aéroflottation.....	19
II.4.2.2. Electroflottation.....	21

## Chapitre III Electroflottation

III. 1. Théorie.....	22
III.2. Conditions nécessaires pour la flottation.....	23
III.3. Formation du complexe bulle particule.....	28
III.4. Les applications de l'électroflottation.....	29

III.5. Influences de certaines variables sur la taille des bulles.....	31
III.6. Paramètres influençant le procédé.....	33
III.6.1. La nature des électrodes.....	33
III.6.2. Densité de courant appliquée .....	34
III.6.3. Temps de séjour.....	35
III.6.4. PH de la solution.....	35
III.6.5. Salinité.....	35
III.6.6. Autres ajouts de produits chimiques.....	36
III.7. Technologie de conception d'une cellule d'électroflottation.....	36
III.8. Avantages de l'électroflottation.....	37
III.9. Domaines d' applications.....	37

## **Chapitre IV**

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. But et objectif du travail.....	39
IV.3. Matériels et méthodes.....	39
IV.3.1. Unité d'électroflottation.....	40
IV.3.2. Détermination des paramètres de pollution.....	40
IV.4. Présentation de l' entreprise << SONATRACH >>.....	42
IV.4.1. Enquête concernant la SONATRACH-RTC de BEJAIA (DRGB) .....	42
IV.4.2. Origine et Composition des eaux résiduaires .....	43

IV.4.3. Description des séparateurs d'huiles-eaux au niveau du complexe pétrolier.....	43
IV.4.4. Prise de l'échantillon.....	44
IV.4.5. Traitement d' expérimental.....	45
IV.5. Interprétation et discussion des résultats.....	46
<b>IV.7 . Conclusion.....</b>	<b>48</b>

## **Bibliographie**

## **Glossaires**

## **Annexes**

## Liste de nomenclatures

Paramètres	Désignation	Unité
B,b	<b>Largeur</b>	cm
C	Ecart entre les électrodes	cm
E	Energie	Joule
V	Volume	m <sup>3</sup>
Ne	Quantité d'électricité	Coulombs
I, i	Courant électrique	Ampère
U	Tension électrique	Volt
We	Travail	KWh
Q	Débit	M <sup>3</sup> /h
$\psi_0$	Potentiel de Nernst	mV
Z	Potentiel Zeta	mV
$\gamma$	Tension superficielle	dyn/cm
$\lambda$	Longueur d'onde	Å
$\mu$	Viscosité dynamique	Pas
P	Poids spécifique	g/cm <sup>3</sup>
T,t	Temps	Second
MES	Matières en suspension	mg/l
MVS	Matières volatiles en suspension	mg/l
DBO <sub>5</sub>	Demande biochimique en Oxygènes	mg/l
DCO	Demande chimique en Oxygène	mgO <sub>2</sub> /l
NGL	Azote global	mg/l
AOX	Composés organo-halogénés absorbables sur charbon actif	mg/l
E <sub>m</sub>	Equivalent Electrochimique	g/ah
D	Diamètre	mm
S	Surface	m <sup>2</sup>
H,h	Hauteur	m
R	Rayon de la bulle	cm
M	Masse d'électrode	g
G	Accélérateur de la pesanteur	g/s
P	Epaisseur d' électrode	cm
L	Longueur d'une électrode	cm
L	Longueur de la chambre de flottation	cm
P,H	Pression	Pa
$\eta$	Rendement	%
EF	Eléctroflotation	-



## LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre du tableau	Pages
1	I.1 Classes de turbidité usuelle(NTU, Néphélobimétrie turbidité)	5
2	I.2 Production et raffinage caractéristiques des principaux effluents	11
3	I.3 les normes de la pollution dues aux rejets industriels	12
4	II.1 Exemples de décantation des matières colloïdales	15
5	II.2 Avantages et inconvénients du traitement physico-chimique	16
6	III.I. Principaux matériaux employés pour la fabrication de la cathode et de l'anode	26
7	IV.I. Résultats des paramètres de pollution caractéristique moyenne avant et après traitement par électroflottation de l'échantillon utilisé	37

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre des figures	Pages
1	II.1. Variation des énergies inter colloïdales (EA et EB) en fonction de la distance des solutés lors de la coagulation	16
2	II.2. Schéma de principe d'épuration par flottation à air dissous	20
3	III.1. L'angle de mouillage entre la bulle et la particule	21
4	III.2. Modèle de la double couche pour une particule électronégative dans une solution ionique aqueuse.	
5	IV.1. Schéma d' un électroflottateur en batch (régime discontinu)	33
3	IV.3.2. Courbe d'étalonnage de la DCO	34
4	IV.5. Les bacs de la DRGB	35
5	IV.6. Schéma d'un séparateur d'huile- eau par gravitation	35
6	IV.5.Variation de l'efficacité d'enlèvement de la DCO sous l'effet de l'optimisation de la tension	38

## Introduction

L'industrie représente une part importante de l'économie mondiale malgré l'amélioration constante de ces procédés. Elle est sans cesse confrontée aux difficultés de gestion des effluents et des produits usagés qu'elle produit. Certains de ces produits sont rejetés dans les eaux naturelles sans qu'ils soient détruits par des procédés de traitement. En particulier, de nombreux composés organiques contenus dans les effluents industriels sont toxiques pour l'environnement.

Les eaux résiduaires issues des stations de lavages et des usines pétrochimiques appartiennent au rang des effluents industriels de caractéristique mixtes. Ces eaux contiennent un ou plusieurs constituants biodégradables mais renferment aussi des milieux carencés ou inhibés par d'autres constituants (**Gujer et al. 1991**). Face aux normes des rejets de plus en plus sévères et aux coûts élevés du traitement des effluents industriels, les procédés physico-chimiques classiques atteignent leurs limites dans la dépollution des eaux issues de l'industrie pétrolière à forte charge polluante d'hydrocarbures ; alors et en vue d'améliorer les performances du traitement de ces effluents, le procédé d'électroflottation soit en régime discontinu ou en régime continue, s'est présenté comme une technique de séparation alternative aux procédés physicochimiques classiques (**Persin et al, 1989**).

La séparation solide-liquide peut se faire par filtration, par décantation ou flottation, cette dernière peut être réalisée par air dissous ou insufflation d'air. L'électroflottation est la version électrochimique de la flottation et se distingue par le mécanisme de formation des bulles, qui sont générées en électrolysant l'effluent à traiter les bulles d'oxygènes produites par électrolyse à la surface des électrodes sont très fines, uniformes et s'élèvent très doucement en se fixant sur des particules en suspensions qui sont très fines, uniformes vers la partie supérieure de l'unité d'électroflottation. Par la suite les matières en suspensions et l'eau peuvent être utilisées ou recyclées séparément. Ce procédé constitue la version électrochimique de la flottation traditionnelle. Il se distingue par son mécanisme de formation des bulles d'hydrogène et d'oxygène produites par électrolyse de l'eau en utilisant des électrodes en métal.

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats d'une étude expérimentale, menée dans une unité d'électroflottation à électrodes solubles en aluminium, qui fonctionne en régime discontinu et ceci dont le but de mettre en évidence les valeurs optimales des paramètres influant sur le rendement d'épuration.

Malgré une réelle prise de conscience du problème de la pollution de l'eau, la gestion des déchets industriels et ménagers reste une des préoccupations majeures des pays. Ce souci s'est manifesté sous la forme de deux interrogations : comment éviter la dégradation de notre environnement due à la production et à la dissémination des déchets, et comment effectivement remédié aux problèmes causés par celle-ci.

On s'est posé des sous questions telles :

- Comment résoudre le problème causé par la pollution dans nos sociétés?
- Comment améliorer les différents procédés d'épurations classiques déjà existant?
- Comment améliorer des techniques de traitement alternatives aux procédés physico-chimiques classiques?

Ainsi dans notre travail d'étude, on a émit une hypothèse qui est la suivante :

- Le traitement des eaux usées par électroflottation est la solution alternative face aux problèmes de la pollution de l'eau, et est la solution pour remédier à la dégradation de notre environnement.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres. Les trois premiers traitent l'aspect théorique où sont décrites les caractéristiques des eaux résiduaires industrielles , leurs moyens de traitement et les techniques expérimentales relatives à l'optimisation des paramètres influençant le procédé d'électroflottation.

Le quatrième est consacrée a une étude expérimentale (conception d' un banc d'essais pour un régime discontinu). Cette dernière se basera sur les études menées antérieurement sur un régime continu d'une part, d'autre part rassemble les résultats expérimentaux obtenus après les analyses effectuées avant et après le traitement de l' échantillons prélevés aux pieds des bacs de stockage du pétrole brut dans les bassins des séparateurs d'huile-eaux ,à la station terminale arrivée de la DRGB << SONATRACH-RTC BEJAIA>>.

## **I.1. Caractéristiques des eaux résiduaires**

### **I.1.1. Introduction**

Les eaux usées ou eaux résiduaires quelle que soit leur origine, sont généralement chargées en éléments indésirables, qui selon leur quantité et leur composition représentent un danger réel pour les milieux récepteurs ou leurs utilisateurs. L'élimination de ces éléments toxiques exige de concevoir une chaîne de traitement. Toutefois, avant de concevoir tout procédé d'épurations il est impératif de caractériser l'effluent à traiter, quantitativement et qualitativement.

### **I.1.2. Origine et nature des eaux usées**

#### **I.1.2.1. Origines des eaux usées**

Les eaux usées proviennent principalement de quatre sources (**Gommella & Guerree,1983**).

- Les eaux usées domestiques ;
- Les eaux usées industrielles ;
- Les eaux de pluies et de ruissellement dans la ville ;
- Le ruissellement dans les zones agricoles.

#### **A) Les eaux usées domestiques**

Ces eaux sont constituées par :

Eaux usées ménagères provenant des usages domestiques : eaux de bain, de lessive .

Eaux vannes : urines ,fèces. En générale ces eaux sont chargées en matières organiques, graisses et des produits d'entretiens ménagers, elles présentent une bonne biodégradabilité.

#### **B) Eaux de ruissellement**

Ce sont des eaux de pluies et de lavage des chaussées. Ces eaux sont caractérisées par la présence des matières en suspensions en grande majorité ainsi que des hydrocarbures provenant de la circulation automobiles.

#### **C) Eaux de caractéristiques mixtes**

Ces eaux proviennent d'un mélange entre deux sources d'eaux usées ,industrielles et urbaines .Ces eaux sont parfois très chargées, ce qui rend leur composition variable.

#### **D) Eux usées agricoles**

Ce sont des eux de drainages et des rejets des fermes.

Ces eaux sont caractérisées par la présence de fortes concentrations de pesticides et d'engrais. Elles ont une valeur fertilisante très importante.

## **E) Eaux usées industrielles**

Ces eaux proviennent des différentes usines de fabrication ou de transformation .la qualité de ces eaux varie selon le type d'industrie, elles peuvent être chargée en matières toxiques difficilement biodégradables qui nécessite un traitement spécifique.

### **I.1.2.2. Composition des eaux usées**

La composition des eaux usées se manifeste sous forme minérale, et organique et microbiologique (Thomas, 1995).

#### **A) Pollution minérale**

Elle est constituée essentiellement des métaux lourds en provenance des industries métallurgiques, de traitement des minerais .On peut citer quelques –un, comme le plomb ,le cuivre, le fer, le zinc, le mercure. Il y'a aussi le cas de certain sels à forte concentration .Ces éléments sont non biodégradables et de ce fait un traitement tertiaire devient plus que nécessaire.

#### **B) Pollution organique**

La pollution organique des eaux usées urbaines se compose principalement de protides, de glucides et de lipides ainsi que des détergents utilisés par les ménages. Il est à noter. L'existence d'autres substances organiques utilisées ou fabriquées industriellement, c'est le cas des phénols , des aldéhydes, des composés azotés.

#### **C) Pollution microbiologique**

Le rejet urbain en général présente des conditions très favorables à la prolifération de certains germes pathogènes et de d'organismes vivants. On peut citer les virus, les bactéries, les protozoaires, les verres et les microchampignons. Ces différents éléments garantissent une masse permanente en germes utiles à l'épuration par biodégradation.

### **I.1.3. Principaux paramètres de la pollution**

#### **I.1.3.1. Les paramètres physiques**

##### **A) Température**

Elle a une déterminante sur l'activité des micro-organismes et sur la réserve d'oxygène pour le processus d'autoépuration. Pour garantir le bon fonctionnement de certains ouvrages de la chaîne de traitement (dégraisseurs), cette température ne doit pas dépasser 30°C.

##### **B) La turbidité**

Elle indique la présence plus ou moins importante des M.E.S d'origine organique ou minérale. Elle est mesurée par un turbidimètre et s'exprime en << degré >>.En faite la turbidité correspond à la notion de trouble, perceptible au sein d'un milieu (liquide ou gazeux) contenant des particules.

Le tableau suivant représente les classes de turbidité usuelle.

**Tableau I.1: Classes de turbidité usuelle(NTU, Néphélométrie turbidité) (Rodier, 1996).**

NTU<5	Eau claire
5<NTU<30	Eau légèrement trouble
NTU>50	Eau trouble

### **C) La conductivité**

la mesure de la conductivité donne une idée sur la salinité de l'eau. Plus la concentration ionique des sels dissous et plus la conductivité est grande.

### **D) Couleur et odeur**

En général la couleur et l'odeur ont été utilisées comme les premiers indicateurs de la pollution de l'eau. La couleur d'une eau usée urbaine est grisâtre, mais certains rejets industriels (teinture papeteries ...).

Contiennent des colorants particulièrement stables. Il existe plusieurs gaz qui donnent des odeurs, résultant d'une fermentation ou décomposition, parmi lesquels on peut citer :NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S...

### **E) Les matières en suspensions (M.E.S)**

Les matières en suspensions représentent certainement l'un des paramètres spécifiques le plus facilement perceptible et paradoxalement l'un de plus difficilement mesurable Ce sont des matières solides contenues dans les eaux usées qui sont séparables par filtration décantation ou centrifugation. Les teneurs en M.E.S sont obtenues après séchage à 105°C. Elles s'expriment en (mg/l).

### **F) Les matières en suspensions (MVS)**

Elles sont constituées par la partie organique des M.E.S, elles sont mesurées par calcination à 600°C en deux heures et présentent en moyenne 70% des MES.

### **G) les matières minérales (M.M)**

Elles représentent la fraction minérale des M.E.S. C'est la différence entre les matières en suspensions et les matières volatiles en suspensions . Elles représentent par conséquent le résidu de la calcination.

### I-1-3-2. Les paramètres chimiques de la pollution

#### A) Le potentiel hydrogène (PH)

Le PH indique la concentration en ion  $H_3O^+$  présent dans l'eau. Les micro-organismes autorisent une gamme de PH allant de 5 à 9 en milieu aérobie et 6 à 8 en milieu anaérobie.

#### B) La Demande biochimique en oxygène ( $DBO_5$ )

Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation (avec l'intervention des bactéries) les matières organiques contenues dans une eau usée.

Matière organique + bactérie = Boues + Gaz + eau.

Généralement la pollution est dégradée d'une manière significative pendant une durée de 5 jours, au delà de 5 jours d'incubation à  $20^\circ C$  et dans l'obscurité ( **Degremont, 1976, 1989**)

#### C) La Demande Chimique en oxygène (DCO)

Elle représente la quantité d'oxygène consommée par oxydation chimique de la totalité des matières organiques et minérales dissoutes dans l'eau. Les matières réductrices. bichromate de potassium agissant en milieu sulfurique pendant deux heures à ébullition, oxyde presque entièrement les matières réductrices.

##### ➤ Relation entre DCO et $DBO_5$

Le rapport  $DBO/DCO$  donne une estimation de la biodégradabilité des eaux usées.

La notion de la biodégradabilité représente la capacité d'une substance ou son aptitude à être décomposée par les micro-organismes (bactéries champignons...)

Si  $2 < DCO/DBO_5 < 5$  traitement biologique avec adaptation de souches.

$DCO/DBO_5 > 5$  : Traitement physico-chimique. L'eau est pratiquement non traitable par voie biologique.

$DCO/DBO_5 < 2$  : Le traitement se fait biologiquement ( **Monchy, 1978**).

#### D) Le phosphore

Le phosphore se trouve dans l'eau usée sous deux formes :

De sels minéraux (ortho phosphates, poly phosphates)

De composés organiques.

La présence des ortho phosphates dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés, à la décomposition de la matière organique, aux engrais phosphatés industriels, entraînés par lessivage ou par infiltration.



Les poly phosphates sont utilisés dans des nombreuses unités industrielles, industrie pharmaceutiques.

Les poly phosphates peuvent être toxiques pour l'homme et sont considérés responsables des accidents cardiaque et vasculaires ( **Bechac & Boutin and al, 1984**).

### **E) Azote**

L'azote se présente sous diverses formes dans les eaux usées.

Forme oxydée : azote nitreux ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) ;

Forme moléculaire : azote dissous ;  $\text{N}_2$

Forme réduite : azote organique,  $\text{NH}_4^+$ .

L'azote est l'un des éléments qui favorise la prolifération d'algues par conséquent la réduction de sa teneur avant le rejet des eaux est plus que nécessaire ( **Bechac & Boutin and al, 1984**).

### **F) Les métaux lourds**

Les métaux lourds se trouvent dans les eaux urbaines à l'état de trace mais de concentration plus élevées sont en générales révélatrices d'un rejet industriel sans aucun doute.

Leur présence est nuisible pour l'activité des micro-organismes donc perturbe le processus d'épuration biologique. Leur élimination se fait à la phase de décantation, filtration du traitement. ( **Divet, Shulof, 1978**).

#### **I.1.3.4. Paramètres biologiques de la pollution**

Les micro-organismes présents dans les eaux usées sont à l'origine du traitement biologique, ils sont constitués :

Des germes pathogènes (mycobactéries colibacilles etc....) ;

Les virus ; des parasites (Kystes d'amibes ; des œufs de verre...);

Des champignons.

## **I.2. Caractérisation des rejets industriels**

### **I.2.1. Différents types de rejets liquides industriels**

#### **I.2.1.2. Eaux des circuits de refroidissent**

Ce sont toutes les eaux qui sont en abondance et généralement non polluées. Car elles ne sont pas en contactes avec les produits fabriqués elles peuvent être recyclées ; l'appoint indispensable pouvant être fourni par de l'eau traitée. Plus délicat est le rejet est le problème

posé par le rejet des purges des circuits d'eaux de réfrigération, souvent très minéralisées et pouvant contenir une quantité plus ou moins grande des produits chimiques ayant servi à leur traitement ( **Boeglin, 1997**).

### **I.2.1.3. Eaux de lavages des sols et des machines**

Ces eaux sont chargées de produits divers matières premières ou liqueurs de fabrication , hydrocarbures et huiles de machines; produits détergents bactéricides ou bactériostatiques; utilisés en désinfection. La production et le degré de pollution de ces effluents résiduaires sont souvent importants à la fin de la période travail et au cours des nettoyages de fin de semaine et des périodes de congés. Il ne faut pas oublier que certains de ces rejets sont occasionnels; et peuvent correspondre; par exemple; à des fuites accidentelles des produits lors de leur manutention ou de leur stockage.

### **I.2.1.4. Eaux de fabrication**

La nature des effluents est très variable d'une industrie à l'autre ; la plupart des procédés industriels conduisent à des rejets polluants qui proviennent du contact de l'eau avec des solides ; des liquides ou des gaz.

En outre, certaines eaux de fabrications contiennent des produits toxiques dont la présence peut masquer la valeur réelle de la pollution biodégradable. Il est souvent judicieux de prévoir une séparation plus certaine avec certains rejets plus concentrés en polluants soit en vue d'un traitement spécifique Permettant éventuellement leur récupération, soit en vue de leur collecte dans un bassin de stockage pour être réinjecté ultérieurement à débit pondéré dans le circuit de traitement. C'est le cas par exemple:

Des condensats de papeterie; des eaux mers de l'industrie agroalimentaire ;

Des rejets toxiques concentrés, en générale des industries de traitement de surface de chimie ou automobiles ( **Boeglin, 1997**).

### **I.2.1.5. Rejets des services généraux**

Ce sont essentiellement des eaux usées domestiques de l'usine qui présentent des Caractéristiques particulières et sont biodégradables. La présence de chasses automatiques peut entrainer une dilution assez forte; par contre, il faut noter des pointes très accentuées, dues aux rejets des cuisines et cantines généralement très chargés en graisses et débris très hétérogènes produits au moment des repas. Il faut également prendre en compte, également, dans les différents effluents des services généraux;

Tels que:

- Les eaux de chaufferie ( purge de chaudière).
- Les boues du traitement des eaux d'appoint et les purges d'eaux de réfrigération.

- Les substances existant dans les eaux résiduaires industrielles sont soit minérales ou organiques ces substances peuvent être à l'état solide non dissout, ou à l'état liquide ou bien encore sous forme dissoute (le plus souvent ionisé par les matières minérales); mais parfois sous forme semi dissoute (colloïdale).
- Les eaux usées sont soit caractérisées par une grande teneur en résidu sec dont la moitié est une combinaison organique des corps suspendus, facilement déposable.

L' eau usée industrielle est plus polluée que tout autre rejet d'eau : (**Anonyme1,1997**)

L'industrie les plus polluants sont :

- Les industries chimiques;
- Les industries alimentaires;
- Les industries pétrochimiques
- Les industries nucléaires
- Les industries celluloses et papiers

✓ Parmi les caractéristiques des industries on pourra préciser aussi l'industrie du pétrole

### **I.2.2. L' industrie pétrolière**

La pollution pétrolière due aux rejets spécifiques de l'industrie pétrolière est constituée par les hydrocarbures qui sont la dénomination commune des polluants.

Le problème posé par ce type de pollution est lié à la très stabilité de l'émulsion ou de surnageant recouvrant ainsi la surface de l'eau d'une couche qui contribue à la modification des échanges gazeux avec l'atmosphère. Comme ils présentent aussi des effets nocifs pour la santé du consommateur d'eaux contaminées par ces produits; aux hydrocarbures on ajoute d'autres composants de nature très variées comme les sels de sodium; des matières organiques ( phénol, acide sulfurique, catalyseur) (**Rodier& coll, 2005**) .

Cependant, on peut définir (4) groupes d'activités susceptibles de produire des effluents spécifiques, ce sont:

- Production du pétrole.
- Transport du brut et des produits raffinés.
- Raffineries.
- Pétrochimie

#### **1.2.2.1. Production du pétrole**

Les rejets en sont les eaux de formation et extraites avec le brut et éventuellement les boues de forages . L'activité (Offshore) impose des contingences de poids et compacité très contraignantes.

### 1.2.2.2. Transport du brut et des produits raffinés

Dans les terminaux, on doit traiter les eaux de déballastages des pétroliers et quelques fois les eaux de nettoyages.

### 1.2.2.3. Raffineries

On distingue des raffineries simples basés principalement sur la distillation du brut et les raffineries complexes comprenant une unité de vapocraquage et souvent aussi une unité de fluocraquage qui accroissent le volume de rejet et les pollutions. De faibles débits de soudes usées représentent alors un flux polluant considérable (soude,  $S^2$ , mercaptans, phénols).

Dans ces trois premières activités, la pollution commune provient des hydrocarbures présentée dans le tableau ci après (**Rodier& coll, 2005**).

**Tableau.I.2: Production et raffinage caractéristiques de principaux et effluents (Rodier& coll, 2005).**

Origine	Volume d'eau en % du pétrole traité	Hydrocarbure en mg/L	Autres polluants
Production : Eau gisement	0 à 600	200 à 1000 après séparateur triphasique	Nacl, sables Argiles
Transports : - Eau de ballast - Nettoyage des pétroliers	(25 à 30 % de la capacité du pétrolier)	Après stockage moyenne 50-80 paraffines- cires 500-1000 émulsions	Nacl, sables Détergents Alcalinité
Raffinage : Dessaleur	5-6	50-150 Hc légers	Na cl, phénols éventuel.S <sup>2-</sup>
Fluo-craquage Catalytique FCC	6-10	100-150	S <sup>2-</sup> , RSH, Phénols NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ,F <sup>-</sup>
Condensats distillation atmosphérique	2 à 2,5	50	Phénols, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Condensats distillation sous vide	1 à 1,5	150	Phénols, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Eau pluviales		Variables	Sables
Autres pollutions			
FCC/Soude phénoliques ;  Vapocraqueurs/ soude sulfureuses		Phénols : 10-60 S <sup>2-</sup> , RSH, Hc : 0;3-5  S <sup>2-</sup> : 20-60; RSH : 0,3-10 Phénols : 0,2-2	
Huiles lubrifiantes : Extraction aromatiques et non paraffiniques		Fural Mezthyl-ethyl-cetone	

### I.2.3. Impact des rejets industriels

" L'utilisation de l'eau, c'est quasiment accepter de la polluer... "

La pollution des eaux d'une réserve naturelle (superficielle ou profonde) a pour conséquence la perturbation, de l'équilibre biologique de cette eau, ce qui la rendra susceptible de provoquer des dommages ou des désordres.

L'activité industrielle génère des polluants divers susceptibles de créer des nuisances à ces eaux qui sont une menace certaine à l'environnement et par conséquent les industries pour être en accord avec la réglementation environnementale, doivent prévoir la mise en place d'un traitement sur site avant le rejet de leurs effluents. Ce traitement peut être soit un prétraitement pour les industries raccordées à une STEP soit un traitement poussé pour les industries rejetant dans le milieu naturel.

### 1.2.4. Normes des rejets industriels

- ✓ Ce tableau ci après indique les normes de la pollution dues aux rejets industriels Sous l'article du 02 Février 1998 ( journal de la république française).

**Tableau I.3: les normes de la pollution dues aux rejets. (Anonyme 6, 1998)**

.Paramètres	Normes de rejets
PH	5,5<PH<8,5 ; 9,5 s'il y'a neutralisation
T°C	Inférieure à 30°C
DBO	Pour effluent non décanté: 100 mg/l si le flux journalier maximal autorisé n'excède pas 30 Kg/J 30 mg/l pour les eaux réceptrices de 15 Kg/J
DCO	Pour effluent non décanté: 300 mg/l si le flux journalier maximal autorisé n'excède pas 100 Kg/J 125 mg/l pour les eaux réceptrices de 50 Kg/J
MES	100 mg/l si le taux maximal journalier autorisé n'excède pas 15 Kg/J 35 mg au-delà de 15Kg/J.
Phosphore total	10 mg/lorsque le flux journalier maximal égal ou supérieur à 5Kg/J
Azote global	15 mg/l lorsque le flux journalier maximal supérieur à 150 Kg 10 mg/l lorsque le flux journalier supérieur ou égal à 300Kg /J



## II.1. Introduction

Les eaux usées constituent un effluent très chargé en matières polluantes, nuisibles aussi bien au milieu récepteur qu'aux utilisateurs. Pour remédier à cette pollution, l'eau usée doit subir une épuration avant son rejet ou sa réutilisation. On dispose de trois étapes de traitement pour une qualité d'eau épurée assez élevée. Le traitement primaire, Le traitement secondaire, Le traitement tertiaire.

## II.2. Traitement primaire

Le traitement primaire repose essentiellement sur le principe de la séparation des constituants solides de la phase liquide par un processus de décantation, de sédimentation. Le traitement primaire est réalisé souvent en deux parties : le prétraitement et une décantation primaire.

Le prétraitement est un ensemble d'opérations suivantes : dégrillage, dessablage, dégraissage, déshuilage et tamisage. Il est à préciser qu'il est très rare qu'une chaîne de prétraitement soit constituée de toutes ces opérations, souvent elle est réduite au dégrillage et au dessablage. Ce premier passage constitue un dispositif de sécurité pour les appareillages situés à l'aval.

Les eaux usées ayant subi un prétraitement véhiculent des matières organiques et minérales sédimentables. Ainsi une sédimentation efficace sur un décanteur primaire permet de retenir une fraction importante des matières sédimentables, ceci permettra d'alléger la charge des traitements ultérieurs et donc de réduire les dimensions de certains ouvrages **(Bechac & Boutin and al, 1984, Gommella & Guerree,1983)**.

## II.3. Traitement secondaire

A ce niveau, le traitement permet de se débarrasser des impuretés présentes sous forme solubles ou lorsque leur taille ne permet pas d'être piégée dans le traitement primaire.

A ce stade, on distingue deux types de traitement :

- ❖ Le traitement physico-chimique et le traitement biologique.

### II.3.1. Traitement biologique

Le traitement biologique des eaux résiduaires a pour but d'éliminer la matière organique dissoute par action des bactéries et micro—organismes. Il permet de passer des éléments présents sous forme soluble ou colloïdale en éléments floculables et de constituer des agrégats que l'on peut séparer de l'eau. Il faut aussi signaler que la plupart des procédés biologiques exigent un domaine optimum de pH compris entre 6,5 et 8,5 quant à l'activité microbienne, elle est optimale à 30°C et requière des quantités suffisantes en nutriments.



On peut grossièrement classer les micro-organismes en :

- germes aérobies qui exigent de l'oxygène pour leur métabolisme ;
- germes anaérobies qui tirent leurs besoins énergétiques de la matière organique en absence de l'oxygène ;
- germes aérobies facultatifs qui ont un métabolisme aérobie et un métabolisme anaérobie. L'épuration des eaux usées fait appel à deux types de procédés :
  - ✓ Les procédés extensifs (l'épandage, lagunage)
  - ✓ Les procédés intensifs. (le lit bactérien, disque biologique, les boues activées).

### II.3.2. Traitement physico-chimique

Le traitement physico-chimique est le procédé le mieux adapté aux variations saisonnières de la charge polluante ou de l'existence des matières toxiques. Le traitement physico-chimique passe par trois opérations principales :

#### a) Décantation

C'est un procédé de séparation solide-liquide à base de la pesanteur. On utilise le terme de décantation lorsque l'on désire obtenir la clarification d'une eau brute ; si l'on veut obtenir une boue concentrée, on parle de sédimentation.

La sédimentation a pour but d'éliminer les matières en suspension de la fraction liquide, en utilisant la seule force de gravité (**Desjardis, 1990**).

Les matières minérales grenues et les matières flocculeuses en suspension chutent au fond de bassin ou demeurent en suspension dans les eaux ; la relation suivante s'applique au mécanisme de décantation :

$$F = (p_p - p_L) gV \dots \dots \dots (1).$$

Avec : F : force verticale de haut en bas (en N);

g : accélération due à la pesanteur ( $m/s^2$ ) ;

$p_p$ : masse volumique de la particule ( $kg/m^3$ )

$p_L$ : masse volumique de l'eau ( $kg/m^3$ )

V: volume de la particule ( $m^3$ ).

#### b) Coagulation -floculation

Lorsque la décantation naturelle des matières en suspension dans l'eau est trop lente pour obtenir une décantation efficace, on utilise les processus de coagulation et de floculation. Une partie importante de ces solides non décantables peut être colloïdale. La surface des particules est chargée négativement, ce qui leur permet de se repousser les unes les autres et

les empêche de former des masses plus larges, appelées des floccs. Elles ne peuvent donc pas décanter.

La coagulation est la déstabilisation de ces colloïdes par la neutralisation des forces qui les tiennent séparées par addition d'un réactif chimique, le coagulant. Elle s'accomplit en général par l'adjonction de coagulants chimiques et par un apport d'énergie nécessaire. La floculation est l'agglomération de ces particules " déchargées " en micro floccs, puis en floccs volumineux et décantables, le flocc. Cette floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif : le flocculant ou adjuvant de floculation.

Les espèces colloïdales qu'on rencontre dans une eau brute ou une eau résiduaire comprennent de l'argile, de la silice, du fer et autres métaux lourds et des solides organiques tels que des détritits d'organismes morts. Elles ont une taille inférieure à 1 micron. D'après la loi de Stokes en régime laminaire, leur vitesse de décanation est très faible :

Remarque : régime laminaire =>  $V_o = \frac{g}{18 \mu} (P_s - P_f) d^2$  .....(2).

Avec  $V_o$  : vitesse de décanation de la particule

$\mu$ : viscosité dynamique

$P_s, P_f$  : masses volumiques de la particule et du fluide

$d$  : diamètre de la particule

$g$  : accélération due à la pesanteur ( $m/s^2$ ).

**Tableau II.1 : Exemples de décanation des matières colloïdales**

Diamètre du colloïde en mm	En micron ( $\mu$ )	Temps de décanation pour 1 m d'eau à 20°C	
10-4	0,1	2	ans
10-5	0,01	20	ans
10-6	0,001	200	ans

Les colloïdes sont donc des particules impossibles à décanter naturellement. Même si l'on a à faire à des particules pas franchement colloïdales, on peut utiliser une coagulation pour former des masses plus grosses qui décanent plus rapidement. En effet, lorsqu'une installation de traitement dispose d'un temps insuffisant de clarification pour éliminer les matières en suspension, la coagulation et la floculation permettent de dépasser les capacités de l'installation prévue au projet.

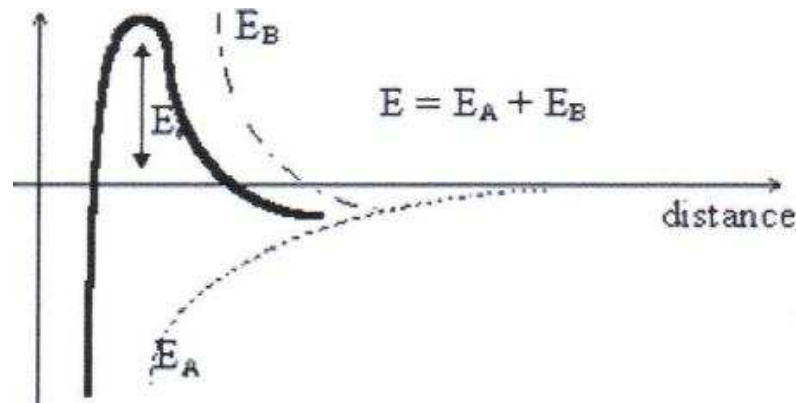
Les colloïdes sont soumis à deux grands types de forces :

- force d'attraction de Van der Waals liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu (EA, énergie correspondante)
- force de répulsion électrostatique liée aux charges superficielles des colloïdes (EB, énergie correspondante).

✓ L'énergie totale des colloïdes vaut alors :

$$E = E_A + E_B \dots \dots \dots (3).$$

Pour déstabiliser la suspension, il faut alors franchir la barrière énergétique  $E_S$ , c'est-à-dire diminuer les forces de répulsion électrostatique. C'est le rôle de la coagulation (**Rodier & coll, 2005**).



**Figure II.1. : Variation des énergies inter colloïdales ( $E_A$  et  $E_B$ ) en fonction de la distance des solutés lors de la coagulation.**

### c) Flottation

La flottation est un procédé de clarification et de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui utilise des bulles d'air auxquelles s'attachent les particules en suspension pour former un agglomérat (dont la densité est inférieure à celle du liquide qui la contient) entraînant dans leur mouvement ascensionnel les floes ainsi formés.

La séparation par flottation a été en premier lieu développée dans l'industrie minière, l'idée est ensuite venue d'appliquer ce procédé au traitement des eaux.

Le traitement physico-chimique peut avoir des avantages et des inconvénients suivants :

**Tableau II.2. : Avantages et inconvénients du traitement physico-chimique**

Avantages	Inconvénients
Réponse immédiate aux variations de charge	Plus grande quantité de boues produites ; Le coût élevé occasionné par les réactifs ;
Capacité des installations, meilleure intégration au site ; Bonne élimination de la pollution toxique ; Déphosphoration simultanée	Rendement d'épuration inférieur à l'épuration biologique ; Risque de coloration (sels de fer sur eaux

## II.4. Séparation des phases solides -liquide ou liquide-liquide par flottation

### II.4.1. Principe et mécanismes théoriques de la flottation

La flottation réalise la séparation des insolubles collectés à la surface libre de l'appareillage en utilisant la faculté de ceux-ci de se fixer à des bulles de gaz de faibles dimensions, ce qui leur confère une densité apparente plus légère que celle du milieu.

Nous rappellerons que les lois gouvernant la séparation des phases par flottation sont les mêmes que celles de la décantation.

Conformément à la formule de Stokes de la forme simplifiée :

$$V = Kd^2(P_s - P_l) \dots \dots \dots (4)$$

Où  $v$  : est la vitesse de séparation de la particule, du floc ou de l'agrégat par rapport à l'eau,

$d$  : le diamètre moyen de la particule.

$P_s$  et  $P_l$  : les masses volumiques de la particule et du liquide.

On pourra augmenter les performances de séparation des particules ultrafines et des colloïdes en jouant sur les deux paramètres.

**1** - Diamètre des particules de la même façon qu'en décantation en procédant à un conditionnement chimique préalable des effluents moyennant l'apport de produits coagulants et floculant.

**2** - Différence de densité : en effet, celle-ci dépend toujours de la nature de la particule à séparer, mais il est possible d'incorporer une certaine quantité d'air ou de gaz à cette particule ou au floc formé, de façon à provoquer une diminution de la masse volumique apparente de l'agglomérat ainsi constitué qui permettra à l'attelage "air-floc" de se séparer avec une vitesse ascensionnelle beaucoup plus élevée qu'en sédimentation.

Par ailleurs, indépendamment de l'existence de forces de liaisons au contact **bulles-particules** qui sont une condition nécessaire de la flottation, le fonctionnement d'une cellule (est lié à la probabilité de mise en contact des bulles et des particules à séparer.

Ceci explique l'importance, dans la conception d'un appareil de flottation, des choix des techniques qui permettent de maîtriser les paramètres qui régissent la dimension des bulles, l'homogénéité de répartition et la densité de leur flux.

En traitement d'eaux résiduaires par voie physico-chimique, les recherches effectuées par certains auteurs tels que Tomlinson et Fleming ont montré que les meilleures conditions de flottation sont obtenues avec des bulles dont le diamètre est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres. Ces considérations éliminent, dans les applications qui nous intéressent, les appareils dans lesquels les bulles sont obtenues par simple insufflation mécanique d'air, à travers divers modèles de bases ou de dispositif de dispersion.

**II.4.2. Dimension et vitesse des bulles**

- Equation de la vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz seule en régime laminaire : elle est donnée par l'équation de Stokes :

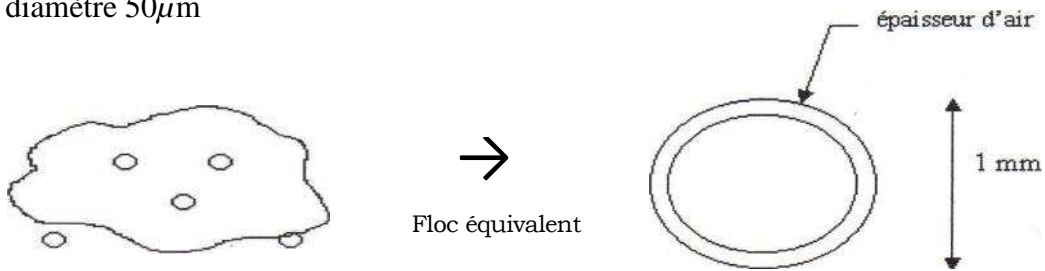
$$V = (g/18\mu) * (p_l - p_g) * d^2 \dots\dots\dots (5)$$

d : diamètre de la bulle ;  
 μ : viscosité dynamique  
 p<sub>l</sub> : masse volumique du liquide  
 p<sub>g</sub> : masse volumique du gaz.  
 g : accélération due à la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

- Equation de la vitesse ascensionnelle d'un attelage "particule bulle":

On raisonne par floc équivalent.

Floc : diamètre 1 mm  
 Bulles : diamètre 50μm



L'équation de Stokes est toujours valable avec d = diamètre de l'attelage " **particule-bulle** " p<sub>g</sub> remplacé par p<sub>s</sub> masse volumique de l'attelage.

**Remarque :** le facteur de forme de l'ensemble " particule-bulle " doit être pris en compte.

- Volume minimal de gaz pour assurer la flottation d'une particule :

$$V_g / S = (p_s - p_g) / ((p_l - p_g) * g) \dots\dots\dots (6)$$

V<sub>g</sub> : volume minimal de gaz  
 S : masse de la particule  
 P<sub>l</sub>: masse volumique du liquide  
 p<sub>g</sub> : masse volumique du gaz  
 p<sub>s</sub> : masse volumique de la particule.

### II.4.3. Technologie des procédés de flottation

La production des microbulles de dimensions homogènes (de 40 à 80  $\mu\text{m}$  de diamètre) ne peut être assurée actuellement que par deux systèmes de flottation dans lesquels la formation des bulles est fondée soit sur la technique de l'air dissous, soit sur la technique d'électroflottation.

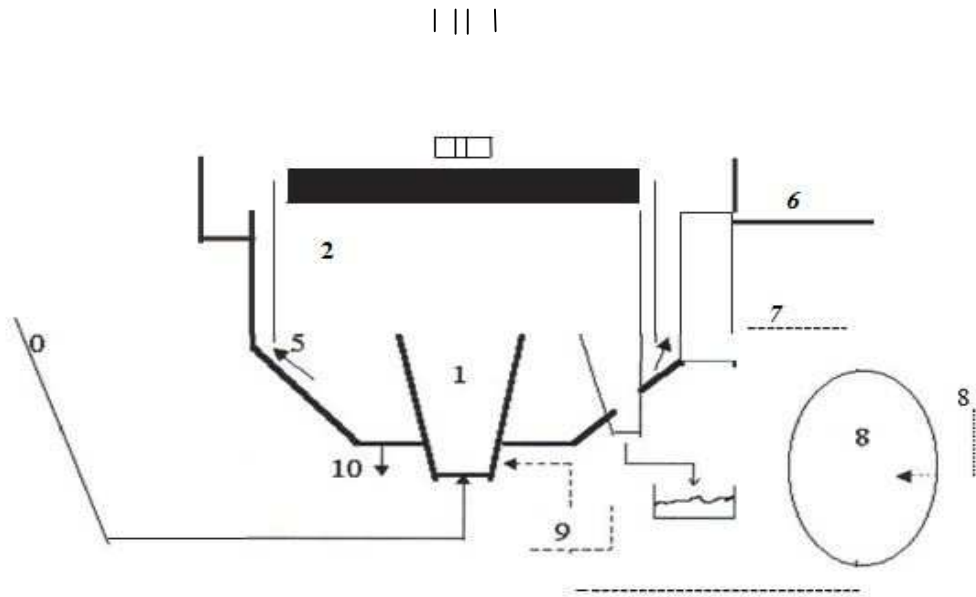
#### II.4.3.1. Flottation par air dissous ou aéroflottation

Dans la flottation par air dissous, on produit des microbulles au sein du liquide selon la technique de "pressurisation détente". Celle-ci consiste à saturer l'eau en air sous une pression de 3 à 6 bars et à détendre ensuite brutalement cette eau par retour à la pression atmosphérique pour provoquer l'apparition spontanée d'un véritable "lait de microbulles", qui, mélangé aux matières en suspension préalablement coagulées ou floculées, provoquera leur flottation.

Cette technique mise en œuvre dans les cellules de flottation selon **DEGREMONT** et **ERPAC** peut être pratiquée soit sur l'eau brute (pressurisation directe) de la totalité ou d'une fraction du débit, soit sur une partie de l'eau traitée recyclée (pressurisation indirecte).

#### ❖ Domaines d'applications

- Séparation de matières floculées en clarification d'eau de surface.
- Séparation et récupération des fibres des eaux de papeterie
- Séparation d'huiles floculées sur des eaux résiduaires de raffinerie, d'aéroport ou de métallurgie.
- Séparation d'hydroxydes métalliques ou de pigments en traitement d'eaux résiduaires industrielles.
- Épaississement et clarification des boues.
  - D'une manière générale, la FAD est utilisée pour la séparation des floccs car :
    - Si on utilisait des bulles plus grosses il faudrait un débit d'air plus important pour avoir une bonne répartition des bulles et ce débit plus important engendrerait des courants turbulents qui risqueraient de casser les floccs.
    - L'augmentation de la concentration en bulles favorise la probabilité de rencontre entre particules solides et bulles.
    - La faible vitesse ascensionnelle des bulles par rapport à la masse fluide permet une meilleure adhésion sur les floccs.



**Figure II.2: Schéma de principe d'épuration par flottation à air dissous**

- 0 : arrivée d'eau à traiter (éventuellement floculée au préalable)
- 1 : chambre de mélange
- 2 : zone de séparation entre l'eau et l'attelage bulle-particule
- 3 : système de raclage des boues formées
- 4 : goulotte de récupération des boues
- 5 : cloison siphonide où l'eau clarifiée est reprise
- 6 : évacuation de l'eau clarifiée
- 7 : pressurisation indirecte (prise d'eau traitée)
- 8 : ballon de pressurisation
- 8' : arrivée d'air sous pression
- 9 : détendeur (l'eau pressurisée et détendue avant son introduction dans la chambre de mélange)
- 10 : pour les grosses installations, un racleur de fond évacue les boues déposées (Merzouk, 2009).

Débit d'air utilisé L.m-3 d'eau	Taille des bulles	Puissance absorbée traitée Wh.m-3	Temps théorique de séjour mn
15 à 50	40 à 45 $\mu\text{m}$	40 à 80	20 à 40 (hors floculation)

### II.4.3.2. Electroflottation

La génération des bulles d'air se fait par électrolyse de l'eau au moyen d'électrodes alimentées en courant à basse tension (environ 10V). Les gaz produits sont en général H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, sur des électrodes qui sont en général inertes (graphite, acier inoxydable, titane, PbO<sub>2</sub> déposé sur du titane, etc.). Les dimensions des bulles sont très faibles (entre 20 et 40 µm). Les quantités des gaz peuvent être calculées d'après les équations habituelles de l'électrolyse.

Il n'est pas évident d'après les résultats d'ensemble de la littérature que l'électroflottation induise des effets spécifiques (nature du gaz constituant des bulles d'air, charge de bulles liées à leur formation sur l'électrode). La dimension très faible des bulles présente un intérêt particulier dans le traitement des effluents contenant de très fines particules. L'électroflottation consomme plus d'énergie que l'aéroflottation (de 100 à 400 Wh/m<sup>3</sup>) et peut être appliquée industriellement à des débits compris entre 1 et 100 m<sup>3</sup>/h (Maklouf & Araya-Farías, 1999).

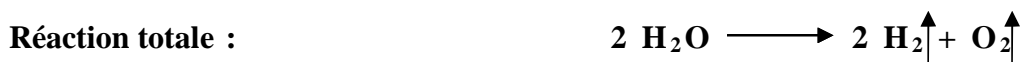
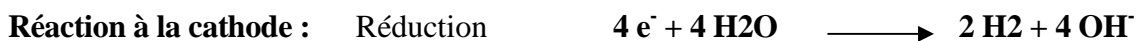


### III.1. Théorie

L'électroflottation (EF) est une technique de séparation solide/liquide basée sur la suspension des particules par les bulles générées lors de l'électrolyse de l'eau. Dans un milieu liquide, le courant permet l'électrolyse de l'eau et donc la génération de microbulles de gaz (hydrogène et oxygène). L'hydrogène et l'oxygène formés aux électrodes progressent vers la surface du liquide sous forme de bulles qui se fixent aux particules solides, entraînant celles-ci vers le haut. Ces particules peuvent ainsi former une nappe à la surface (floc), soutenue par les bulles de gaz, sous laquelle reste le liquide clair (**Krofta & Wang, 1985**).

Plus de 90% des combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'électroflottation.

Les réactions chimiques qui sont produites à la surface des électrodes pour générer les bulles de gaz sont les suivantes:



A partir de ces réactions, on peut constater que pour 4 électrons de courant qui passent entre les électrodes, une molécule d'oxygène et deux molécules d'hydrogène sont formées.

Le processus physique d'évolution des gaz peut être divisé en trois étapes: la nucléation, la croissance et le détachement. Les bulles se forment à la surface des électrodes à partir des solutions hautement sursaturées en gaz. Elles croissent ensuite par diffusion des gaz dissous vers la surface des bulles ou par coalescence à l'électrode avec d'autres bulles. Elles se détachent de l'électrode lorsque les forces de flottation dépassent celles des liaisons à l'électrode (**Khosla & al., 1991**).

IL a été proposé que l'interaction électrostatique entre les bulles et les doubles couches de l'électrode contrôle le diamètre de détachement des bulles (Brandon et al., 1985). La dimension des bulles formées à la surface des électrodes varie entre 22 et 50  $\mu\text{m}$  de diamètre selon les conditions expérimentales (**Ketkar & al, 1991**).

L'efficacité de la technique d'EF dépend du flux et de la dimension des microbulles qui sont générées pendant l'électrolyse de l'eau.

Plusieurs paramètres qui gouvernent la génération électrolytique et la dimension des bulles de gaz seront décrits dans les sections qui suivent (Makloul & Araya-Farías, 1999).

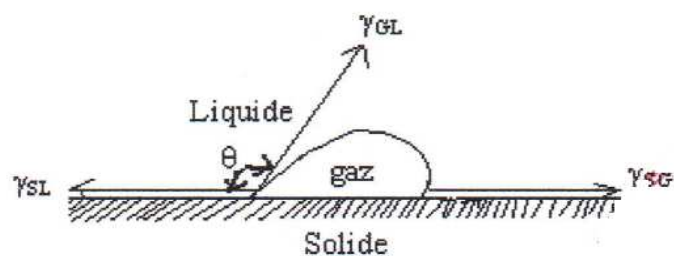
### III.2. Conditions nécessaires pour la flottation

La flottation est un procédé physico-chimique extrêmement complexe par le nombre important de paramètres qui peuvent influencer sa performance. Ces paramètres peuvent être classifiés de façon grossière selon leur nature physique ou chimique. Les bulles jouent un rôle crucial dans la séparation des solides de la phase liquide. Il apparaît évident que la taille des bulles est intimement liée au processus de séparation (Ahmed et Jameson, 1985). Cette taille est donc un des principaux paramètres physiques influençant l'efficacité de la flottation.

Pour assurer la flottation, il va falloir assurer les trois conditions suivantes :

- ✓ Formation des bulles gazeuses dans le milieu liquide en quantité suffisante. En général, l'efficacité de la flottation dépend de la quantité des bulles et de leur dispersité dans le milieu liquide.
- ✓ Assurer un contact bulle-particule suffisant de point de vue temps, durée de contact et celle de séjour des eaux dans l'installation.
- ✓ Assurer une forte liaison entre les particules et les bulles pour garder longtemps l'agrégat obtenu. Le temps d'existence de cet agrégat doit être supérieur à la somme du temps de flottation et du temps d'accumulation des agrégats à la surface du liquide. Cette liaison est habituellement améliorée par la présence dans l'eau à épurer de matières tensioactives, qui sont des polluants des eaux (savon naturel et artificiel, matières organiques de la nature des protéines, etc.).

L'efficacité de cette liaison est évaluée par la mesure de l'angle de mouillage  $\theta$  entre la bulle et la particule (fig.III.1).



**Figure.III.1: L'angle de mouillage entre la bulle et la particule**

$\gamma_{GS}$  : la tension superficielle de la particule solide ;

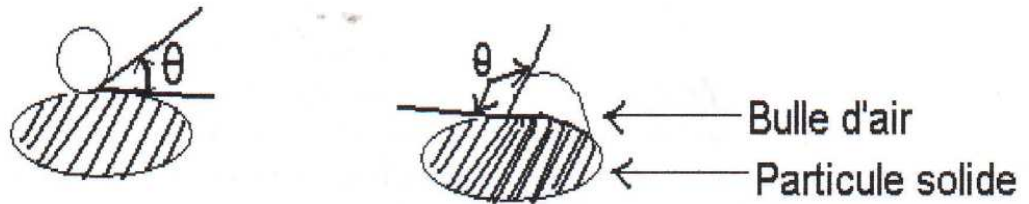
$\gamma_{GL}$  : la tension superficielle de l'eau ;

$\gamma_{SL}$  : la tension interfaciale liquide-solide.

- Si  $\Theta = 0^\circ$ , le mouillage de solide par le liquide est parfait, l'adhérence solide-gaz est impossible.
- Si  $\Theta = 180^\circ$ , le mouillage du solide par le liquide est nul, le contact solide-gaz est optimal. En fait, il s'agit d'un cas limite qui n'existe jamais dans la pratique. Car aucun liquide ne donne un angle  $\Theta$  plus grand que  $110^\circ$  (cas de mercure).

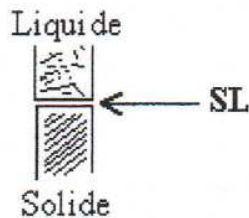
La valeur de l'angle  $\Theta$  montre l'hydrophobie ou l'hydrophilite des particules en suspension (**Chitour,1992**).

- Si  $\Theta > 90^\circ$ , les particules sont hydrophobes et flottent assez bien.
- Si  $\Theta < 90^\circ$ , les particules sont hydrophiles et flottent mal.



L'aptitude des bulles gazeuses à se fixer sur les particules solides est un phénomène lié aux actions communes des tensions superficielles prenant part à ce processus, ainsi que de l'hydrophobité des surfaces des particules. La notion de l'hydrophobie de la surface a une importance majeure dans la compréhension de phénomène élémentaire de la flottation, qui est le contact entre une bulle d'air et la surface d'un solide dans un liquide (voir figure III.1).

Lors de l'adhérence d'une bulle à un solide, la bulle déplace de l'eau .On passe donc de l'état initial (**Weiner,1975**) :

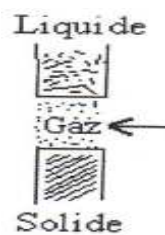


Il existe une interface SL et donc une énergie de mouillage

$$W_1 = w \cdot \gamma_{SL} \dots\dots\dots(7)$$

(avec w est la surface de contact).

à l'état final :



Où il existe deux interfaces et donc une nouvelle répartition de l'énergie de surface

$$W_2 = w \cdot \gamma_{LG} + w \cdot \gamma_{SG} \dots\dots\dots(8)$$

Lors de l'insertion de la bulle,  $W_1$  est une énergie potentielle qui disparaît et libérée, alors que  $W_2$  apparaît. La résultante vaut donc :

$$W_1 = W_1 - W_2 \dots\dots\dots (9)$$

et pour une surface unitaire ( $w=1$ ), il reste  $W_{SL} = \gamma_{LG} + \gamma_{SG} + \gamma_{SL}$  qui est l'équation de Dupré.

Nous cherchons à minimiser cette énergie.

Le critère de l'hydrophobie :  $\gamma_{SG} - \gamma_{SL} > \gamma_{LG}$

L'équation de Young-Dupré est :

$$W_{SL} = \gamma_{LG} (1 + \cos \Theta) \dots\dots\dots (10)$$

Nous remarquons que cette équation ne contient pas  $\Theta$ ,  $\gamma_{SG}$  et  $\gamma_{SL}$ , qui sont difficile à mesurer.

- Elle montre que  $W$  diminue si  $\gamma_{LG}$  diminue et  $\Theta$  augmente.

Des études ont montré que des bulles de diamètre assez faible peuvent faire flotter même les particules hydrophiles avec un angle  $\Theta = 1^\circ$  à  $2^\circ$  (**Merzouk, 2009**).

#### ❖ *Les colloïdes en solution*

Les colloïdes sont des particules organiques ou minérales dont la taille est comprise entre quelques nanomètres environ. Dans les effluents liquides, ils sont notamment responsables de la couleur et de la turbidité de l'eau de surface.

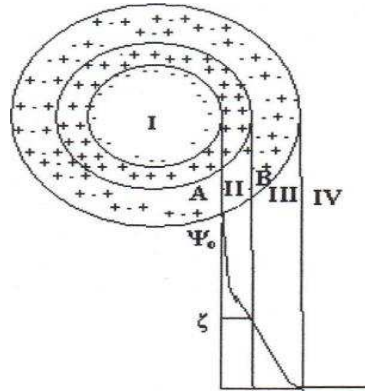
- ✓ On distingue deux catégories de colloïdes en fonction de leur affinité vis-à-vis de l'eau :
  - *Les colloïdes hydrophiles* dont les particules sont entourées par une enveloppe des molécules d'eau fixées à la matière solide par des liaisons physico-chimiques avec des groupements —OH, —NH<sub>2</sub>, —COOH, etc... totalement ou partiellement ionisées. C'est le cas de protéines, des détergents synthétiques, des savons... ; Ces colloïdes sont caractérisés par leur grande stabilité.
  - *Les colloïdes hydrophobes* qui n'ont aucune affinité pour l'eau et dont la stabilité est due à la charge électrique développée par des particules, qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération.

#### • *Etat de surface des colloïdes*

Les particules colloïdales ont une charge électrique de surface. Cette charge électrique superficielle est le plus souvent négative et est due à l'ionisation partielle d'un ou plusieurs groupements constituant les matières colloïdales. Il s'établit un équilibre physico-chimique entre les ions de surface et ceux contenus dans le liquide. Dans certains cas, la charge superficielle résulte de l'absorption préférentielle de certains ions (**Bechac & coll., 1984**).

La charge électrique superficielle détermine un potentiel Zêta de la phase solide. Son contact avec une solution électrolytique va engendrer des déplacements d'ions l'effet du champ de surface électrostatique. Autour de la particule va s'établir une distribution spatiale des ions dont l'équilibre résulte de l'action conjuguée des forces électrostatiques et des forces

thermiques.(Figure III.2).



**Figure.III.2: Modèle de la double couche pour une particule électro-négative dans une solution ionique aqueuse.**

- |                                          |                                          |
|------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>I</b> particule électro-négative      | <b>A</b> surface de la particule         |
| <b>II</b> couche rigide                  | <b>B</b> plan de glissement              |
| <b>III</b> solution en équilibre ionique | <b>Ψ<sub>0</sub></b> potentiel de Nernst |
| <b>ζ</b> potentiel Zêta                  |                                          |

Il est admis qu'au voisinage immédiat de la surface du solide, et en se déplaçant vers le liquide qui le baigne, on rencontre successivement :

- un plan dans le quel se trouvent les centres des anions absorbés. Ce plan est appelé plan intérieur d'Helmholtz et est constitué principalement d'ions déshydratés ;
- un plan sur le quel se trouvent localisés des cations maintenus au contact du plan intérieur par des forces électrostatiques. Ces ions sont hydratés et sont donc plus éloignés de la paroi du solide.

Entre la couche fixe (couche de Stern) et la phase liquide, il s'établit des transferts d'ions régis par les résultantes de forces contraires d'attraction et d'agitation thermique.

Cette zone de transfert constitue une aréole appelé couche diffuse (couche de Gouy). Dans cette couche, on rencontre des anions et des cations; la densité de la charge globale diminuant avec la distance par rapport à l'interface. Gouy a pu montrer que la décroissance du potentiel suivant une loi exponentielle.

Le modèle de la double couche ionique de Stern et Gouy permet d'établir une bonne description de la distribution des différents potentiels qui entourent la particule chargée. Parmi ceux-ci, le plus important est sans conteste, le potentiel électrochimique ou potentiel Zêta qui représente la (d.d.p) entre la surface qui sépare les couches fixes et diffuses du sein du liquide.

On peut assimiler la double couche à un condensateur dont les plateaux sont séparés par une distance égale à l'épaisseur de la couche diffuse et portés à un potentiel égal au potentiel Zêta qui détermine l'importance des forces répulsives inter particulaires et demeure d'un grand intérêt dans l'étude de la déstabilisation des particules en suspension et des colloïdes.

- **Déstabilisation des colloïdes**

Le principe fondamental de la déstabilisation des colloïdes réside dans la faculté de réduire, voir d'annuler, le potentiel Zêta des particules. Dans les eaux résiduaires urbaines, le potentiel Zêta est compris entre -15 et -50 mV. Il dépend de l'état de fraîcheur des effluents. Le principe de mesure de ce potentiel repose sur la mesure de la vitesse de déplacement d'une particule soumise à une (d.d.p) déterminée.

- **Contrôle du potentiel Zêta**

Pour mesurer la puissance de la charge de la particule, on utilise un Zétamètre. Cet appareil permet d'évaluer la charge des particules grâce à la mesure du potentiel Zêta qui régit la manière dont les colloïdes se déplacent et interagissent. En pratique, plus il est négatif, plus la charge de la particule s'intensifie (négativement). Ainsi, au fur et à mesure qu'il diminue en valeur absolue, les particules peuvent s'approcher les unes des autres plus étroitement, ce qui accroît la probabilité de collision.

Par additions des coagulants, qui fournissent des charges positives, le potentiel Zêta est diminué. En pratique, il n'est pas nécessaire d'annuler ce potentiel (coagulation), il suffit qu'il soit légèrement négatif. Il faut faire attention à ne pas trop ajouter de coagulant, car la surface de la particule va alors se trouver chargée positivement et les colloïdes vont se disperser à nouveau.

- **Choix des coagulants**

La neutralisation de la charge superficielle négative est réalisée par l'ajout des cations. Pour choisir les coagulants, il faut tenir compte de :

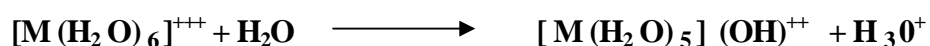
- sa valence ; la coagulation est d'autant plus efficace que la valence du cation est élevée (d'après la théorie, de Schulze Hardy, un ion trivalent est 10 fois efficace qu'un ion divalent) ;
- son innocuité (non nuisible) ;
- son coût.

Ainsi les sels d'aluminium III et de fer III sont largement utilisés. Les plus courants sont :

- les sulfates d'aluminium et de fer III :  $Al_2(SO_4)_3$  et  $Fe_2(SO_4)_3$
- les chlorures d'aluminium et de fer III :  $AlCl_3$  et  $FeCl_3$
- les mélanges de sulfates et chaux :  $M_2(SO_4)_3 + Ca(OH)_2$
- les produits mixtes  $Al^{3+}/Fe^{3+}$ .

La réaction de base lors de la mise en solution des coagulants minéraux est une hydrolyse qui modifie les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter (@H, conductivité..).

La réaction s'écrit



**M** : cation métallique (Merzouk, 2009).

### III.3. Formation du complexe "bulle-particule"

D'après la recherche bibliographique, deux principaux facteurs influencent considérablement sur le processus de la flottation (**Reay & Ratcliff, 1973, Dai & coll. ,2000**) .

- la probabilité de rencontre " bulle-particule" ;
- l'aptitude des bulles gazeuses à fixer sur les particules.

La probabilité de rencontre  $P$  " bulle-particule" dépend en général :  
Du nombre de bulles  $N$  rapporté à l'unité de volume du liquide à épurer ou par rapport à, l'unité de masse de Particule à éliminer.

Ce nombre est déterminé par :

$$N = K_n (1/d)^3 \dots\dots\dots (5)$$

Où :

$d$  : diamètre moyen des bulles ;

$K_n$  : coefficient de proportionnalité entre le nombre de bulles et le volume de gaz mis en œuvre dans la flottation.

- De la section de captage  $S$  de chaque bulle sur laquelle passe l'action réciproque d'accrochage entre la bulle et la particule pendant le processus de flottation. Elle est égale à :

$$S = K_s \cdot d^2 \dots\dots\dots (6)$$

Où:

$K_s$  : coefficient de proportionnalité entre le diamètre de la bulle et la section de captage.

- Du temps de séjour des bulles et des particules dans l'appareil de formation des agrégats.  
Il est fonction inverse de la vitesse de flottation des bulles.

$$T = K_z (1/d)^2 \dots\dots\dots (7)$$

Où:

$K_z$  : coefficient de proportionnalité entre la distance parcourue par les bulles et leur vitesse de flottation.

- De la turbulence qui règne dans le milieu liquide. Si celle-ci est constante et les conditions de la flottation sont stables, la probabilité de rencontre bulle-particule est une fonction des paramètres  $N$ ,  $S$ ,  $T$

$$P = N \cdot S \cdot T$$

Après transformation, on obtient :

$$(8) \quad P = K \left( \frac{1}{d} \right)^3$$

Avec :

$K = K_n \cdot K_s \cdot K_z$  est le coefficient de la flottation.

L'équation obtenue précédemment montre que la probabilité de rencontre entre la bulle et la

particule est inversement proportionnelle au diamètre des bulles. Plus elles sont fines, plus la probabilité est grande. L'augmentation de  $p$  peut être assuré par :

- Formation des bulles gazeuses aussi petites que possible.
- Formation de condition préalable de rencontre par l'augmentation de  $k$ .

La valeur de  $k$  est plus grande pour les particules hydrophobes, les particules huileuse, les produit pétroliers, les graisse et autre, sur les quelles est formé la couche de matières tensioactives toujours présentes dans les eaux à épurer.

### III.4. Les applications de l'électroflottation

Historiquement, l'électroflottation a trouvé des applications dans l'industrie minière pour la séparation de fines particules dans une solution (**Ahmed & Jamesson, 1985, Ketkar & coll, 1991**). Ensuite elle est appliquée dans le prétraitement de l'eau usée et dans les industries agroalimentaires. Dans la transformation des produits alimentaires, l'électroflottation a été appliqué principalement pour la clarification des jus de pomme et de raisins (**Kubritsky & al. 1988, Matov 1968, Malik & al. 1983,1984**). Mais, elle a été également employée dans le traitement des eaux usées (**Marti & al. 1994, Kiraly & al. 1982, Beck et al. 1974, Matov & al, 1965**).

Ce procédé est actuellement utilisé essentiellement pour l'épuration des effluents de l'industrie alimentaire, textile, métallurgie, galvanoplastie, usinage électrochimique, lisier des porcs... .

(**Shin & coll , 2001**) ont étudié expérimentalement les caractéristiques du traitement des eaux usées de bétail (porc) par électroflottation. D'une façon générale, cette eau est considérée comme une source de pollution des eaux souterraines et l'eutrophisation dans les lacs et les marais. Les objectifs de leur étude sont :

- de caractériser les particules dans l'eau usée et pour vérifier la validité du traitement par électroflottation ;
- de trouver la tension optimale d'opération d' électroflottation ;
- d'étudier l'efficacité de séparation de divers paramètres tels que : MES, PO<sub>4</sub>, P<sup>-</sup> DCO et la DBO<sub>5</sub>.

Les résultats trouvés sont les suivants :

- Les anodes émettent les ions d'AL<sup>3+</sup> (électrodes en aluminium) qui causent la neutralisation de la charge extérieure des particules (du potentiel Zêta négatif) dans l'eau. Les cathodes produisent simultanément du gaz H<sub>2</sub>, qui peut flotter les agrégats à la surface. Les particules de l'eau usée utilisée ont un diamètre moyen de 5,02 µm et un potentiel Zêta négatif de (-22 mV). Ceci signifie la validation de l'application de l'électroflottation.



- Pour trouver la tension optimale de fonctionnement de l'électroflottation, ils ont appliqué 24 , 36 et 48v. L'efficacité de réduction de la turbidité a été enregistrée à 48v dans un temps de 14 minutes.
- A 48v, L'efficacité de réduction pour différents paramètres était comme suit :

Type de pollution	Efficacité (%)
Turbidité	97,0
DBO5	40,6
DCO	70,1
Po <sub>4</sub> <sup>-</sup> et P	88,8
MES	91,3

**Kim & coll, (2001)**, ont constaté dans leur étude sur le traitement des effluents industriels le TiO<sub>2</sub>, ont constaté qu'avec une tension d'alimentation de 36 V, l'efficacité d'enlèvement de TiO<sub>2</sub> est de 94,5 %.

**K. A. Matis & A.1. Zouboulis (2000)**, ont constaté dans leur étude sur l'électroflottation d'une solution contenant les ions de cuivre, qui est un métal nuisible, que les paramètres :

- La concentration des ions à éliminer ;
- La concentration des additifs ;
- densité de courant ;
- Le pH de la solution ;

Ont une influence directe sur le procédé de réduction de la concentration des ions de cuivre.

Une étude a été faite par **K.A.Matis, (1980)** , sur le traitement des déchets liquides industriels par électroflottation. Cette étude avait pour but la détermination de l'effet de certains paramètres tels que le courant continu appliqué, le pH, le temps de traitement, la position des électrodes, l'utilisation de NaCl sur les performances de celle-ci.

Il a conclu que :

1-L'eau de mer est utilisée principalement comme un électrolyte pour les industries, et la valeur de pH est un facteur important dans cette méthode de traitement.

- ✓ Avec des électrodes horizontales, séparées par une membrane, on remarque qu'un seul gaz (H<sub>2</sub>) qui active le processus, tandis que l'autre agit comme un dépresseur ou contribue seulement dans le transfert des matières coagulantes.

On note également une économie dans l'électricité. A l'échelle industrielle, cet avantage peut être réalisé par l'effet de la différence de l'aire de surface des électrodes de travail.

**(Jung & Han, 2002)** ont trouvé dans leur étude sur l'enlèvement du cadmium et de la turbidité, après 20 minutes et sans aucun additif, que :

- ✓ L'efficacité de l'enlèvement du cadmium est de 100% ;
- ✓ L'efficacité de l'enlèvement de la turbidité est de 95,7%.

Ce procédé est actuellement utilisé essentiellement pour l'épuration des effluents de l'industrie agroalimentaire, textile, émulsions, métallurgie, galvanoplastie, usinage électrochimique, lisier des porcs, etc., mais également pour l'eau potable dans l'enlèvement du plomb, arsenic, nitrates, fluorure...(Mollah & coll., 2001, Mollah & coll., 2004, Holt et coll., 2005).

### III.5. Influences de certaines variables sur la taille des bulles

La flottation est un procédé physico-chimique extrêmement complexe par le nombre important de paramètres qui peuvent influencer sa performance. Ces paramètres peuvent être classifiés de façon grossière selon leur nature physique ou chimique. Les bulles jouent un rôle crucial dans la séparation des solides de la phase liquide. Il apparaît évident que la taille des bulles est intimement liée au processus de séparation (Ahmed & Jameson, 1985). Cette taille est donc un des principaux paramètres physique influençant l'efficacité de la flottation.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la taille des bulles générées par l'EF tel que la densité de courant, la température, le degré de rugosité de la surface de l'électrode, le matériau de l'électrode et le pH du milieu. (Hosny, 1996); Okun & Matov (1984) ont établi que l'efficacité du procédé d'EF dépend des paramètres suivants de la cathode: le diamètre du fil de la cathode, le pas de la grille et le degré de rugosité de la surface de l'électrode.

Burns & al, (1997) ont étudié les paramètres affectant la taille des bulles produites dans les processus d'électroflottation, de flottation par *air* dissous et de vaporisation électrostatique de l'air. Dans l'électroflottation, l'effet de la tension, du courant et de la force ionique sur la dimension des bulles de gaz produites a été étudié. Les résultats ont montré que le flux de gaz produit augmente en fonction de la tension et du courant. Le flux augmente aussi avec la force ionique du milieu aqueux. Cependant, aucun lien évident n'a pu être établi entre ces paramètres et la taille des bulles. Les résultats expérimentaux obtenus n'indiquent pas de tendances claires du diamètre des bulles en fonction de la densité de courant pour des valeurs faibles (4-21 mA/cm<sup>2</sup>).

Khosla et al. (1991) ont étudié l'effet de l'utilisation d'un courant pulsé sur la génération des bulles de gaz par l'électrolyse. Ils ont démontré que l'électrolyse à courant pulsé peut être utilisée pour ajuster la taille des bulles indépendamment de la densité de courant moyenne.

(Fukui & Yuu 1980) ont étudié la collection de particules microscopiques par électroflottation. Leurs résultats ont montré que le taux de flottation dépend fortement de la charge des particules et des bulles. Cependant, mesurer la charge de petites bulles de gaz est techniquement difficile et seuls quelques chercheurs ont mesuré le

potentiel zêta des bulles (**Collins & al, 1977**). Les résultats indiquent que le taux maximum de flottation est atteint quand le potentiel zêta des bulles et des particules est de signe opposé.

D'autres auteurs ont établi la présence de bulles d'hydrogène et d'oxygène de plus grande dimension dans les pH acides et dans les pH alcalins respectivement.

(**Brandon & Kelsall, 1985**) ont démontré que la taille de détachement des bulles d'hydrogène est élevée à bas pH et faible à haut pH, à l'opposé des bulles d'oxygène. Ils ont aussi démontré que les bulles sont chargées même dans des conditions sans surfactants, avec un point de charge neutre à un pH de 2-3. C'est dire qu'elles sont chargées négativement à un pH supérieur à 3 et positivement à un pH inférieur à 2.

De plus, le mouvement des bulles à l'intérieur de la cellule d'électroflottation est important pour le procédé. Leur trajectoire est affectée par l'hydrodynamique et la position des électrodes dans la cellule. Le succès de la flottation dépend de la présence d'un volume suffisant de bulles de gaz par rapport aux particules en suspension.

Cependant, un trop grand nombre de bulles peut amener à leur coalescence ou agrégation plutôt qu'à l'attachement aux particules (**Hosny, 1996**).

**Marrucci & Nicodemo**, ont travaillé avec l'azote dispersé à travers une plaque poreuse, la vitesse de gaz variant de 0,1 à 1,5 cm/s. Ces auteurs ont étudié l'influence de la concentration en électrolyte (non organique) sur la taille moyenne des bulles.

Ils ont constaté que la taille moyenne des bulles décroît lorsque la concentration augmente et atteint à une certaine concentration, plusieurs débits de gaz et pour une valeur asymptotique. Ceci a été vérifié pour différents électrolytes (KC1, KOH, KNO<sub>3</sub>, KI, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub>, K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, AlCl<sub>3</sub>...).

L'effet inhibiteur que présente un électrolyte est dû aux forces électriques de répulsion, générées par les potentialités de surface.

**Darme et Coll**, ont aussi constaté, dans une étude de bulles formées à l'aide d'une plaque poreuse, que la taille moyenne des bulles diminue, lorsque la concentration en électrolyte augmente. Ils pensent également qu'une forte concentration en électrolyte rigidifie l'interface gaz-liquide et réduit la coalescence.

(**Brandon & Kelsall, 1985**) ont de même montré qu'ils pouvaient éviter la coalescence des bulles ascendantes dans la colonne de flottation en ajoutant des électrolytes ou, de préférence des tensioactifs.

### III.6. Paramètres influençant le procédé

#### III.6.1. La nature des électrodes

Les électrodes doivent assurer une bonne circulation de l'effluent ou liquide à traiter à travers leur structure et donner une distribution harmonieuse du flux de bulles. La quantité de gaz produite (en général plusieurs millions de bulles par seconde et par  $\text{dm}^2$ ) est proportionnelle à l'intensité du courant, qui se situe habituellement à 100A par  $\text{m}^2$  de surface d'électrodes (**Gardais, 1990**).

Les deux types de structures d'électrodes les plus fréquentes sont:

- des grillages en métal déployé (pourcentage de vide de l'ordre de 75%),
- des plaques verticales parallèles disposées en peigne, quand on recherche une grande rigidité mécanique.

En ce qui concerne les matériaux pour la réalisation des cathodes et des anodes ils sont montrés dans le Tableau III.1

**Tableau III.I: Principaux matériaux employés pour la fabrication de la cathode et de l'anode**

Cathode	Anode
Hg, Pb, Cu, Ni Graphite ou autre forme de carbones traités Avec des produits organiques pour modifier la porosité, la densité et la résistance à la corrosion	Pt, Pt/Ti, Ir/Ti. Graphite ou autres formes de carbone (traités comme pour les cathodes) Pb en milieu d'acide sulfurique
Aciers Revêtements d'acier par Ni, Ni/Al, Ni/Zn	Revêtement de $\text{PbO}_2$ sur Ti ou Nb Nickel en milieu alcalin Revêtement du $\text{RuO}_2$ sur Ti, $\text{IrO}_2$ sur Ti
Fe	Magnétite $\text{Fe}_3 \text{O}_4$
Al	Fe
	Al

D'après **Gardais (1990)**.

Le principal objectif recherché dans la conception des électrodes est d'obtenir la plus grande surface d'échange possible dans le plus petit volume possible. D'autres paramètres peuvent intervenir tels que la tenue mécanique des électrodes dans les installations de grande dimension ou leur aptitude à subir un traitement mécanique de décolmatage ou de décarbonatation.

Les performances opérationnelles d'une installation dépendent essentiellement de la durée de vie et de l'entretien des électrodes. La nécessité de changer ou de démonter trop fréquemment les électrodes constitue donc la principale limitation à l'emploi d'une technique électrolytique. La faible durée de vie des électrodes est en effet le principal handicap de l'électroflottation: elle ne dépasse pas quelques centaines d'heures dans certaines applications. Les anodes sont très sensibles à la corrosion due essentiellement aux polluants présents dans l'effluent. Les cathodes subissent un entartrage par des dépôts de carbonates qui réduisent progressivement leur efficacité (**Gardais, 1990**).

Le second élément du choix économique est la consommation d'énergie, qui est également liée à l'architecture et à la constitution des électrodes. À part l'énergie électrique consommée, le coût du changement et du nettoyage périodique des électrodes est en effet l'élément principal du prix de revient d'une électrolyse.

L'énergie mise en jeu dans une électrolyse pour obtenir une réaction donnée avec une électrode déterminée est toujours supérieure à celle que donne le simple calcul thermodynamique. La tension aux bornes d'une cellule d'électrolyse est en effet la somme de trois termes:

- La tension théorique réversible de la réaction d'oxydoréduction: correspondant à l'énergie de liaison des éléments du corps à décomposer, cette tension constitue un seuil absolu au-dessous duquel rien ne peut se produire.
- La chute ohmique dans l'électrolyte directement liée à sa conductivité: cette chute peut être diminuée en rapprochant les électrodes.
- La surtension de transfert (ou d'activation), qui exprime les limitations cinétiques d'une réaction à l'électrode: elle représente le travail nécessaire pour extraire les électrons de la surface de l'électrode; pour un électrolyte déterminé, elle dépend de la nature de l'électrode et de son état de surface.

Le dernier terme est un facteur déterminant dans l'appréciation des performances d'une électrode. L'efficacité d'un procédé électrolytique dépend principalement de ce facteur.

Il justifie l'importance accordée aux recherches entreprises pour réaliser, de la façon la plus économique possible, des électrodes plus performantes. Ces recherches portent à la fois sur l'architecture des électrodes et sur leur constitution (**Gardais, 1990**).

### **III.6.2. Densité de courant appliquée**

L'efficacité de procédé dépend fortement de la densité de courant appliqué aux électrodes. Tout d'abord, comme pour une coagulation normale, il existe une quantité optimale d'agent de coagulation à ajouter, non seulement parce qu'un ajout trop important entraîne un surcoût pour le procédé (**Ogutveren & coll, 1994**) mais aussi

parce qu'une forte concentration en agent de coagulation déstabilise les floes formés et diminue ainsi l'efficacité du procédé (**Abuzaid & coll.,1998; Szynekarcut & coll 1994**). En effet si trop de cations sont libérés, alors les complexes cations-colloïdes deviennent globalement chargés positivement, d'où la réapparition de répulsions électrostatiques.

La taille des bulles formées est directement dépendante de la densité de courant appliquée aux électrodes. Il faut donc appliquer un courant assez fort pour qu'il y ait formation d'une quantité de gaz suffisante pour permettre la flottation, mais ce courant doit être limité pour que les bulles formées n'aient pas un diamètre trop important (**Hosny, 1996**).

En prenant tout ces exemples en compte, il apparaît que en fonction des effluents à traiter, la valeur de la densité de courant varie entre 10 et 30 mA/cm<sup>2</sup> (**KolesniKov et Kudryatsev, 1995, Hosny, 1996, Poon, 1997, Bariou et coll., 1998**) avec une valeur moyenne aux alentours de 20 mA/cm<sup>2</sup>. A noter que si l'on utilise deux étages d'électroflottation, il peut être utile d'avoir dans le premier étage une densité de courant supérieure à 20 mA/cm<sup>2</sup> afin d'engendrer des turbulences, puis dans l'autre étage d'avoir une densité de courant plus faible à fin de faciliter la séparation (**Neeno,1994**).

### III.6.3 Temps de séjour

Au niveau de temps de séjour, l'électroflottation en elle-même peut être courte, le temps de contact doit être compris entre 5 et 40 minutes afin que la séparation soit effective, 5 minutes étant la valeur la plus souvent observée (**Poon 1997, Alexandrova & coll., 1994**).

### III.6.4. PH de la solution

Dans le cas de l'électroflottation avec des anodes solubles, le pH doit généralement se situer au minimum de solubilité des hydroxydes pour améliorer l'efficacité du procédé. Habituellement, le pH est ajusté à des valeurs voisines de 8 à 8,5 ( **Szynekarcut & coll 1994 , Debilement, 1996**). Pour une électroflottation avec des anodes inertes (insolubles), au contraire, un pH acide est préconisé (pH = 3 à 4), la formation de H<sub>2</sub> étant favorisée dans cette gamme de pH (**Burns & coll., 1997**).

### III.6.5. Salinité

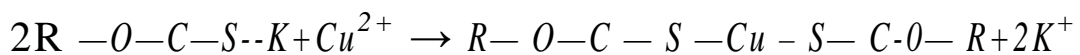
A fin de diminuer la résistivité de l'effluent à traiter et ainsi diminuer la consommation énergétique pour une même production d'agent de coagulation, il peut être souhaitable d'ajouter un électrolyte type NaCl. La quantité de sel ajoutée varie selon les publications entre 5 et 30 g/l (**Ogutveren & coll, 1994, Poon 1997, Wilcock &coll., 1996**). Cependant, l'amélioration des résultats dépendant peu de la quantité ajoutée, un ajout de 5 g/l semble suffisant pour avoir un traitement de bonne

qualité (**Abuzaid & coll., 1998**). A noter que cet ajout doit être plus important si on désire effectuer en plus une désinfection par formation d'hypochlorite situ (**Hernien & Tsai, 2000**).

### III.6.6. Autres ajouts de produits chimiques

Dans le cas d'une électroflottation seule, il peut être nécessaire d'ajouter certains produits à fin de faciliter la séparation de l'eau et du polluant. Tout d'abord, il est possible d'ajouter un réactif qui rendrait les espèces solubles insolubles. C'est le cas par exemple de l'utilisation des xanthates qui réagissent avec certains métaux,

comme le cuivre suivant la réaction (**Alexandrova & coll., 1994**) :



La molécule obtenue, très hydrophobe, est facilement séparable de l'eau. Cependant, il faut veiller à ce que la chaîne carbonée R ne soit trop longue pour éviter que la molécule de xanthate ne se sépare de l'eau avant même de réagir (**Alexandrova & coll., 1994**). C'est pourquoi l'éthyle xanthate de potassium généralement choisie. Stoechiométriquement, il faut 4,94 mg d'éthyle xanthate de potassium pour traiter 1 mg de cuivre (**Kaisheva & coll., 1996**). Cependant, des phénomènes plus complexes d'adsorption des ions sur les produits ainsi formés diminuent la quantité de produit à mettre en œuvre. Cette quantité varie de 10 à 80 % de la quantité stœchiométrique, ceci étant déterminé par des essais sur l'effluent à traiter (**Hosny, 1996, Alexandrova & coll., 1994, Kaisheva & coll., 1996**). A noter que dans le cas d'une utilisation de xanthate, il faudra trouver un compromis pour la valeur de pH. En effet, les xanthates perdent leur réactivité à pH trop acide, ce qui augmente la quantité à mettre en œuvre. (**Hosny, 1996**).

### III.7. Technologie de conception d'une cellule d'électroflottation

Une unité de traitement par électroflottation occupe une surface de l'ordre de 0,15 à 0,25 m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup>/h de la solution traitée. La surface exacte de la cellule dépend de la nature de l'effluent à traiter ou plus précisément, de la vitesse ascensionnelle des particules à récupérer pour un débit donné. Par exemple, si l'expérimentation indique une vitesse ascensionnelle de 6 m/h pour un débit de 6 m<sup>3</sup>/h, le traitement par électroflottation exigera une cellule de 1 m<sup>2</sup> (**Gardais, 1990**). Le temps de résidence dans la cellule d'EF dépend du niveau de contamination du liquide traité et de l'utilisation ou non d'agents clarifiants. L'énergie requise dépend de la concentration de l'effluent en matières en suspension et de la densité de charge du contaminant (**Ramirez et al., 1976**). La consommation d'électricité se situe généralement entre 50 et 400 Wh par m<sup>3</sup> traité.

Quand la quantité de matières en suspension dépasse 2 g/l, la consommation d'électricité est de l'ordre de 10 Wh par kg de matières en suspension extraites.

### III.8. Avantages de l'électroflottation

En général, l'EF a trois avantages principaux qui la différencient des autres techniques de flottation:

- Des bulles très fines et dispersées avec un diamètre moyen de 201,1M. Cela augmente la surface de contact entre les particules en suspension et les bulles. De plus, les bulles formées sont uniformes.
- En variant la densité de courant, il est possible de créer n'importe quelle concentration de bulles dans le milieu de flottation, augmentant ainsi la probabilité de collision entre les bulles et les particules.
- Le choix de conditions de solution et d'une surface d'électrode appropriée permet d'obtenir des résultats de séparation optimaux (**Khosla et al, 1991 ; Hosny, 1992**).

Les autres avantages de l'EF incluent des coûts de démarrage et d'opération compétitifs, la capacité d'adaptation à des variations de débits, un faible temps de résidence, simplicité de l'installation et moindre encombrement, technique autorisant une automatisation poussée, un haut taux d'élimination de la DBO (Demande Biochimique d'Oxygène) due à l'oxydation des molécules organiques à l'anode et aussi à l'élimination des graisses et huiles. De plus, la montée des floes à la surface donne une écume contenant de 9 à 12% de solides (**Beck & al, 1974; Gardais, 1990**).

### III.9. Domaine d'application

L'EF s'intègre facilement dans les ensembles de traitements électrolytiques notamment avec des techniques telles que l'électrocoagulation, elle permet en particulier de récupérer les métaux lourds présents dans les effluents de rinçage de pièces qui ont subi des traitements électrochimiques. L'EF a été utilisée notamment dans l'industrie des transports (automobile, véhicules industriels, aéronautique et chemins de fer) ou elle est employée pour traiter les effluents des ateliers d'assemblage et des unités de réparation/maintenance (**Gardais, 1990**). L'EF est une méthode de flottation qui a aussi été utilisée dans l'industrie minière pour la séparation de fines particules dans une solution (**Ahmed & Jameson., 1985; Ketkar & al.1991**).

Le traitement des eaux usées et la récupération des huiles et des protéines, ont été les principales applications de l'électroflottation dans l'industrie alimentaire. **Haba et Szoplik (1992)** ont appliqué l'électroflottation pour le traitement des effluents de l'industrie de transformation du poisson. Ils ont établi que pour une électroflottation efficace, les effluents devaient être préalablement coagulés avec du sulfate d'aluminium et un polyacrylamide modifié (Rokrysol WF-2). Les deux procédés, coagulation et électroflottation des effluents, sont grandement influencés par l'ajustement du pH. L'électroflottation a aussi été utilisée pour l'épuration des effluents de l'industrie laitière (**Pasternak & Piotrowski, 1982**).

**Hosny (1992, 1996)** a étudié la séparation de l'huile d'émulsions huile-eau par électroflottation. L'effet des paramètres opérationnels comme le courant, la concentration initiale d'huile, le temps de flottation, l'effet de synergie du NaCl et les concentrations d'agents flocculants sur la performance de la cellule d'électroflottation a été étudiée. Les électrodes sont une anode de plomb et une grille en acier inoxydable comme cathode. Le taux de séparation a atteint



65% dans des conditions optimales (1,2 A), et 75% en présence de NaCl (3.5% de la solution en poids) et 92% en présence de NaCl avec une concentration optimale d'agents flocculant (16 mg/l) (**Hosny, 1996**).

## IV.1. Introduction

Après la mise en évidence des paramètres qui peuvent influencer l'électroflottation et en se basant sur les conditions expérimentales ayant fait preuve dans le domaine de traitement avec l'électroflottation, nous avons effectué une série d'expériences sur des échantillons d'eaux usées prélevées provenant de l'industrie pétrolière SONATRACH -RTC-BEJAIA. Ces expériences consistent à mettre l'effluent dans un électroflottateur à batch à où se déroule la clarification d'eau tout en effectuant les analyses des paramètres de pollution avant et après électroflottation.

## IV.2. Le But et objectif du travail

En se servant des conditions optimales qui sont la tension appliquée, les écarts entre les électrodes déjà déterminés antérieurement en régime continu et à la lumière des résultats obtenus et dans le but d'orienter notre étude à l'échelle industrielle, nous avons appliqué le procédé d'électroflottation en régime discontinu pour le traitement des effluents provenant de l'industrie pétrolière (SONATRACH-RTC de BEJAIA).

L'objectif de notre travail est de :

- Concevoir et évaluer le fonctionnement et la performance d'un prototype d'une cellule d'électroflottation en régime discontinu;
- Mettre en évidence les valeurs optimales des paramètres (densité de courant, tension appliquées aux électrodes, temps de séjour... ) du procédé;
- Déterminer l'efficacité de traitement optimale de tension en analysant la réduction de la concentration de la DCO des eaux usées.

## IV.3. Matériels et méthodes

Nos expériences ont été réalisées au sein du Laboratoire Biophysique , Biochimique ,et Biomathématique et Scientométrie (L3BS) et le laboratoire de la technologie des sciences alimentaires de l'université A-Mira de Bejaia .

❖ Appareils utilisés pour l'analyse de l'échantillon et les mesures :

L'analyse de la densité optique( DO) s'est faite avec un spectroscan 50/UV visible et celui de la conductivité par un EC215 conductivité meter et le PH a été mesuré par un micro processor Instruments HANNA PH 211, l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) par un OXI 730 , la DCO par un spectroscan 50/UV visible Spectrophotomètre. Les consommables (solution à traiter et les plaques des aluminiums).

### IV.3.1. Unité d'électroflottation:

Ces expériences ont été réalisées dans une installation comprenant un récipient en verre de dimension (26+20+5) cm, dans lequel se trouvent deux électrodes en aluminium (3cm + 2cm + 0,01) installées au milieu du récipient et placées verticalement, alimentées par un courant discontinu à l'aide d'un générateur fournissant une tension entre 0 et 30 volt et une intensité de 0 à 10 A (schéma ci après). La surface des électrodes est similaire et est égale à 6 cm<sup>2</sup> toutes en aluminium. Les traitements sont faits en ravitaillant la cellule de l'eau polluée manuellement. Au moment de la prise de l'échantillon traité, on a utilisé des aiguilles achetées en pharmacie pour l'aspirer à l'intérieur et le transvaser aussitôt dans un bocal en plastique, qu'on recouvre aussitôt de par du papier en aluminium pour les éventuelles mesures.

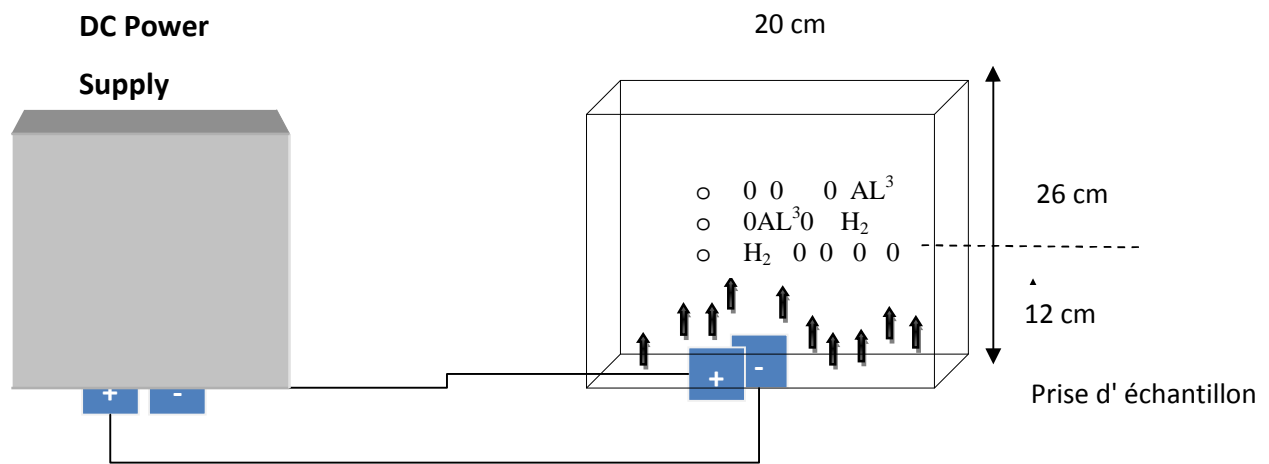


Figure. IV.1: Schéma d'un électroflottateur en Batch (régime discontinu)

- Electrodes en aluminium fixés au fond du Récipient
- Surface de la flottation en sa partie supérieure

### IV.3.2. Détermination des paramètres de la pollution

#### ❖ Mesure de la Turbidité

La turbidité d'une eau est due à la présence des matières en suspension finement divisées (argiles, limons, matières organiques...); elle peut aussi faire allusion à la mesure de densité optique (D.O) d'une eau polluée. Pour effectuer la lecture de l'échantillon, placer l'échantillon préparé dans le puits de mesure. Pour de meilleurs résultats, orienter la cuvette d'échantillon de façon constante pour chaque mesure. Placer le capot de l'appareil (pare-lumière) sur la cuvette d'échantillon et presser la touche RED. Après une courte pause, les résultats sont affichés. On trouve les valeurs en unité (FAU)

FAU: (Formazine Atténuation Unit) mesure la lumière transmise.

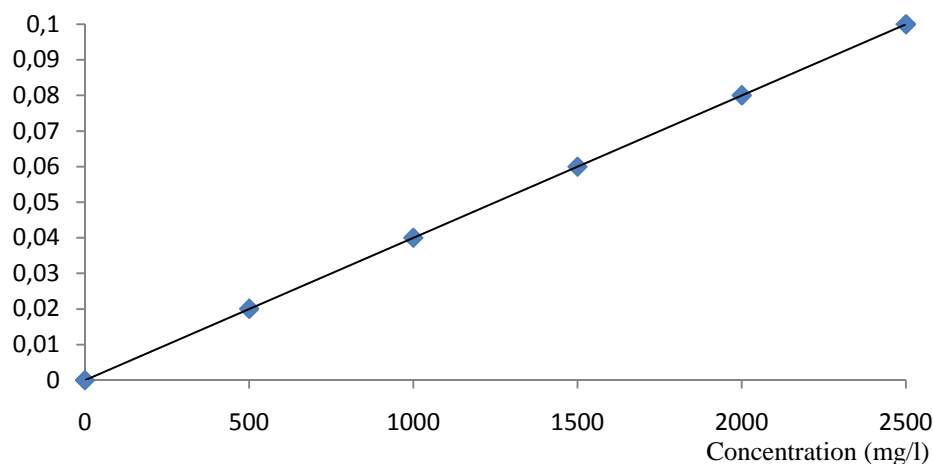
### ❖ Mesure de la DCO

La demande chimique en oxygène D.C.O est un des paramètres spécifiques que l'on utilise pour déterminer la concentration des polluants principaux. C'est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires spécifiques.

La D.C.O est une oxydation par un excès connu de dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en milieu acide ( $H_2SO_4$ ) et à l'ébullition, des matières oxydables contenus dans l'eau dans les conditions de l'essai, en présence de sulfate d'argent ( $Ag_2SO_4$ ) et de nitrate d'argent.

#### Mode opératoire :

- Introduire dans un tube à essai 5 ml d'échantillon.
- Ajouter 0.2 g de sulfate de mercure puis filtrer.
- Ajouter 2.5 ml de la solution de dichromate de potassium à 0.04 mol/l et 7.5 ml de la solution. Sulfurique de sulfate d'argent.
- Agiter par un mouvement circulaire en refroidissant sous un courant d'eau froide.
- Porter à 150°C pendant 2 heures dans un bain marie.
- Après refroidissement , l' analyse des échantillons se fait par spectrophotomètre à  $\lambda = 620$  nm.
- Un essai à blanc est réalisé avec de l'eau distillée afin d'établir la courbe d'échantillonnage, nous avons préparé une série de solutions à différentes concentrations en glucose (1000,1500, 2000 mg/ml) ensuite, nous avons insérer les absorbances de chaque solution à la longueur d'onde d'absorption maximale  $\lambda = 620$  nm.



**Figure. IV.2: Courbe d'étalonnage de la DCO**

#### **IV.4. Présentation de l'entreprise << SONATRACH >>**

Dès sa naissance, la SONATRACH avait pour mission de prendre en charge le transport et la commercialisation du pétrole et du condensât.

SONATRACH est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 12ème parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2ème exportateur de GNL et de GPL et 5ème exportateur de gaz naturel. Sa Production globale (tous produits confondus) est de 222 millions de tep en 2004. Ses activités constituent environ 30% du PNB de l'Algérie. Elle emploie 120 000 personnes dans l'ensemble du Groupe.(voir annexe2)

##### **IV.4.1. Enquête concernant la direction régionale de Bejaia SONATRACH RTC**

###### **A) Aperçu sur la direction régionale de Bejaïa (D.R.G.B)**

La direction régionale de Bejaïa est une direction parmi les 7 directions opérationnelles composant l'activité de transport par canalisation avec les régions d'ARZEW, SKIKDA, HAUD ELHAMRA, GPDF, et GME ces deux derniers sont 2 gazoducs traversant l'Italie et l'Espagne. La vocation de la DRGB est le transport des hydrocarbures par canalisation, stockage et chargement des navires. Le terminal marin de Bejaïa est divisé en deux parties (voir annexe 2),

ce sont :

Terminal Nord

Terminal Sud

#### **IV.4.2. Origine et composition des eaux résiduaires:**

Ce sont des eaux de gisement très salées renfermant des traces d'huiles et autres impuretés solides. Après décantation et jaugeage, les huiles sont récupérées dans des bacs et les eaux en suspensions sont drainées vers des séparateurs qui se trouvent aux pieds des bacs de stockage et se rejettent par le canal périphérique pour rejoindre le réseau communal qui va vers la STEP.

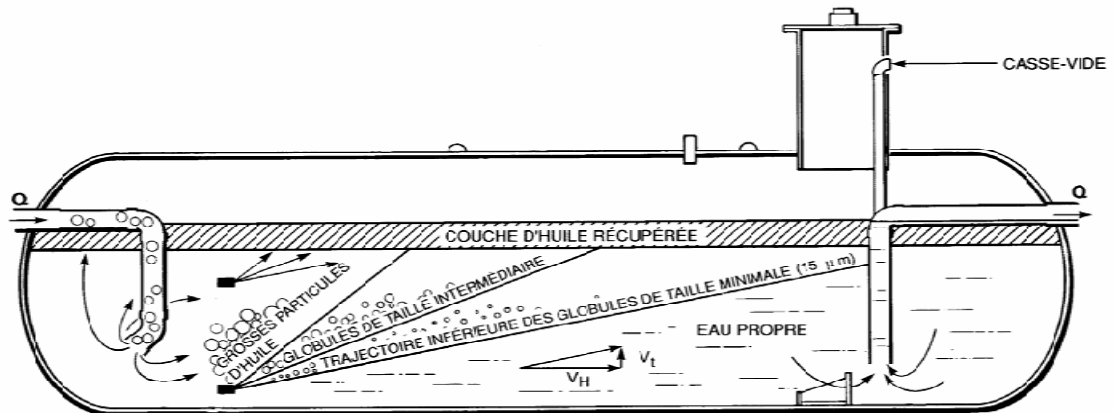


**Figure IV.3: Les bacs de la DRGB**

#### **IV.4.3. Description des séparateurs d'huile-eau**

La direction régionale de Bejaia ne possédant pas une station de traitement des eaux usées donc elles sont destinées vers des réseaux communaux par contre elles subissent un traitement primaire par décantation et de déshuilage au niveau des séparateurs.

Le rôle d'un séparateur par gravité est d'intercepter, dans les eaux usées, les huiles ou les hydrocarbures qui ne sont ni solubles dans l'eau, ni présents sous forme d'émulsion.



**Figure. IV.4. schéma d'un séparateur d'huile-eau par gravitation O.W.S 1.00, Séparateur d'huile et d'eau par gravité, Description technique, 15 juin1989.**

#### *Théorie de base:*

Il y a plus de trente ans, l'American Petroleum Institute (API) a établi des normes très précises pour le calcul et le dimensionnement des séparateurs gravitaires dans l'industrie pétrolière. Les normes établies par l'API sont, encore aujourd'hui, reconnues par l'industrie et reposent sur des données réelles et sur des principes scientifiques fondamentaux (loi de Stokes).

La théorie de la séparation eau-huile est basée sur le fait que, dans un séparateur idéal où l'on suppose qu'il n'y a ni turbulence ni court-circuit, toutes les gouttelettes d'huile atteindront la surface si leur vitesse ascensionnelle ( $v$ ) est égale ou supérieure à la profondeur de l'eau ( $d$ ) divisée par

temps de rétention ( $T$ )

$$V_t = d/T$$

$V_t$  = vitesse ascensionnelle des gouttelettes d'huile (cm/s);

$d$  = profondeur d'eau (cm);

$T$  = temps de rétention (s).

#### **IV.4.4. Prise de l'échantillon**

L'échantillon utilisé est prélevé en aval des séparateurs d'huiles-eaux de modèle API qui sont fixés au pied des bacs de stockages à différents niveaux du terminal ,marin nord de Bejaia. Les caractéristiques de l'échantillon avant le traitement sont les suivants (le PH initiale moyenne = 7,8 conductivité initiale moyenne  $\kappa = 1,5$  ms/cm, DC0 initiale moyenne = 2000 mg  $O_2/L$  à  $\lambda = 620$  nm).

#### IV.4.5. Traitement d'électroflottation

Dans une première étape, le traitement d'électroflottation est effectué à une densité de courant partant de  $12 \text{ mA/cm}^2$  pendant un temps de séjour  $T = 15$  minutes et à des différentes tensions  $U$  appliquées variant entre 15, 20 à 25 V. La distance entre les électrodes est fixée à une distance  $D = 1 \text{ cm}$ .

Durant le processus de traitement, nous avons prélevé l'échantillon de l'eau épurée et ensuite on a procédé à l'analyse des paramètres de pollution qui sont décrits précédemment.

Les résultats des analyses effectuées avant et après traitement d'électroflottation sont reportés dans le tableau suivant :

**Tableau .IV.5: Résultats des paramètres de pollution caractéristique moyenne avant et après traitement par électroflottation de l'échantillon utilisé**

Concentration Paramètres Optimisés	PH moyenne Avant	PH moyenne Après	D.O Moyenne Avant (UA)	DO Moyenne Après (UA)	DCO Moyenne Avant ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ )	DCO Moyenne Après ( $\text{mgO}_2/$ )	Efficacité de réduction de la DCO (%)
<b>1 cm U15</b>	7,8	7,9	0,0830	0,035	2000	736	63,2
<b>1 cm U20</b>	7,8	8,1	0,0830	0,027	2000	608	69,6
<b>1 cm U25</b>	7,8	8,3	0,0830	0,018	2000	482	76



## IV.5. Interprétation des résultats et discussion

La figure nous montre l'efficacité de réduction pour une concentration moyenne initiale de la DCO à des variations de tensions différentes. L'efficacité de séparation de l'eau contaminée d'huile et d'hydrocarbure a été très efficace après 15 minutes d'électroflottation.

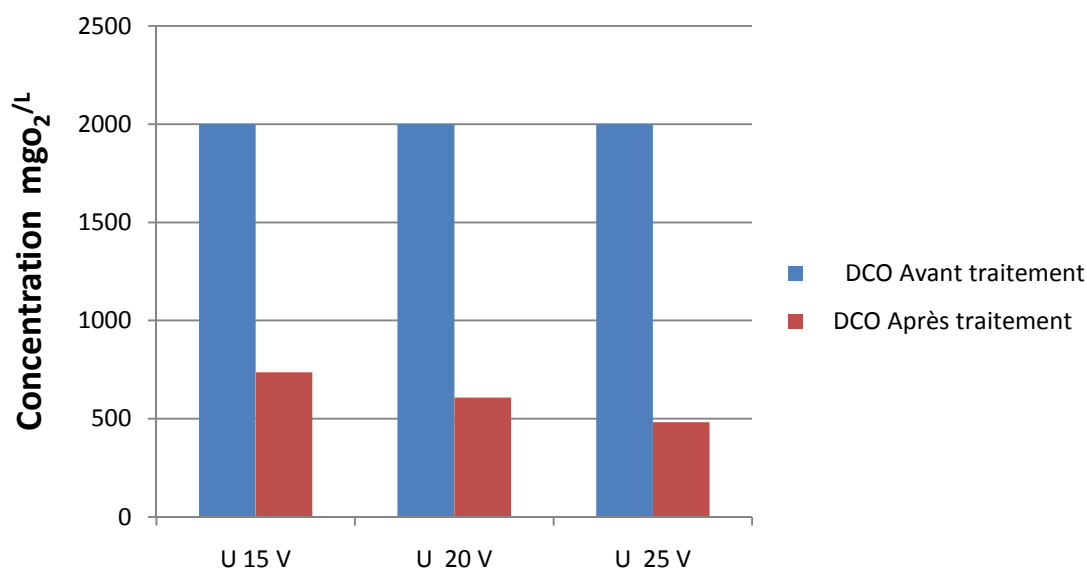
Pour une tension  $U$  appliquée à 15 V, la concentration de la DCO est réduite de 2000 mgO<sub>2</sub>/L à 736 mgO<sub>2</sub>/L à une distance d'électrode fixée à 10 mm avec une efficacité de l'enlèvement de 63,2%.

Pour une même concentration moyenne de DCO l'efficacité de sa réduction a été de 2000 mgO<sub>2</sub>/L à 608 mgO<sub>2</sub>/L après le traitement d'électroflottation à une tension de 20 V, l'efficacité de réduction de la DCO a été obtenue à 69,6 % respectivement.

La concentration moyenne de la DCO a été réduite de 2000 mgO<sub>2</sub>/L à 482 mgO<sub>2</sub>/L à une distance entre les électrodes fixées à 1cm à pour une tension de 25V, l'efficacité d'enlèvement de la DCO a atteint 75,9% respectivement.

L'efficacité optimale de la diminution de la DCO est trouvée 76 % à 25 V pendant un temps de 15minutes sous l'effet d'une densité de courant  $j= 12 \text{ mA/cm}^2$  respectivement. Il est à noter que l'incident sur le pH est négligeable. Nous avons aussi constaté un entartrage de la cathode et une corrosion au niveau de l'anode.

Comme Vu dans la figure, la DCO a diminuée dans l'effluent à 15 à 20 et à 25V, cette diminution est proportionnelle à la diminution de la tension pour un même écart entre les électrodes fixées. La variation de la tension dans la cellule d'électroflottation a eu un effet sur la quantité de bulles générées et qui reste sans effet sur leur dimension, La production du flux de bulles à différentes tensions peut influencer sur la quantité des flocs Al(OH)<sub>3</sub> formés dans la cellule d'électroflottation sont capables d'absorber des polluants organiques solubles. Comme la charge de la tension augmente, la quantité des flocs Al(OH)<sub>3</sub> a pu augmenter, et donc les polluants organiques les plus solubles ont été enlevés(voir figure .IV.5.).



**Figure. IV.5: Variation de l'efficacité d'enlèvement de la DCO sous l'effet de l'optimisation de la tension**

L'efficacité de flottation est attribuée à la génération des bulles uniformes et minuscules. Il est bien connu que l'efficacité de séparation d'un processus de flottation dépend fortement de la taille des bulles. Les petites bulles fournissent la plus grande superficie pour l'attachement des particules.

L'efficacité de flottation obtenue est aussi attribuée à la dispersion rapide des petites bulles produites dans le flux d'eaux usées. La dispersion rapide des bulles est aussi importante que la génération des bulles est aussi importante que la génération des bulles minuscules.

Pour un système d'électrode conventionnel; seulement la cathode d'écran supérieure fait face aux flux d'eaux usées, tandis que l'anode de fond n'est pas dispersée immédiatement dans les eaux usées étant traitées. Par conséquent, quelques bulles d'oxygène peuvent s'unir pour former des grandes bulles inutiles. Cela diminue non seulement la disponibilité des petites bulles efficaces, mais augmente aussi la possibilité de détruire le floc formé précédemment, affectant l'efficacité de la flottation.

Donc les bulles produites par les deux électrodes peuvent être dispersées dans les eaux usées et rapidement et s'attacher sur le floc formé dans la cellule de EC efficacement, assurant la haute efficacité d'action.

---

Les résultats des essais réalisés sur les effluents de l'industrie pétrolière SONATRAH RTC BEJAIA, permettent de déduire que l'application du procédé d'électroflottation donne des rendements d'élimination satisfaisants.

Le traitement d'électroflottation en régime discontinu a été réalisé avec succès, en effet l'efficacité du rendement d'élimination de la concentration de la DCO a atteint de l'ordre de 76 % après optimisation des paramètres pendant 15 minutes pour une tension optimale obtenue à 25 V, respectivement.

Les caractéristiques des eaux usées industrielles peuvent varier selon leur origine. Le traitement des rejets industriels est devenu un impératif pour nos sociétés modernes. En fait le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une production croissante des rejets polluants.

Les ressources en eaux ne sont pas inépuisables, leur dégradation sous l'effet de rejets d'eaux polluées peuvent non seulement détériorer gravement l'environnement, mais aussi entraîner des risques de manque considérable de cette denrée vitale.

L'électroflottation est un procédé très complexe d'un point de vue physico-chimique. Le nombre de paramètres qui peuvent influencer la performance de procédé est élevé.

Au cours de ce travail, le traitement des eaux par l'électroflottation, choix de notre étude, nous avons constaté grâce aux résultats remarquables obtenus en cas discontinu, que l'électroflottation a permis aussi une séparation efficace et rapide des particules en suspension de l'effluent et sont satisfaisants. Le procédé de l'électrofottation représente une bonne alternative pour le traitement des eaux usées, malgré sa limite à l'état actuelle, à certains domaines d'application.

Une attention particulière doit être portée sur les dimensions des bulles et ses paramètres influents, ainsi que la nature des électrodes car elle représente l'élément principal dans la génération des bulles.

Ces résultats sont aussi encourageants et incitent à aller de l'avant dans la recherche en vue de clarifier toutes les hypothèses et incitent à aller de l'avant dans la recherche en vue de clarifier toutes les hypothèses qui ont été énoncées, de poursuivre cette étude en régime continue afin de prévoir par la suite l'extrapolation à l'échelle industrielle.



# *Références bibliographiques*

## *A*

N.S. Abuzaid, A.A. Bukhari, Z.M. Alhamouze, Removal of bentonite causing turbidity by electrocoagulation, *Environmental science Health A* 33 (1998) 1341-1358.

N. Ahmed and G.J. Jameson, The role of Bubble size on the rate of flotation of fine particles, *Int. J. Miner. Process* 14 (1985) 195-215.

L. Alexandrova, T. Nedialkova, I.Nishkov, Electroflotation of metal ions in wastewater. *Int. J. Miner. Process* 41 (1994) 185-294.

Anonyme 6 . (1998) . La pollution des eaux superficielles .<http://grenobe.eau.pure.free.fr/normes>.

## *B*

B. Bariou N. Mameri, A.R. Yebdou, H. Lounici, D. Belhocine, H. Grib, Defluoridation of septentrional sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes, *Water Res.* 32 (1998) 1604-1612.

J-P. Bechac, P. Boutin, B. Mercier, P. Nuer, "Traitements des eaux usés". Editions Eyrolles, 1984.

E.C. Beck, A.P. Giannini and E.R. Electrocoagulation clarifies food wastewater, *Food tecnol.* 28 (2) (1974) 18-19.

N.P. Brandon, G.H. Kelsaii, S. Levine and A.L. Smith, Interfacial electrical properties of electrogenerate bubbles. *J. Appl. Electrochem.* 18 (1985) 485- 493.

S.E. Burns, S. Yiakoumi, C. T souris, Microbubble generation for environmental and industriel separations and purification *Tehnology* 11 (1997) 221-232.

D.J-L. Burgaud . (1969), " L'eau dans l'usine , gestion et maitrise de l'eau.

## C

C.E chitour, Physico-chimie des surfaces. Les interfaces liquide-liquides et gaz-liquides, Ed. OPU, (1992).

G.L. Collins and G. J. Jameson , Double-layer effects in the notation of the particles, Chem. Eng.Sci 32(1977) 239-246.

## D

P. Debilement, Dépollution des eaux usées industrielles par électrofloculation, Récents progrès en Génie des procédés 10 (1996) 129- 137.

Degremont , "Mémonto technique de l'eau. 6<sup>ème</sup> Ed. Technique et documentation, Paris, 1979-1989.

L. Divet, P. Shulhof, " Traitement des eaux". Ed. Eyrolles, Paris 1978.

Dulucq .S., Lancon. B , " Oxydation des effluents de l'industrie textile", Vol. 14, N<sup>o</sup> .10, PP. 31-61, Janvier 2004.

R. Desjardis, Le traitement des eaux , 2<sup>ème</sup> édition de l'école polytechnique de montréal (1997).

## G

D. Gardais, Les procédés électriques de traitements des rejets industriels, Environnement et électricité, Electra, Doppee Diffusion, Avon. France (1990) 300- 320.

C. Gommella et Guerre, "Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales ".Ed. Eyrolles 61 Boulevard Saint –Germain 75005 Paris, 1983.

Gujer, W., Henze, M. (1991). Activated sludge modelling and simulation. Wat. Sci. Tech., 23 (4-6), 1011-1023.

## H

A. Habu and D. Szopolik, Research on a possibility of using an electroflotation process for wast treatment from fish processing, Environmental Protecting Engeneering 18 (3) (1992) 19-27.

P. K. Holt, G. w. Barton, C.A. Mitchell, The future for electrocoagulation as localised water treatment technology, *Chemosphere* 59 (2005) 355-367.

A.Y.Hosny, Separating oil from oil-water emulsion by electroflotation technique, *Sepa. Techn.* 6 (1996) 9-17.

### *J*

Y.K. Jung and M.Y. Han, Simultaneous removal of cadmium and turbidity in contaminated soil washing water by Electroflotation, School of civil, Urbain and Geosystem Engineering, Seoul National University, Korea (2002).

### *K*

D.R. khetKar, R. Mallikarjuma and S Venkatachalam, Electroflotation of quartz fines, *Int. J. Miner. Proccs* 31 (1991) 127-138.

D. Kim, K.H . Lee, A. Kwon and M. Y. Han, Optimum Operation Conditions for the teatment of TiO<sub>2</sub> wast water by Electroflotation , school iof civi Urbain and Geosystem Engineering, Seoul National University, Korea (2001) 151-742.

V. A. Kolesnikov and V.N. Kudryatsev, Theoritifical and applied aspects of using electroflotation method for wastewater treatment of surface finishing Industry, *Process AESF Annual technical conference* 82 (1995) 491-502.

N.K. Khosla, S. Venkatachalam, and P. Somasundran, Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation, *J. A. Electroflotation.* (1991) 986-990.

### *M*

K.A. Matis, Treatment of industrial liquid wastes by electroflotation, water pollut. *Contrl* (1980) 136-142.

K. Matis and A.I. Zouboulis, Cu<sup>2+</sup> removal by electroflotation onto sewage sludge biomass, *Crit. Rev. Envir. Sci. Tech.* 27 (3) (2000) 195-235.



B. Merzouk, B. Gourich, A. Sekki, K. Madani, Ch. Vial, Barkaoui, Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process, Chem. Eng. Jour. 149 (2009) 207-214.

M. Y. A. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M. Kesmez, J.R. Parga, D. L. Coke, Fundamentals, present and Future perspectives of electrocoagulation, J. Hazard. Mater. 114 (2004) 199-210.

M. Y.A. Mollah, R Schennach, J.R. Parga, D.L. Coke, Electroagulation (EC) – sciences and applications, J. Hazard. Mater. 84 (2001) 29-41.

Y. Makhoulf, M. Araya-Farías, "La clarification du jus de pomme par électroflotation". Vol.145, N<sup>o</sup>. 10, PP.31-61, Octobre, 1999.

H. Monchy, "Mémento d'assainissement". Ed. Eyrolles, Paris, 1978.

### ○

U.B. Oğutveren, N. Gonen and S. Kopolal, Removal of chromium from aqueous solutions and plating bath rinse by an electrochemical method, Intern. J. Environmental Studies 45 (1994) 81-87.

### ϕ

T. Pasternak, and J. Piotrowski, possibilities of partial purification of dairy effluents, Abstrat of przeglad- Mleczarski. 31(1) 1982 26-28.

Persin, F., Rumeau, M. (1989) : Le traitement électrochimique des eaux et des effluents, Tribune de l'eau, Novembre N<sup>o</sup> 3 , Vol. 42, N<sup>o</sup> 539, pp 45-56.

### R<sub>e</sub>

D. Raymond, "Le traitement des eaux", 2<sup>ème</sup> édit . Editions de l' Ecole polytechnique de Montreal(1990).

D. Reay, G. Ratcliff, Removal of fine particles from water by dispersed air flotation – effet of bubble size and particle size on collection efficiency, The Canadian Journal of chemical Engineering 51 (1973) 178-185.

Rodier.J.& coll , "L'analyse de l'eau "8 ème édition DUNOD, 2005.

Rodier.J. , "L'analyse des eaux, eaux naturelles eaux résiduaires , eaux de mers".8<sup>ème</sup>  
Edition Dunod, Paris, 1996.

### §

M.S. Shin, K. H. Lee, D.J. Kim and MY. Han, Treatment characteristic of livestock  
waswater , Chem. Eng. Sci., 58, 987, ( 2001).

J. Szynek, J. Kan, T. A.T. Hassan et J. C. Donini, Electrochemical coagulation of clay  
suspensions, Clays and Clays Minerals, 42 (1994) 667-673.

### T

O. Thomas , " Métrologie des eaux résiduaires" Editions CEBDOC, (1995).

### W

R. Weiner, Epuration des eaux usées résiduaires, Editions Eyrolles (1975).

## Glossaire

**DRGB** : Est la direction régionale de la SONATRACH de Bejaia.

**RTC** : Région Transport centre représentant le réseau transport centre .

-Un **détergent**: (ou agent de surface, détersif, surfactant) est un composé chimique, généralement issu du pétrole, doté de propriétés tensioactives, ce qui le rend capable d'enlever les salissures. La détertion est un élément d'hygiène fondamental, puisqu'il permet d'éliminer une grande partie des bactéries présentes en particulier sur la peau, et sur les ustensiles servant à la préparation et à la consommation des repas.

-Le **vapocraquage**: est un procédé pétrochimique qui consiste à obtenir, à partir d'une coupe pétrolière telle que le naphta, ou d'alcanes légers, des alcènes (éthylène, propylène) mieux valorisés. Ces alcènes sont principalement à la base de l'industrie des matières plastiques (polyéthylène, polypropylène, etc.).

-L'**hydroxyde de sodium** :est un solide ionique de formule statistique **NaOH**. La solution issue de la dissolution de ce cristal est appelée **soude**, **lessive de soude** ou **soude caustique**<sup>7</sup>.

La solution aqueuse d'hydroxyde de sodium peut être vendue sous le nom de « lessive de soude ». Ce produit est assez courant dans le commerce, présenté comme déboucheur de canalisations.

L'hydroxyde de sodium se présente généralement sous la forme de pastilles ou de billes blanches, corrosives et hygroscopiques. En outre, l'hydroxyde de sodium réagit avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'air et se carbonate.

L'hydroxyde de sodium est très soluble dans l'eau et soluble dans l'éthanol<sup>8</sup>. Sa dose journalière admissible est non spécifiée depuis 1965<sup>8</sup>.

-**La soude** est une solution chimique transparente et corrosive.

L'ion hydroxyde est une base forte.

Annexes : Traitement d'électroflottation



Au début du traitement d'électroflottation



Au cours du traitement d'électroflottation



A la fin du traitement d'électroflottation

## Annexes: Presentation de l'organisme d'accueil

### **Présentation de l'entreprise**

Dés sa naissance, la SONATRACH avait pour mission de prendre en charge le transport et la commercialisation du pétrole et du condensât.

SONATRACH est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 12<sup>ème</sup> parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2<sup>ème</sup> exportateur de GNL et de GPL et 5<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel. Sa Production globale (tous produits confondus) est de 222 millions de tep en 2004. Ses activités constituent environ 30% du PNB de l'Algérie. Elle emploie 120 000 personnes dans l'ensemble du Groupe.

Aujourd'hui la SONATRACH, assure les missions stratégiques, certaines sur les recherches, la production, le transport, la séparation de G.P.C de l'approvisionnement de marché national et de la commercialisation des hydrocarbures liquides et gazeux sur le marché international. Pour assurer l'activité de transport par canalisation la SONATRACH possède cinq (05) régions opérationnelles qui sont: SKIKDA, ARZEW, HAOUD EL HAMRA, AIN AMENAS et BEJAIA . De ce principe la SONATRACH a donné naissance à 18 entreprises (Naftal, EMIP, EMGP,...).

Après sa restructuration et sa réorganisation en 1985 la SONATRACH s'est rencontrée sur ces métiers de base que constituent les activités suivantes:

- Exploitation des gisements d'hydrocarbures.
- La liquéfaction et la transformation du gaz.
- La commercialisation.
- Le transport par canalisation.
- Exploitation. & recherches.



**Représentation des activités de la SONATRACH**

### **Enquête concernant la direction régionale de Bejaia SONATRACH RTC**

#### **A) Aperçue sur la direction régionale de Bejaïa (D.R.G.B)**

La direction régionale de Bejaïa est une direction parmi les 7 directions opérationnelles composant l'activité de transport par canalisation avec les régions d'ARZEW, SKIKDA, HAOUD ELHAMRA, GPDF, et GME ces deux derniers sont 2 gazoducs traversant l'Italie et l'Espagne. La vocation de la DRGB est le transport des hydrocarbures par canalisation, stockage et chargement des navires. Le terminal marin de Bejaïa est divisé en deux parties, ce sont :

Il comprend :

- Terminal Nord
- Terminal Sud

## B) Aperçue de la ligne OB1 24" de Bejaia

Il se compose de différentes stations intermédiaires ou satellites de pompages qui acheminent le brut depuis Hassim Sa après sa production jusqu'au terminale de Bejaia par canalisation sur Oléoduc OB1 reliant le centre de stockage avec le terminal marin de Bejaia.

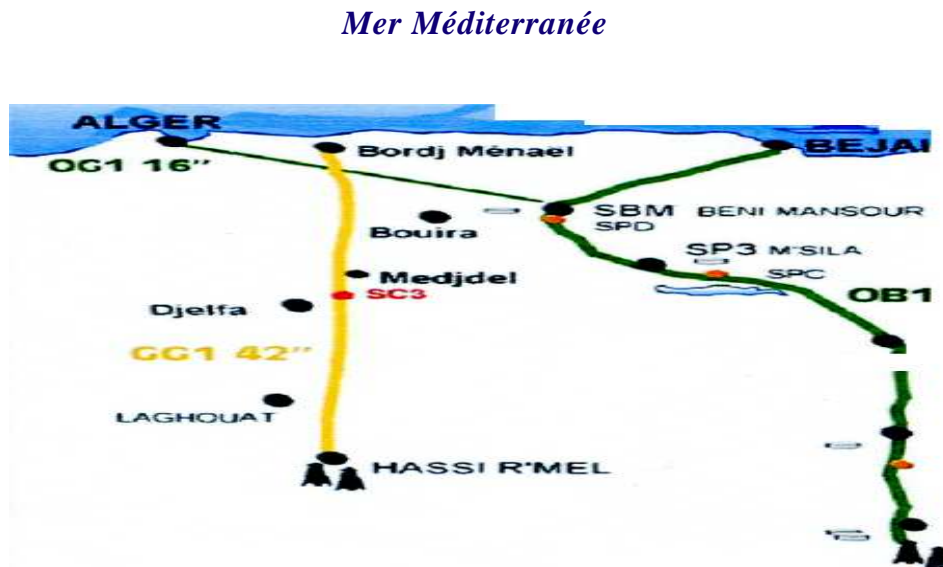


Figure IV.4.2 Carte de réseau de transport RTC de Bejaia

## C) Le terminal marin de Bejaia

Il se situe à 2Km au sud ouest de la ville de Bejaia est divisé en deux parcs de stockage nord et sud, il comprend également le port pétrolier qui se trouve à environ 5Km au nord et de parc de stockage. La terminale de Bejaia se compose de deux parcs de stockage

TM sud : réservoir à toit flottants de  $5000\text{m}^3$

TM nord : comporte 12 réservoirs à toit flottants de  $3500\text{m}^3$  Un réservoir à toit conique de  $2900\text{m}^3$

#### **D) Le rôle du terminale de Bejaia**

-Stockage de pétrole brut qui arrive de pipe -chargement de pétrole

-L'assurance de l'entretien du TMB

- Pomperie, composée de 7 unités de pompage principale (TM nord) -3 unité de pompage (TM sud).



**Figure IV.4.3 La terminale marine de Bejaia**

#### **E) Centrale électrique**

Elle est équipée de deux groupe thermiques générateurs à -poste de transformation haute tension -groupe électrogène à démarrage automatique, -deux compresseurs d'aire 18 CV

Parc de stockage :

Le terminal se compose de deux parcs de stockages,

TM Sud : réservoirs à toit flottants de 5000 m<sup>3</sup>.

TM Nord : 12 réservoirs à toit flottants de 3500 m<sup>3</sup>et un réservoir à toit conique.

#### **F) Tour de contrôle**

C'est un poste centralisé des deux parcs de stockage qui rassemble, le contrôle suivant : -pression et le débit à l'arriver de pipe téléguidage des réservoirs pression dans les conduites de chargement.

- Télécommande des vannes et pompes principales.



## G) Manifold

C'est un ensemble de canalisations, de vannes et de pompes de chargement utilisés pour réceptionner les hydrocarbures venant du Sahara et stockage. Il contient sept pompes, six vannes chacune d'elle alimente deux bacs et d'autres vannes.

Le manifold destiné à assurer en nombre et en direction tous les mouvements du produit:

Réception par pipeline.

Remplissage et vidange sélectif des groupes de réservoirs.

Transfert d'un groupe de réservoirs à un autre (transvasement).



Figure IV.4.4 Aperçu du manifold

## H) Port pétrolier

Il Comprend :

Trois postes de chargement avec tous les équipements d'exploitation et de sécurité.

- Une station de déballage.
- Deux bacs de 11580m<sup>3</sup> de capacité.
- Un bassin pour récupération des produits polluants.
- Deux bassins de décontraction.

(Rapport de stage( 2002-2005;2005-2006; 2008 2010 ).

Résumé essentiel de la législation algérienne concernant le programme de forage : exploration & production de pétrole et de gaz. (JORADP N° 26, 43,50 ; 2003, 2005,2006): **Ce tableau** suivant représente les valeurs limites et la tolérance aux valeurs limites : anciennes installations.

<b>valeurs limites des rejets d'effluents industriels</b>				
<b>N°</b>	<b>PARAMETRES</b>	<b>UNITE</b>	<b>VALEURS LIMITES</b>	<b>TOLERANCES AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS</b>
1	Température	°C	30	30
2	PH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5
3	MES	mg/l	35	40
4	Azote Kjeldahl	"	30	40
5	Phosphore total		10	15
6	DCO		120	130
7	DB05		35	40
8	Aluminium		3	5
9	Substances toxiques bio accumulées		0,005	0,01
10	Cyanures		<b>CM</b>	0,15
11	Fluor et composés		15	20
12	Indice de phénols		03	(15
13	Hydrocarbures totaux		10	15
14	Huiles et graisses		20	30
15	Cadmium		0,2	0,25
16	Cuivre total		<b>tu</b>	1
17	Mercure total		0,01	0,05
18	Plomb total		0,5	0,75
19	Chrome Total		0,5	0,75
20	Manganèse		1	1,5
21	Hickel total		0,5	0,75
22	Zinc total		3	5
23	Fer		3	5
24	Composés organiques chlorés		5	7

**PH** : Potentiel d hydrogène

**DBO<sub>5</sub>**: Demande biologique en oxygène pour une période de cinq (5) jours

**DCO** : Demande chimique en oxygène

**MES** : Matière en suspension