

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI-MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur Année 2009

Département d'Hydraulique

MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

THEME

**ETUDE DE LA CINÉTIQUE DE SÉDIMENTATION
DES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS
LE CALCUL DES DÉCANTEURS**

Option:

Hydraulique Urbaine et Construction Hydraulique

Par :

Kherifi Wahida

DIRECTEUR DE MEMOIRE : YAHIA HAMMAR

M.C Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PR KHERICI HOURIA

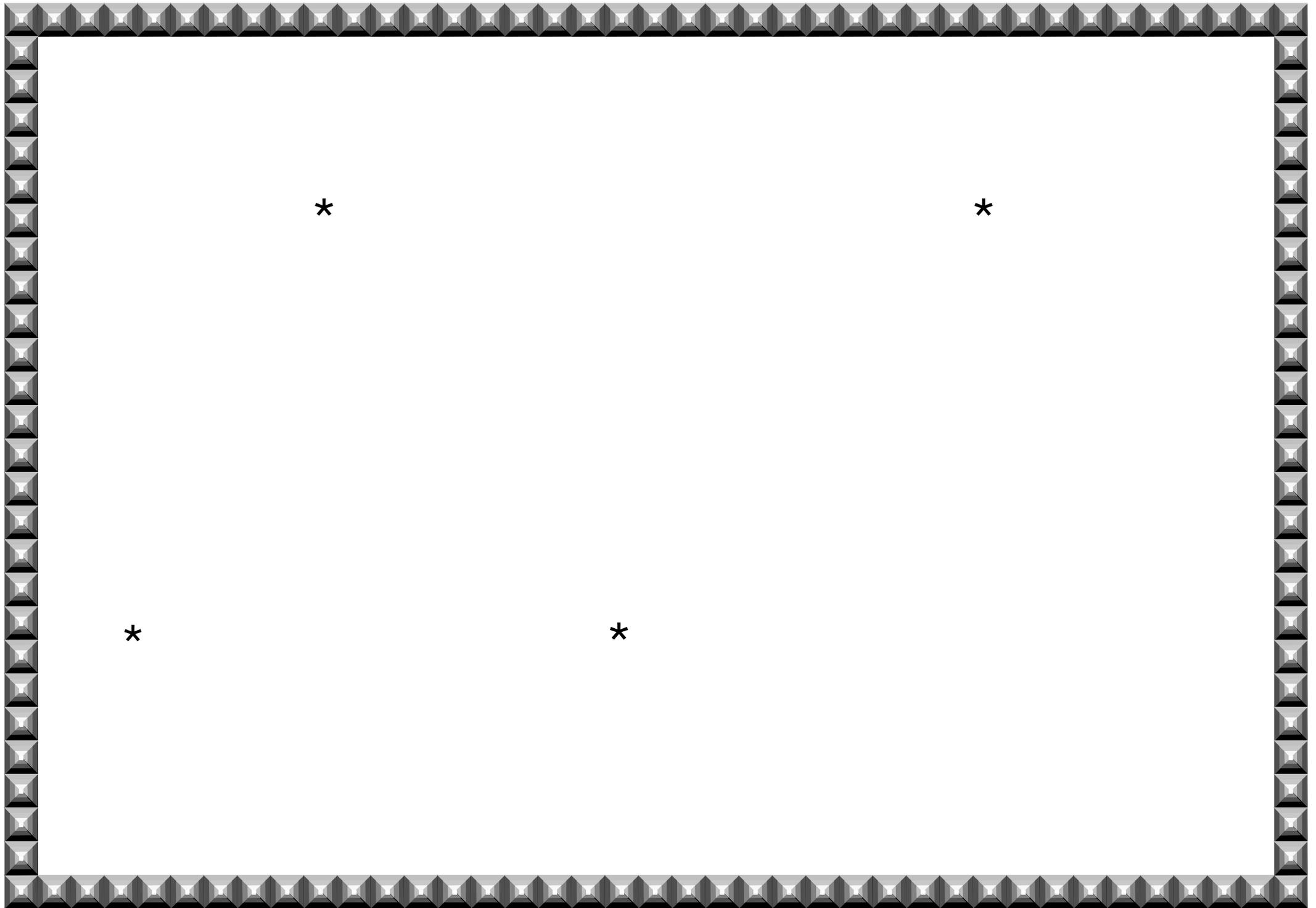
PR Université de Annaba

EXAMINATEURS : DR MEKSAOUINE MOHAMED

M.C Université de Annaba

DR DJEMILI LAKHDAR

M.C Université de Annaba



*

*

*

*

DEDICACE

D'un cœur plein d'affection et de tendresse je dédie ce modeste travail à :

- ✚ Mes parents qui me représentent l'exemple de sacrifice et qui ont fait de moi ce que je suis devenu et qui m'ont toujours encouragé et aidé à surmonter les difficultés en me donnant le plus précieux soutien tout le long de mes études.*
- ✚ Mes sœurs : SANA, WAHIBA, SAMIHA.*
- ✚ Mon frère : TAREK.*
- ✚ A toutes les amies surtout : Lilia , Noura , Yamina , Salima et Nadjatte.*

REMERCIEMENT

*Le plus grand merci revient à dieu qui lui seul nous
a guidé dans le bon sens durant notre vie
qui nous aide à réaliser ce travail.*

*Je tiens vivement à exprimer ma profonde gratitude
et mes sincères sentiments à mon directeur de mémoire
monsieur HAMMAR, maître de conférence au
département hydraulique de l'université d'annaba,
pour son assistance continue à mes travaux dès le
début à la fin.*

*je lui réitère mes remerciements aussi bien pour sa
confiance que ses précieux conseils, et surtout d'avoir
accepté de me prendre en charge.*

*Mes remerciements vont également à l'ensemble du corps
enseignants du département d'hydraulique
je ne peux pas terminer sans avoir adressé mes
remerciements les plus vifs à l'ensemble de mes collègues
du travail de la daïra d'ELTARF pour leurs en-
couragements, leurs conseils lors de l'accomplissement de
ce projet.*

*En fin je remerci tous ceux qui ont participé de près ou de loin à
l'achèvement de ce travail.*

SOMMAIRE

Nomenclature

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction et objet du présent mémoire	1
CHAPITRE I. Les substances présentes dans l'eau	
I.1. Le cycle de l'eau	2
I.2. Classification les substances présente dans l'eau	3
I.2.1. Matières solides en suspension	6
I.2.2. Matières en émulsion	6
I.2.3. Matières colloïdales	6
I.2.4. Matières organiques dissoutes	7
I.2.5. Matières minérales dissoutes	7
I.2.6. Gaz dissous	10
I.2.7. Organismes vivants	11
CHAPITRE II. Technique de séparation solide-liquide	
II.1. Introduction	13
II.2. La séparation solide-liquide	13
II.3. Les procédés de séparation solide-liquide	14
II.3.1. La flottation	16
II.3.2. La sédimentation par gravité	16
II.3.2.1. Définition de sédimentation (décantation)	16

II.3.2.2. Principe du phénomène	16
II.3.3 La sédimentation centrifuge	17
II.3.3.1. Les hydrocyclones	17
II.3.3.2. Les centrifuges	17
II.3.4. La filtration	17
II.3.5. Le tamisage	17
II.4. La caractérisation des particules en suspension	18
II.4.1. La définition du concept de taille des particules	18
II.5. Conclusion	21

CHAPITRE III. Coagulation-Floculation

III.1. Introduction	23
III.2. Les particules mises en jeu : Les colloïdes	24
III.2.1. Généralités	24
III.2.2. Les particules colloïdales.....	25
III.2.3. Les types de colloïdes	25
III.2.4. Structure des colloïdes.....	27
III.3. But de la coagulation – floculation	29
III.4. Phénomène de la coagulation	30
III.4.1. Compression de la double couche	30
III.4.2. Adsorption et neutralisation des charges	32
III.4.3. Emprisonnement des particules dans un précipité	32
III.4.4. Adsorption et pontage	33
III.4.5. Coagulants utilisés	33
III.4.6. Facteurs influençant la coagulation	35
III.4.6.1. Influence du pH	35
III.4.6.2. Influence des sels dissous.....	36
III.4.2.3. Influence de la température de l'eau	36
III.4.2.4. Influence de coagulant	37
III.4.2.5. Influence de mélange	38

III.4.2.6. Influence de la turbidité	38
III.4.2.7. Coagulation de la couleur	39
III.5. Phénomène de la floculation	40
III.5.1. Théorie de la floculation.....	40
III.5.1.1. Floculation péricinétique	42
III.5.1.2. Floculation orthocinétique	43
III.5.2. Nature des flocculants	45
III.5.3. Processus de la floculation	47
III.6. Technologie de la coagulation - floculation	48
III.6.1. Stratégie.....	48
III.6.2. Choix du coagulant	49
 CHAPITRE IV. La cinétique de sédimentation des particules	
IV.1. Introduction	51
IV.2. Types de décantation.....	52
IV.3. Vitesse de décantation des particules dans un liquide...	53
IV.3.1. Particules isolées de forme sphérique	53
IV.3.2. Particules réelles	57
IV.3.3. Cas de suspension concentrée	58
IV.3.4. Paramètre intervenant dans le processus de décantation...	59
IV.4. Conclusion	60
 CHAPITRE V. Modélisation hydraulique des décanteurs	
V.1. Introduction.....	62
V.2. Modélisation hydraulique des décanteurs	62
V.2.1. Décanteurs à écoulement horizontal.....	62
V.2.1.1. Le paramètre d'efficacité (condition de capture)	62
V.2.1.2. Modèle de Hazen	62
V.2.2. Décantation à écoulement vertical	66
V.2.3. Décantation réelle	69

V.3. Structure des décanteurs	70
V.4. Conclusion.....	72
 CHAPITRE VI. Détermination expérimentale de la vitesse de décantation	
VI.1. Modélisation de la sédimentation	74
VI.2. Détermination expérimentale de la vitesse de décantation	76
VI.2.1. Décantation diffuse des particules floculées.	76
VI.2.2. Décantation en piston des particules floculées.....	79
VI.3. Conclusion.....	81
 CHAPITRE VII. Conclusion générale	
Conclusion générale	83
Référence	

Nomenclature

A	Aire	m^2
Ae	Coefficient d'efficacité	-
B	Induction magnétique	T
C	Concentration	$Kg.m^{-3}$
C _D	Coefficient de traînée	-
d	Diamètre	m
d _h	Diamètre hydraulique	m
D	Coefficient de dilution	m^3
E	Énergie	N.m
E _A	Énergie attractive	N.m
E _R	Énergie répulsion	N.m
F	Force	N
F	Fraction solide	-
F	Force d'inertie	N
G	Force de graviter	N
G	Gradient de vélocité	s^{-1}
g	Accélération gravitationnelle	$9.81 m.s^{-2}$
h	Hauteur	m
L	Longueur	m
m	Masse	kg
N	Concentration	$N^{\circ}de particule.m^{-3}$
Q	Débit	$m^3.s^{-1}$
R	Force de traînée	N
S	Surface	m^2
S _H	Surface horizontale	m^2
S _C	Facteur de forme	-
t	Temps	s
θ	Température	K
T ₀	Temps de rétention	h
V	Vitesse	$m.s^{-1}$
V _t	Vitesse individuelle	$m.s^{-1}$
V _C	Vitesse de sédimentation	$m.s^{-1}$
V _S	Vitesse de chute	$m.s^{-1}$
V _H	Vitesse de Hazen	$m.s^{-1}$
ω _P	Volume	m^3

Lettres grecques

μ	Viscosité dynamique	$\text{kg.m}^{-1} . \text{s}^{-1}$
ρ	Densité	kg.m^{-3}
ρ_P, ρ_L	Poids volumique de la particule et de fluide.	kg.m^{-3}
γ_P, γ_L	masse volumique de la particule et de fluide.	kg.m^{-3}
ν	Viscosité cinématique	$\text{m}^2 . \text{s}^{-1}$
ψ	Facteur de sphéricité	-

Lettres indicielles

i	Inertie	-
L	Liquide ou fluide	-
P	Particule	-
s	surface	-

Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	$\frac{\rho \nu L}{\mu}$
----	--------------------	--------------------------

Résumé :

La décantation est une opération unitaire, parmi les techniques de séparation liquide - solide par simple gravité. Elle dépend à la fois des propriétés des particules et du régime hydraulique caractérisé respectivement par le flux massique des matières en suspension (MES) à décanter et de la charge hydraulique superficielle du bassin de décantation.

Pour les particules grenues (particules conservant leurs propriétés physiques initiales) la décantation se fait indépendamment les unes des autres, tandis que les particules coalescentes (particules changeant de propriétés physiques initiales) décantent selon des mécanismes différents du fait qu'elles s'agglomèrent pendant leur sédimentation. Ceux ci rend difficile à dimensionner un bassin de décantation ne connaissant pas la quantité des MES à éliminer.

La problématique posée est de savoir quelle est la proportion des matières en suspension à éliminer pour mieux concevoir l'ouvrage de décantation ? La réponse à cette question est l'objet du présent mémoire.

Mots clés : *matières en suspension, sédimentation, dimensionnement, bassin de décantation.*

Abstract:

Decanting is a unit of the liquid separation techniques - solid by simple gravity. It depends on the properties of particles and the hydraulic regime characterized by the mass flow of suspended solids to decant and the hydraulic surface of pond.

For grainy particles (particles retaining their original physical properties) decanting is independently from each other, while the coalescing particles (particles changing physical properties initials) settle by different mechanisms because they agglomerate during their sedimentation. The latter makes it difficult to resize a settling pond does not know the quantity of suspended solids to remove.

The issue raised is what is the proportion of suspended solids removed to better design the work of settling? The answer to this question is the subject of this thesis.

Keywords: *suspended matter, sedimentation, design, pond.*

خلاصة:

الصب هي وحدة من تقنيات فصل السائل - الصلبة عن طريق الجاذبية. إن ذلك يعتمد على خصائص الجسيمات النظام الهيدروليكي ، الذي يتميز بتدفق المواد الصلبة العالقة ، وحمولة الماء على سطح حوض التسوية.

بالنسبة للجسيمات المحببة (جسيمات تحتفظ بخصائصها الفيزيائية الأصلية) الصب فيها تكون مستقلة عن بعضها البعض، في حين أن الجسيمات المتلفة(الجسيمات تغير خصائصها الفيزيائية الأصلية) تسوى عن طريق آليات مختلفة لأنها تتكثت خلال الترسيب.هذا مما يجعل من الصعب تصميم حوض التسوية بدون معرفة كمية المواد الصلبة العالقة المزيلة.

والسؤال المطروح هو ما هي نسبة إزالة المواد الصلبة العالقة من أجل تصميم منشأ للتسوية؟
الإجابة على هذا السؤال هو موضوع هذه الرسالة.

بحث: المواد الصلبة العالقة ، الترسيب ، التصميم ، حوض التسوية.

Liste des figures

Figure I.1- Cycle de l'eau dans la nature	3
Figure I.2- Dimensions des impuretés de l'eau	5
Figure II.1- Schéma d'un séparateur	14
Figure II.2- Classification des procédés de séparation solide-liquide	15
Figure II.3- Guide de sélection des équipements de séparation solide-liquide	19
Figure III.1- Représentation du colloïde hydrophile	26
Figure III.2- Distribution ionique autour d'un colloïde	28
Figure III.3- Coagulation - Flocculation	29
Figure III.4- Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules	31
Figure III.5- Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules, après compression de la double couche	32
Figure III.6- Variation du gradient de vitesse, G , en fonction du diamètre des particules	45
Figure IV.1- Forces agissant sur une particule en eau	53
Figure IV.2- Variation de coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds, pour des particules de différentes formes	56
Figure V.1- Décanteur longitudinal rectangulaire	64
Figure V.2- Bassin de décantation idéal	65
Figure V.3- Fraction des particules dont la vitesse de décantation est inférieure à celle portée en abscisse	66
Figure V.4- Décantation verticale	67

Figure V.5- Efficacité comparée des décantations horizontales et verticale (Particules grenues)	68
Figure V.6- Décantation réelle	69
Figure V.7- Filtre d'efficacité selon la théorie de Hazen et pour un décanteur réel	70
Figure VI.1 - Courbe de sédimentation et droites d'iso concentration (Kynch ,1952)	74
Figure VI.2 - vitesse de décantation de particules flocculants	77
Figure VI.3 - Colonne de décantation	78
Figure VI.4 - Courbe un même pourcentage d'élimination des particules	79
Figure VI.5- Schéma de la décantation	80

Liste des tableaux

Tableau I.1- Principales impuretés des eaux naturelles	4
Tableau I.2- Principaux ions présents dans l'eau	10
Tableau II.1- Définitions s'appliquant au diamètre sphérique équivalent	20
Tableau II.2- Définitions s'appliquant au diamètre circulaire équivalent	20
Tableau II.3- Définitions s'appliquant au diamètre statique	21
Tableau III.1- Caractéristique de quelques coagulants	50
Tableau IV.1-Coefficient de frottement $C_D = f(R_e)$	55
Tableau IV.2- Vitesse limite de chute des particules sphériques en fonction du nombre de Reynolds	56
Tableau IV.3- Valeur de ψ	58

*INTRODUCTION ET OBJET DU
PRESENT MEMOIRE*

- INTRODUCTION ET OBJET DU PRESENT MEMOIRE

La décantation est une opération unitaire, parmi les techniques de séparation liquide-solide basées sur le phénomène de sédimentation, qui consiste à séparer d'un liquide les particules en suspension en utilisant les forces gravitaires. Les procédés mis en œuvre diffèrent selon que l'on recherche seulement à augmenter la concentration des solides (épaississage) ou que l'on vise à obtenir un liquide clair à partir d'une suspension diluée (clarification).

La sédimentation est réalisée sur différents types de matières solides en suspension, parmi lesquelles on peut distinguer deux comportements opposés : celui des particules grenues, qui décantent indépendamment les unes des autres, et celui des particules plus ou moins floculées, qui ont des vitesses de chute variables, fonction de la taille des flocs et de leur abondance.

Lors de dimensionnement des ouvrages hydrauliques à savoir les décanteurs, la problématique posée est de savoir quelle est la proportion des matières en suspension à éliminer pour mieux concevoir l'ouvrage dont est l'objet du présent mémoire. C'est-à-dire déterminer la vitesse de sédimentation de la plus petite particule à retenir dans l'ouvrage en question.

Chapitre I

Les substances présentes dans l'eau

Chapitre I. Les substances présentes dans l'eau

I.1. Le cycle de l'eau	2
I.2. Classification les substances présente dans l'eau	3
I.2.1. Matières solides en suspension	6
I.2.2. Matières en émulsion	6
I.2.3. Matières colloïdales	6
I.2.4. Matières organiques dissoutes	7
I.2.5. Matières minérales dissoutes	7
I.2.6. Gaz dissous	10
I.2.7. Organismes vivants	11

I.1. Le cycle de l'eau

L'eau suit dans la nature un cycle (précipitations, ruissellement ou infiltration, écoulement vers les océans, évaporation) que résume la figure I.1.

Une des principales propriétés de l'eau à l'état liquide est son pouvoir solvant élevé vis-à-vis des éléments minéraux, organiques et des gaz.

Lorsque, après évaporation à la surface des océans, l'eau est sous forme de vapeur, elle est d'une très grande pureté chimique. En se condensant dans les couches froides de l'atmosphère, l'eau retrouve sa forme liquide et son pouvoir solvant, en particulier vis-à-vis des gaz atmosphériques (azote pour la plus grande partie, oxygène, mais aussi gaz carbonique et gaz rares).

Dès son apparition sous forme de fines gouttelettes dans les nuages, l'eau perd la pureté qu'elle avait sous forme de vapeur pour devenir une solution diluée de gaz.

En traversant les couches basses de l'atmosphère l'eau de pluie se charge des impuretés de l'air : poussières, gaz de combustion des foyers domestiques et industriels, rejets de l'industrie.

Lorsque l'eau ruisselle à la surface du sol, elle se charge, par effet mécanique d'érosion, de débris solides variés (roches, végétaux, animaux) puis dissout les substances solubles de la surface (produits de décomposition des végétaux, déjections animales, certains minéraux très solubles, mais aussi rejets de l'activité humaine, urbaine, industrielle et agricole).

Lorsque l'eau s'infiltré dans le sol, son pouvoir solvant s'exerce pleinement sur les roches avec lesquelles elle est en contact.

Ainsi, suivant leur origine, les eaux puisées dans le milieu naturel auront des compositions variées, souvent variables dans le temps.

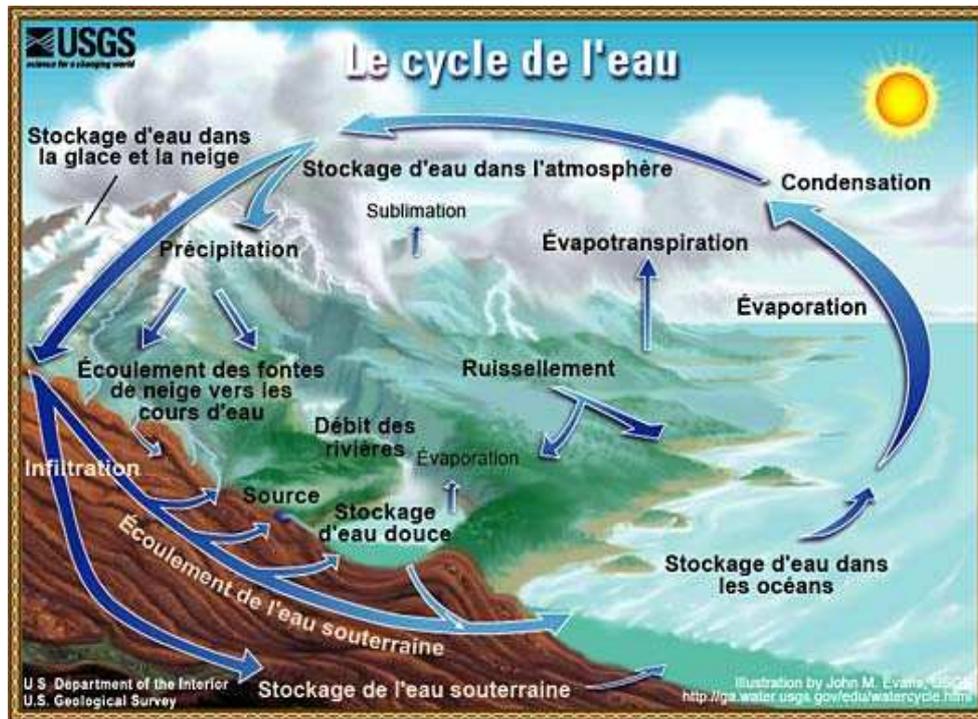


Figure I.1- Cycle de l'eau dans la nature.

I.2. Classification les substances présente dans l'eau

Une classification succincte des impuretés des eaux peut être établie en fonction de la forme sous laquelle ces éléments sont présents (tableau I.1).

Forme	Nature et origine
Solides en suspension	Débris de roches, sable, argiles, débris végétaux et animaux
Matières en émulsion	Hydrocarbures, corps gras
Matières colloïdales	Argiles, silice, composés organiques plus ou moins dégradés
Matières organiques dissoutes	Végétaux et animaux décomposés, matières de synthèse, pesticides, fongicides
Matières minérales dissoutes	Roches solubilisées, rejets industriels et agricoles, gaz de l'air
Gaz dissous	CO ₂ de décomposition des végétaux, pollution atmosphérique
Organismes vivants du règne végétal ou animal	Vers, larves, insectes, algues, planctons, champignons, moisissures, bactéries, virus

Tableau I.1- Principales impuretés des eaux naturelles [10].

A chacun de ces états ou formes correspondent des dimensions de particules qui vont des plus grands (mammifères marins des océans) aux plus petites (ion et gaz dissous).

La figure I.2 montre la répartition des particules présentes dans l'eau en fonction de leurs dimensions.

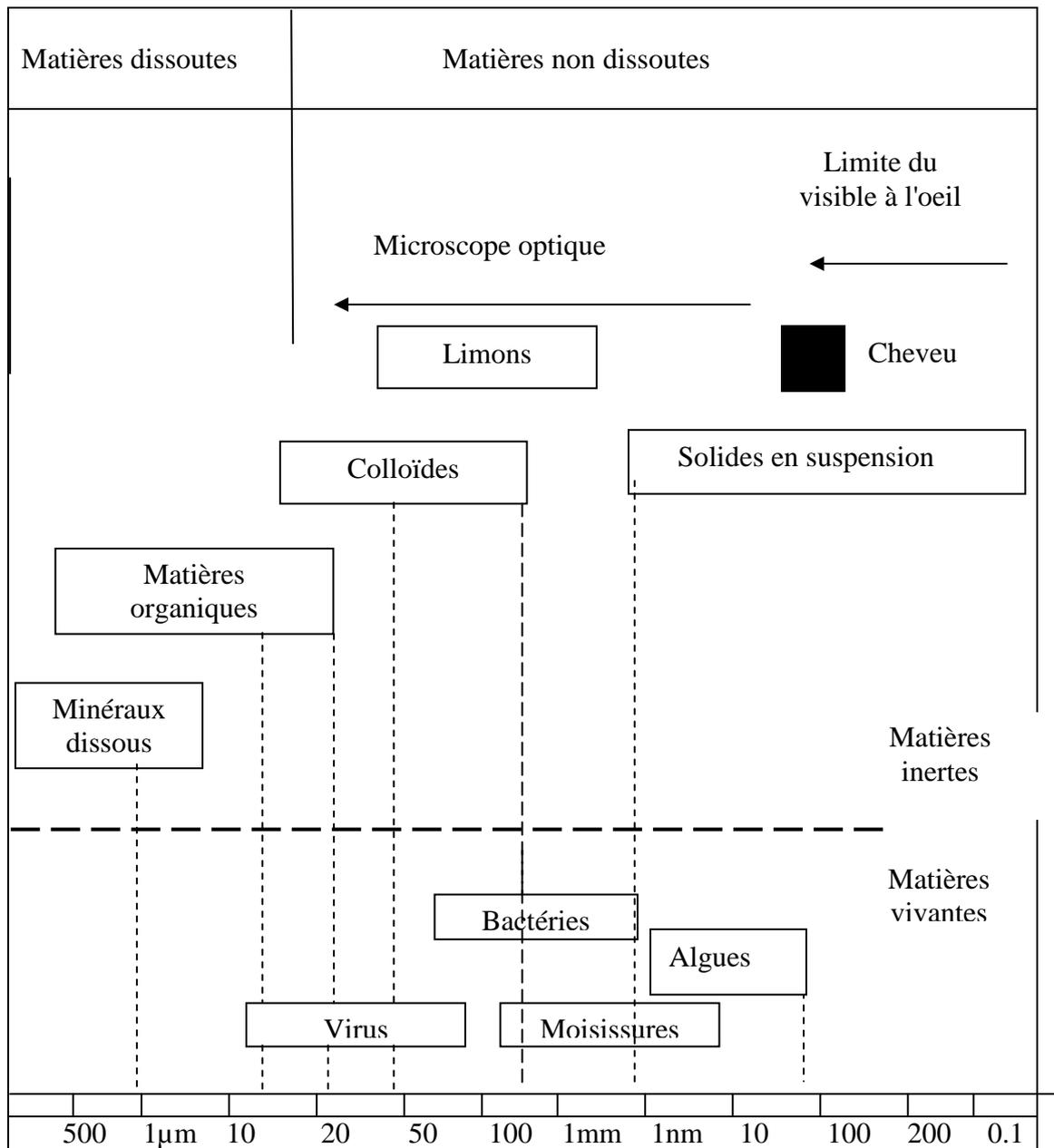


Figure I.2- Dimensions des impuretés de l'eau [10].

I.2.1. Matières solides en suspension

Généralité visibles à l'œil nu, les matières solides déterminent la turbidité de l'eau. Le plus souvent de masse spécifique supérieure à celle de l'eau, les matières solides demeurent en suspension tant que l'eau est en mouvement. Lorsque la vitesse d'écoulement de l'eau diminue et tend vers zéro, les matières solides sédimentent pour former des dépôts au fond des réservoirs et sur la génératrice inférieure des canalisations.

I.2.2. Matières en émulsion

Ce sont des matières insolubles, présents sous forme de fines gouttelettes réparties de façon uniforme dans l'eau.

La présence de matières en émulsion confère à l'eau un aspect laiteux. Les émulsions sont plus ou moins stables.

I.2.3. Matières colloïdales

Ce sont de très fines particules de matières solide, d'origine minérale ou organique, invisibles à l'œil nu en examen direct, dotées à leur surface de charges électriques qui, se repoussant mutuellement, confèrent à ces particules un mouvement permanent (même lorsque le liquide est au repos) et les maintiennent en suspension.

En l'absence d'une neutralisation de leurs charges électriques, les matières colloïdales ne décantent pas et ne peuvent être retenues que par des filtres très fins (membranes).

I.2.4. Matières organiques dissoutes

Elles proviennent des rejets urbains et industriels, de la dissolution par l'eau de pluie des végétaux et animaux décomposés, mais aussi de l'activité agricole (épandage des lisiers, pesticides, fongicides, herbicides, etc.)

Ces matières sont très souvent à l'origine de couleurs, d'odeurs ou de saveurs désagréables. Certaines ont un caractère de toxicité plus ou moins marqué.

I.2.5. Matières minérales dissoutes

Les matières minérales dissoutes proviennent, pour leur plus grande majorité, des roches avec lesquelles l'eau a été en contact au cours de son cheminement dans la nature. Toutefois, pour certaines, les chlorures ou les nitrates par exemple, leurs origines se trouvent dans les pollutions engendrées par l'activité humaine (pollution urbaines, industrielles et agricoles).

- **Dissolution des roches**

La nature des minéraux dissous et leur concentration dépendent de la nature des terrains traversés, de la solubilité plus ou moins grande des roches et du temps de contact intervenu entre l'eau et le terrain.

Il est ainsi possible de classer les principaux minéraux en fonction de leur solubilité.

Exemple :

- Roches très solubles : le sel (chlorure de sodium) est soluble à température ordinaire jusqu'à environ 300g pour litre. Les océans en contiennent de 35 à 45 g par litre, les eaux dites saumâtres de 1,5 à 10 g par litre.

- Roches moyennement solubles : le gypse (sulfate de calcium) est soluble jusqu'à environ 2g par litre.

- Roches peu solubles : ce sont les roches calcaires (carbonates de calcium et de magnésium) comme le marbre, la calcite, le calcaire grossier, les calcaires coquilliers, solubles jusqu'à environ 700 mg par litre d'eau riche en CO₂ dissous, mais seulement jusqu'à environ 50 mg par litre en l'absence de CO₂ dissous, à température ambiante (fig 3).

- Roches très peu solubles : ce sont les roches cristallines riches en silice (granit, gneiss, grès), solubles à raison de moins de 100 mg par litre.

- **Le phénomène d'ionisation des minéraux**

La dissolution des minéraux s'accompagne d'une modification fondamentale de la structure physique de la matière. Ce phénomène est appelé ionisation.

Il est permis de dire de façon simple qu'un sel minéral est constitué, lorsqu'il est sous forme solide (de roches par exemple), de l'association de molécules, elles-mêmes constituées de particules, que l'on peut classer en deux groupes: les premières ont pour origine les acides, les secondes ont pour origine les métaux.

L'ensemble de ces particules est, au sein du sel minéral solide, électriquement neutre. Lorsque le sel minéral est mis en solution dans de l'eau, il se produit une dissociation des molécules avec libération de nouvelles particules, électriquement chargées et différenciées, appelées ions.

Certains de ces ions sont chargés positivement, ils ont pour origine les métaux, et sont appelés cations. Ce sont des atomes ou des groupes d'atomes qui ont perdu un ou plusieurs électrons.

D'autres de ces ions sont chargés négativement, ils ont pour origine les acides, et sont appelés anions. Ce sont des atomes ou des groupes d'atomes qui ont gagné un ou plusieurs électrons.

Par exemple, le sel marin que les chimistes appellent chlorure de sodium, est constitué de molécules, elles-mêmes résultat de l'association d'atomes de chlore et d'atomes de sodium.

A l'état solide, ce sel marin est électriquement neutre. Mis en solution il libère des particules positives (chacune dotée d'une charge positive élémentaire), ce sont les cations sodium. Parallèlement, cette mise en solution libère des particules négatives (chacune dotée d'une charge électrique élémentaire), les anions chlorure.

Le sel minéral d'origine étant électriquement neutre, son ionisation libère autant de charges électriques positives des cations que de charges électriques négatives des anions. On peut donc écrire :



D'autres minéraux libèrent des ions dotés de deux ou de trois charges électriques élémentaires. Le phosphate de calcium, par exemple, libère, lorsqu'il s'ionise par dissolution, d'une part des ions positifs calcium dotés chacun de deux charges électriques, et d'autre part des ions négatifs phosphate dotés de trois charges électriques, et d'autre part des ions négatifs phosphate dotés de trois charges électriques.

Dans ce cas, chaque fois que deux ions phosphate sont libérés (libérant ainsi deux fois 3 charges négatives, soit au total 6 charges négatives), trois ions calcium apparaissent (libérant trois fois 2 charges positives, soit au total 6 charges positives).



Le nombre de charges électriques dont est doté un ion est appelé valence. Pour simplifier l'écriture, il est d'usage de faire appel à des symboles définissant par une ou deux lettres chacun des atomes.

De même, lorsqu'il s'agit d'ions, on utilisera les symboles des atomes constituant l'ion, symboles accompagnés d'autant de signes + ou de signes – portés en exposant que l'ion porte de charges électriques élémentaires.

- **Principaux ions présents dans l'eau**

Il est donc possible de représenter les principaux minéraux dissous présents dans une eau sous la forme symbolique suivante (tableau I.2):

Cation	Symbole	Anion	Symbole
Calcium	Ca^{2+}	Hydrogénocarbonate	HCO_3^-
Magnésium	Mg^{2+}	Carbonate	CO_3^{2-}
Sodium	Na^+	Hydrogénosilicate	HSiO_3^-
Potassium	K^+	Chlorure	Cl^-

Fer ferreux	Fe^{2+}	Sulfate	SO_4^{2-}
Fer ferrique	Fe^{3+}	Nitrite	NO_2^-
Cuivre	Cu^{2+}	Nitrate	NO_3^-
Aluminium	Al^{3+}	Phosphate	PO_4^{3-}

Tableau I.2- Principaux ions présents dans l'eau [10].

I.2.6. Gaz dissous

Les gaz dissous présents dans les eaux ont deux origines : les gaz de l'atmosphère et les gaz de la surface du sol et du sous-sol.

- **Les gaz de l'atmosphère**

- * Azote

Gaz interne dans les conditions habituelles d'emploi de l'eau, l'azote ne génère aucun inconvénient particulier.

- * Oxygène

Ce gaz joue un très grand rôle dans les processus de corrosion des métaux, tantôt comme élément favorisant les corrosions (cas des métaux ferreux), tantôt comme élément favorisant la formation de couches d'oxydes protecteurs (cas général des métaux non ferreux).

- * Gaz carbonique

Il est présent en faibles proportions dans l'atmosphère et par conséquent en faibles quantités dans l'eau de pluie.

- **Les gaz de la surface du sol et du sous-sol**

Ce sont principalement les gaz contenus dans les couches d'humus en cours de décomposition et les couches superficielles du sol que l'eau traverse lorsqu'elle commence à s'infiltrer :

- * Gaz carbonique

Le gaz carbonique d'origine végétale constitue la plus grande partie du gaz carbonique présent dans les eaux d'infiltration. Ce gaz joue un rôle déterminant

dans la dissolution des roches calcaires, dans la stabilité et l'instabilité du calcaire dissous. Le gaz carbonique interfère également dans les phénomènes de corrosion des métaux.

* Ammoniac

Issu de la dégradation des composés organiques azotés, l'ammoniac est biodégradable et peut donc, en qualité d'élément nutritif, intervenir dans le développement de certaines bactéries.

* Hydrogène sulfuré

Provenant de la dégradation de composés organiques soufrés, l'hydrogène sulfuré confère à l'eau une odeur et une saveur très désagréables et intervient comme agent de corrosion des métaux cuivreux et ferreux.

I.2.7. Organismes vivants

L'eau est seulement un des constituants des cellules, mais c'est aussi le milieu dans lequel ces cellules peuvent puiser les substances indispensables à leur croissance et leur reproduction.

Des réactions chimiques d'échange interviennent entre les cellules et leur milieu. Ces réactions sont de diverses natures : photosynthèse, oxydoréduction minérale, oxydoréduction organique.

Souvent ces réactions ne sont possibles qu'avec le concours d'enzymes spécifiques contenant dans leurs molécules des oligo-éléments (phosphore, métaux) puisés dans l'eau par les cellules. C'est ainsi que les eaux peuvent être le siège de développements d'organismes du monde végétal (phytoplancton, moisissures, algues, champignons) ou du monde animal (virus, bactéries, mollusques, crustacés).

La teneur en éléments nutritifs, le pH, la composition minérale de l'eau, ses teneurs en oligo-éléments à la lumière solaire pour certains organismes, sont autant de facteurs qui interviennent dans la vitesse de développement des souches vivantes.

La température, enfin, joue un très grand rôle: certains micro-organismes survivent à des températures très basse (moins de 5°C), d'autres survivent à des températures élevées (plus de 60°C). Si d'une façon générale, les températures comprises entre 25 et 35°C sont les plus favorables aux proliférations de micro-organismes, des désordres d'origine biologique peuvent être constatés dans la quasi-totalité des installations [10].

Chapitre II

Les techniques de séparation solide-liquide

Chapitre II. Les techniques de séparation solide-liquide

II.1. Introduction	13
II.2. La séparation solide-liquide	13
II.3. Les procédés de séparation solide-liquide	14
II.3.1. La flottation	16
II.3.2. La sédimentation par gravité	16
II.3.2.1. Définition de sédimentation (décantation)	16
II.3.2.2. Principe du phénomène	16
II.3.3 La sédimentation centrifuge	17
II.3.3.1. Les hydrocyclones	17
II.3.3.2. Les centrifuges	17
II.3.4. La filtration	17
II.3.5. Le tamisage	17
II.5. La caractérisation des particules en suspension	18
II.5.1 La définition du concept de taille des particules	18
II.6. Conclusion	21

II.1. Introduction

Les principales techniques de séparation solide/liquide utilisées sont la décantation et la filtration. Pour comprendre le choix de ces techniques, il faut connaître les différentes techniques de séparation existantes, de même que leur champ d'application respectif.

Dans cette partie il y a un bref survol des différentes techniques employées lors de procédés de séparation solide/liquide. Une brève description de la séparation solide/liquide sera d'abord faite, les différentes techniques employées pour effectuer une séparation solide/liquide seront ensuite analysées, choix du Technique de séparation solide-liquide. Finalement, il sera question de la caractérisation des particules en suspension.

II.2. La séparation solide-liquide

Les procédés de séparation solide-liquide impliquent la séparation des deux phases d'une suspension, soit la phase solide et la phase liquide. Ces procédés ont pour but la récupération, soit de la phase solide, soit de la phase liquide, soit des deux phases séparément ou d'aucune des deux phases (procédé de dépollution).

Une séparation solide-liquide parfaite exige que la totalité du solide suive une direction donnée et que la totalité du liquide suive une autre direction. Malheureusement, aucun équipement ne permet une séparation parfaite : de fait, quelques particules solides se retrouveront dans l'écoulement liquide et une certaine quantité de liquide sera évacuée avec la masse solide. L'imperfection d'une séparation solide-liquide se caractérise ainsi : soit par la fraction massique de solide se retrouvant dans le liquide, soit par l'humidité, correspondant à la quantité de liquide se retrouvant dans le solide. L'efficacité de la séparation est généralement exprimée en pourcentage du poids de solide sec recueilli par rapport au poids total (solide + liquide).

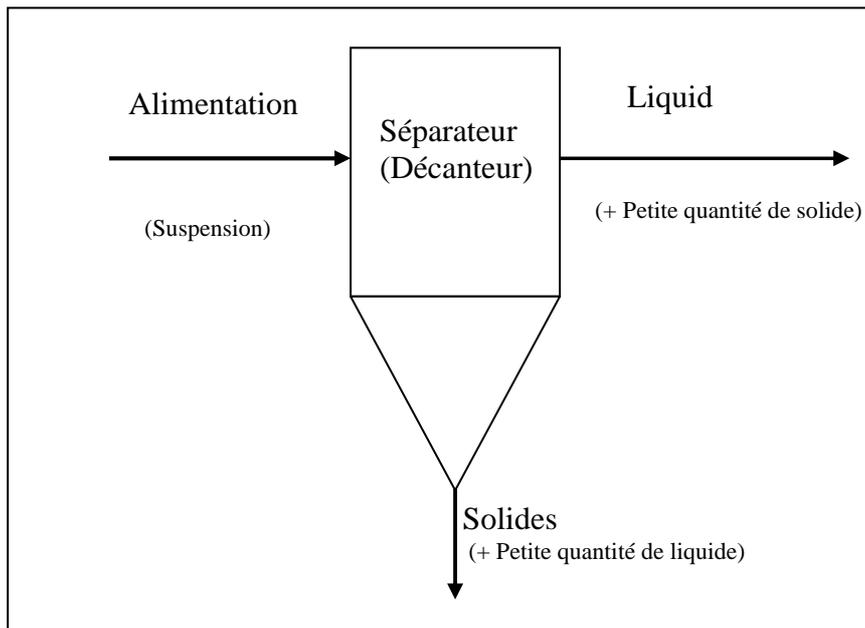


Figure II.1- Schéma d'un séparateur

II.3. Les procédés de séparation solide-liquide

Les différents procédés de séparation solide-liquide sont classifiés en fonction des principes impliqués (voir figure II.2). Si le liquide est contraint et que les particules solides se déplacent librement à l'intérieur, il s'agit de sédimentation ou de flottation. Pour la sédimentation, une différence de densité entre les particules solides et le liquide est nécessaire (nous développons ultérieurement dans le chapitre 4 uniquement la sédimentation objet du présent mémoire c'est-à-dire que la densité des particules est supérieure à celle de l'eau). Et lorsque les particules solides subissent certaines contraintes et que le liquide peut les traverser, il s'agit de filtration ou de tamisage (qui ne rentre pas dans le cadre de ce mémoire).

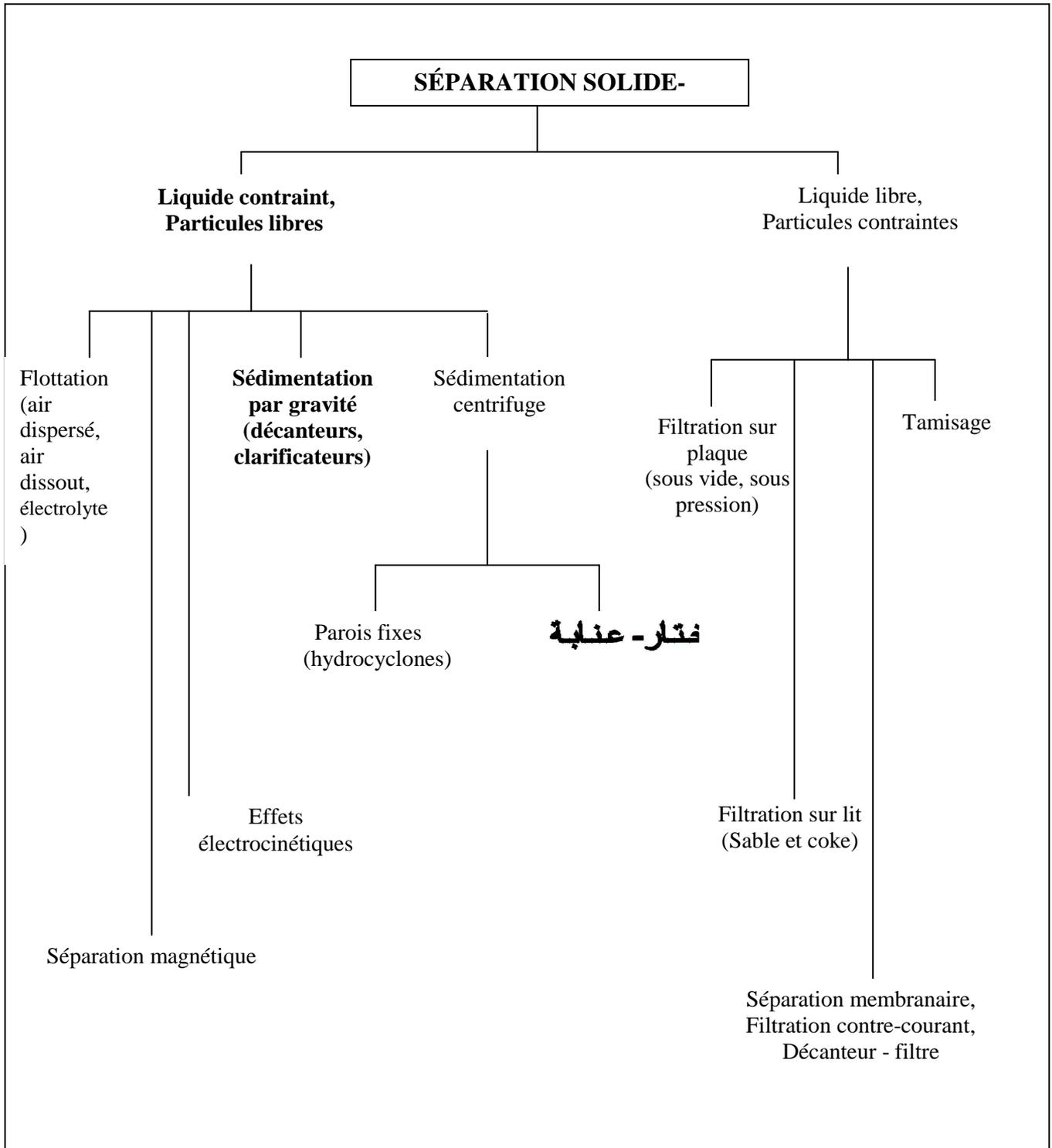


Figure II.2- Classification des procédés de séparation solide-liquide [18].

II.3.1. La flottation

La flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'appliquent à des particules dont la masse volumique est inférieure à celle de l'eau qui les contient.

II.3.2. La sédimentation par gravité

La sédimentation de solide par gravité est un procédé employé dans les bassins de sédimentation utilisés pour effectuer la décantation. Les décanteurs sont construits et opérés de façon à obtenir un solide aussi dense que possible et un surnageant aussi propre que possible. Cette technique peut être améliorée par l'ajout de substances appelées flocculants [2].

Cette partie sera vue plus en détail ultérieurement au chapitre 3.

II.3.2.1. Définition de sédimentation (décantation)

La décantation est une opération de séparation physique, par différence de gravité de phases non-miscibles dont l'une au moins est liquide. On peut séparer des phases liquides, une phase solide en suspension dans une phase liquide...

II.3.2.2. Principe du phénomène

Si on laisse reposer une suspension solide dans une phase liquide, on observe que les particules sous l'action de la pesanteur et de la poussée d'Archimède, tendent à tomber vers le fond ou à remonter à la surface selon leur densité et leur taille. Cette décantation peut cependant être relativement lente pour les très fines particules (sensibles à l'agitation thermique) et les liquides particulièrement visqueux. Toutefois, il est possible d'agir sur plusieurs paramètres pour augmenter la vitesse de sédimentation :

- le diamètre des particules, en utilisant des flocculants.
- la différence de densité.
- la viscosité du fluide, qui diminue avec l'élévation de la température.
- la surface de base du bac.

II.3.3.La sédimentation centrifuge

La sédimentation centrifuge est une séparation sous l'effet d'une force centrifuge, en écoulement libre (décantation centrifuge) ou à travers un milieu poreux (essorage),

II. 3.3.1. Les hydro cyclones

Dans un hydro cyclone, il n'y a pas de partie en rotation. Un vortex est produit en introduisant la suspension par une entrée tangentielle dans l'hydro cyclone de forme conique. La force centrifuge permet la séparation et la classification des particules en suspension.

II.3.3.2. Les centrifuges

Dans le cas des centrifuges, la suspension est placée dans un contenant soumis à une très haute vitesse. La force centrifuge favorise la séparation des différents constituants, mais peut aussi permettre une certaine classification [2].

II.3.4. La filtration

La filtration consiste à faire passer une suspension à travers un milieu poreux pour y retenir les particules solides tout en laissant passer la fraction liquide. Les forces utilisées pour entraîner le liquide à travers le solide sont produites, soit par pression positive en amont du filtre, soit par création d'un vide en aval.

II.3.5. Le tamisage

Le tamisage utilise le même principe que la filtration sauf que le liquide traverse le milieu par gravité. Cette opération peut-être améliorée en faisant vibrer légèrement le tamis et il existe deux types de tamis : *Le tamis rotatif et le tamis statique.*

II.5. La caractérisation des particules en suspension

La caractérisation des particules en suspension est une étape essentielle dans le choix de la technique permettant d'atteindre une séparation optimale. Cette caractérisation des particules permet de déterminer les propriétés fondamentales de la suspension : la distribution de la taille, la forme, la densité et les propriétés de surface des particules, ajoutée à la viscosité du liquide, sa densité et sa concentration. La détermination de ces propriétés est importante puisque ces facteurs régissent les comportements des particules en solution tels que la vitesse de sédimentation (objet de notre mémoire), la perméabilité du lit de solide et la résistance spécifique pour un filtre donné [2].

II.5.1. La définition du concept de taille des particules

Le concept de taille des particules découle d'un besoin de comparer des particules de formes différentes et irrégulières. Une particule de forme irrégulière peut être décrite par un nombre dimensionnel dépendant de la dimension et de la propriété mesurée. Il existe trois groupes de base pour une telle classification : le diamètre équivalent sphérique, le diamètre équivalent circulaire et le diamètre statistique.

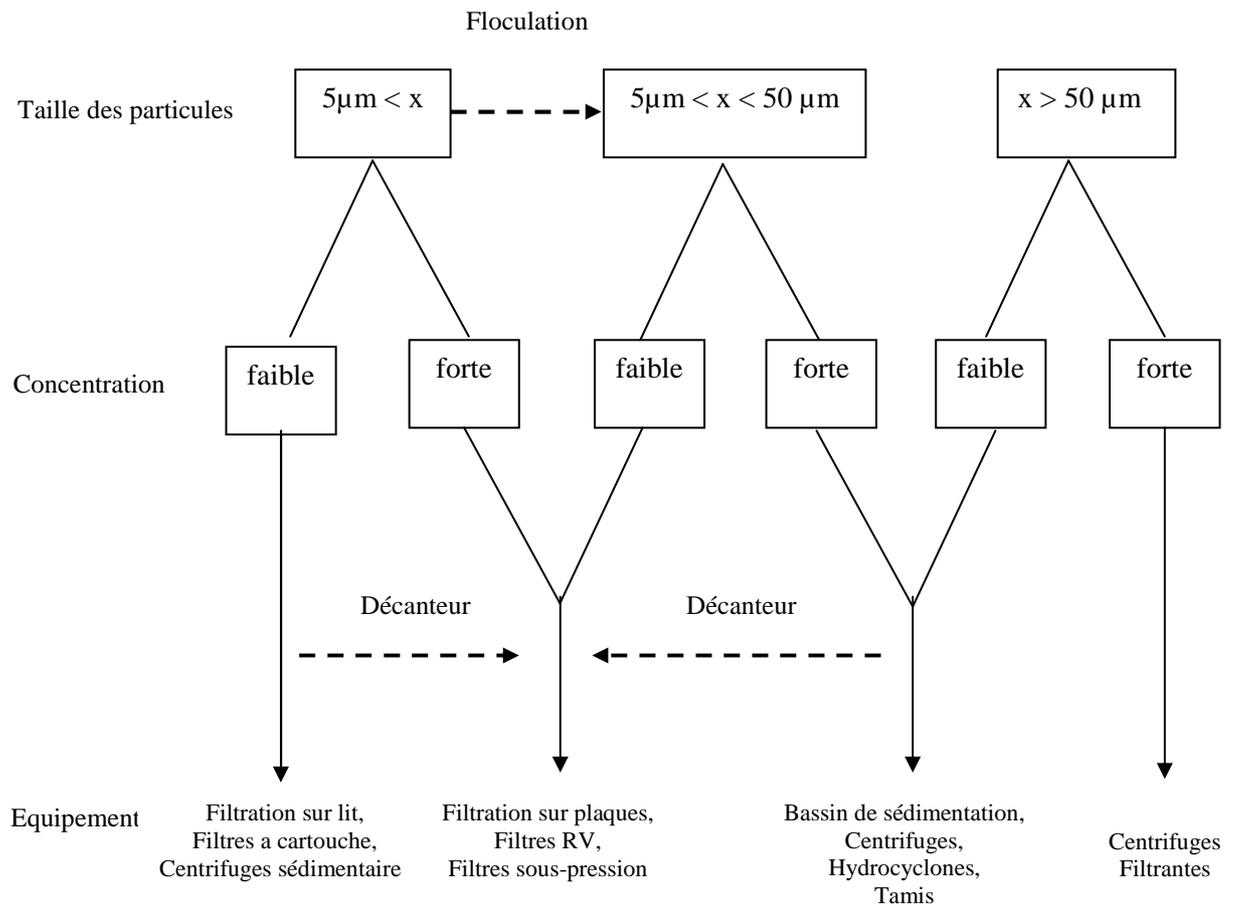


Figure II.3 - Guide de sélection des équipements de séparation solide-liquide [18].

Le premier groupe reporte en équivalent sphérique les propriétés de la particule elle-même (son volume, son aire, sa vitesse de sédimentation, etc.). Le second groupe permet de comparer les propriétés des particules qui possèdent un contour équivalent (diamètre). Le troisième groupe est obtenu lorsqu'une dimension linéaire est mesurée parallèlement à une direction préalablement déterminée.

Symbole	Nom	Propriété équivalente d'une sphère
x_U	Diamètre volumique	Volume
x_S	Diamètre surfacique	Surface
x_{SU}	Diamètre surfacique-volumique	Rapport entre la surface et le volume
x_D	Diamètre d'entraînement	Résistance au mouvement dans un même fluide et à une même vitesse
x_F	Diamètre de chute libre	Vitesse de chute libre dans un même fluide et avec une densité particulaire égale
x_{ST}	Diamètre de Stokes	Vitesse de chute libre sous la loi de stokes ($Re < 0.2$)
x_A	Diamètre de tamisage	Propriété de traverser un tamis de même maillage

Tableau II.1 - Définitions s'appliquant au diamètre sphérique équivalent[18].

Symbole	Nom	Propriété équivalente d'une sphère
x_A	Projection de la surface du diamètre	Surface projetée si la particule reste en position stable
x_P	Projection de la surface du diamètre	Surface projetée si la particule est orientée de façon aléatoire
x_C	Périmètre du diamètre	Périmètre du contour de la particule

Tableau II.2 - Définitions s'appliquant au diamètre circulaire équivalent [18].

Symbole	Nom	Propriété équivalente d'une sphere
x_F	Diamètre de Feret	Distance entre deux lignes tangentes aux surfaces opposées de la particule
x_M	Diamètre de Martin	Longueur de la ligne qui sépare l'image de la particule en deux
x_{SH}	Diamètre de cisaillement	Largeur de la particule obtenue en cisillant la particule
x_{CH}	Diamètre de la corde maximum	Longueur maximum d'une ligne limitée par le contour de la particule

Tableau II.3 - Définitions s'appliquant au diamètre statistique [19].

La sélection des paramètres permettant la caractérisation des particules dépend de la méthode de séparation employée. Par exemple, lorsque le déplacement relatif des particules dans un liquide constitue le mécanisme principal (sédimentation par gravité ou par centrifugation et les hydrocyclones), les paramètres les plus significatifs sont le diamètre de chute libre ou le diamètre de Stokes. Tandis que pour la filtration, par exemple, c'est le diamètre volumique qui sera le plus important [19].

II.6. Conclusion

La réalisation d'un procédé de séparation solide/liquide rapide et efficace peut nécessiter une combinaison de différentes techniques.

La sédimentation est un procédé rapide qui permet d'éliminer la majeure partie des particules en suspension. Pour augmenter l'efficacité de la sédimentation, une coagulation floculation ayant pour but d'agglomérer les particules peut être effectuée. Comme le montre la figure II.3, la sédimentation, même combinée à la coagulation-floculation, reste limitée par la taille et la

concentration des particules. Pour compléter la séparation, il faut donc utiliser la filtration.

Chapitre III

Coagulation- flocculation

Chapitre III. Coagulation- floculation

III.1. Introduction	23
III.2. Les particules mises en jeu : Les colloïdes	24
III.2.1. Généralités	24
III.2.2. Les particules colloïdales.....	25
III.2.3. Les types de colloïdes	25
III.2.4. Structure des colloïdes.....	27
III.3. But de la coagulation – floculation	29
III.4. Phénomène de la coagulation	30
III.4.1. Compression de la double couche	30
III.4.2. Adsorption et neutralisation des charges	32
III.4.3. Emprisonnement des particules dans un précipité	32
III.4.4. Adsorption et pontage	33
III.4.5. Coagulants utilisés	33
III.4.6. Facteurs influençant la coagulation	35
III.4.6.1. Influence du pH	35
III.4.6.2. Influence des sels dissous.....	36
III.4.2.3. Influence de la température de l'eau	36
III.4.2.4. Influence de coagulant	37
III.4.2.5. Influence de mélange	38
III.4.2.6. Influence de la turbidité	38
III.4.2.7. Coagulation de la couleur	39
III.5. Phénomène de la floculation	40
III.5.1. Théorie de la floculation.....	40
III.5.1.1. Floculation péricinétique	42
III.5.1.2. Floculation orthocinétique	43
III.5.2. Nature des flocculants	45
III.5.3. Processus de la floculation	47
III.6. Technologie de la coagulation - floculation	48
III.6.1. Stratégie.....	48
III.6.2. Choix du coagulant	49

III.1. Introduction

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie « agglomérer ». La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres.

Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation consiste à les déstabiliser. Il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre. La floculation rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et/ou filtration.

Quelques ordres de grandeurs

- Quelle est la taille de ces si petites particules dites colloïdales?

Diamètre des particules (micromètre)	Etat	Exemple
< 0,001	Etat dissous	.
0,001 à 1	Etat colloïdal	Oxydes et hydroxydes Argile Huiles et graisses Bactéries
> 1	Solides décantables	Limon Sables Pollen

- Quel est le temps mis par ces particules pour chuter naturellement d'un mètre dans l'eau?

Type	Diamètre des particules (micromètre)	Temps de décantation
Gravier	10 000	1 s
Sables grossiers	1 000	10 s
Sables fins	100	2 min
Argile	10	2 h
Bactéries	1	8 j
Colloïdes	0,1 à 0,001	2 à 200 ans

III.2. Les particules mises en jeu : Les colloïdes

III.2.1. Généralités

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois états suivants :

- état de suspension qui regroupe les plus grosses particules.
- état colloïdal.
- état dissous des sels minéraux et des molécules organiques.

Cette classification résulte de la taille des particules. Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 1 μ m et 1nm. Ils possèdent deux autres caractéristiques très importantes/ Leur rapport surface/volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présents dans l'eau. Ce phénomène explique en partie l'existence de charges électriques à leur surface. Ces charges, souvent négatives, engendrent des forces de répulsion intercolloïdales. Celles-ci permettent d'expliquer la grande stabilité de ces particules mises en solution. Leur densité, qui peut atteindre 2,5, ne modifie pas la valeur de leur vitesse de décantation [8].

III.2.2. Les particules colloïdales

Les particules colloïdales sont caractérisées par deux points essentiels : d'une part, elles ont un diamètre très faible (de 1 μm à 1 nm) - d'autre part, elles ont la particularité d'être chargées électronégativement, engendrant des forces de répulsions intercolloïdales. Ces deux points confèrent aux colloïdes une vitesse de sédimentation extrêmement faible (que l'on peut même considérer comme nulle dans le cadre du traitement de l'eau).

La coagulation floculation est un procédé permettant, en deux temps, de s'affranchir de cette absence de sédimentation. Cette technique permet de s'attaquer aux deux caractéristiques - mentionnées précédemment - rendant impossible une élimination naturelle des particules colloïdales.

Les particules en suspension dans une eau de surface proviennent de l'érosion du sol, de la dissolution de substances minérales et de la décomposition de matière organique. A cet apport naturel, s'ajoutent les eaux d'égouts domestiques, industriels ou agricoles. En général, la turbidité est causée par des particules de matière inorganique, alors que la couleur est imputable aux particules de matière organique et aux hydroxydes de métaux.

III.2.2. Les types de colloïdes

Les macromolécules organiques (protéine, sucres) constituent les particules hydrophiles. Elles présentent des groupements électronégatifs de type R-NH_2 , R-OH , R-COOH .

Ces radicaux créent des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. Ces liaisons sont essentiellement de nature électrostatique entre les atomes d'hydrogène de charge positive partielle des molécules d'eau et les éléments électronégatifs (N, O) portant une charge négative due au doublet d'électrons libres. L'énergie unitaire mise en jeu est de l'ordre de quelques kcal.moles^{-1} , soit 10 fois l'énergie des forces d'attraction de VAN DER WAALS.

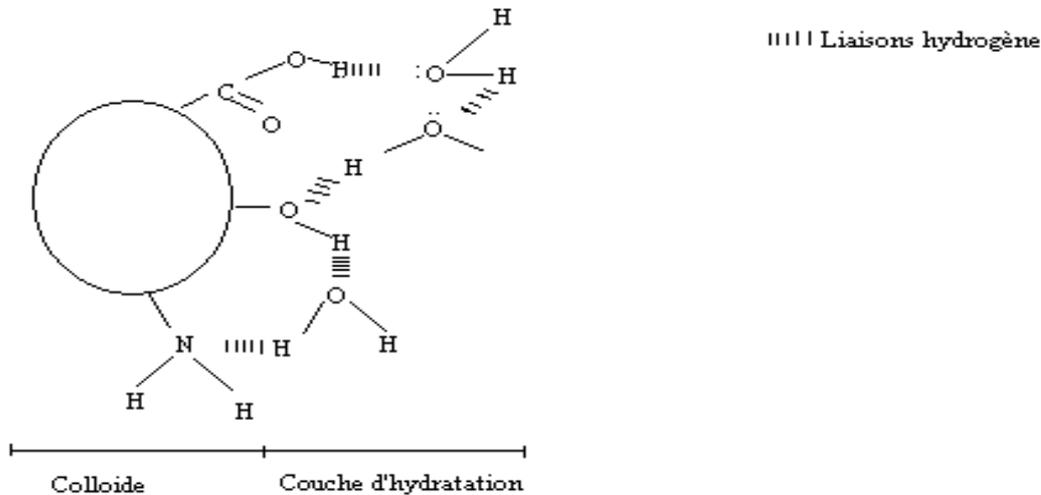


Figure III.1- Représentation du colloïde hydrophile [4].

L'épaisseur de la couche d'hydratation dépend de la température .En effet, le pourcentage de molécules d'eau liée et libre en découle directement .Les molécules d'eau libre sont disponibles pour crée des liaisons ; Les autres sous forment des amas de molécules d'eau plus ou moins importants .Voila pourquoi il est plus facile de dissoudre un composé dans de l'eau chaude.

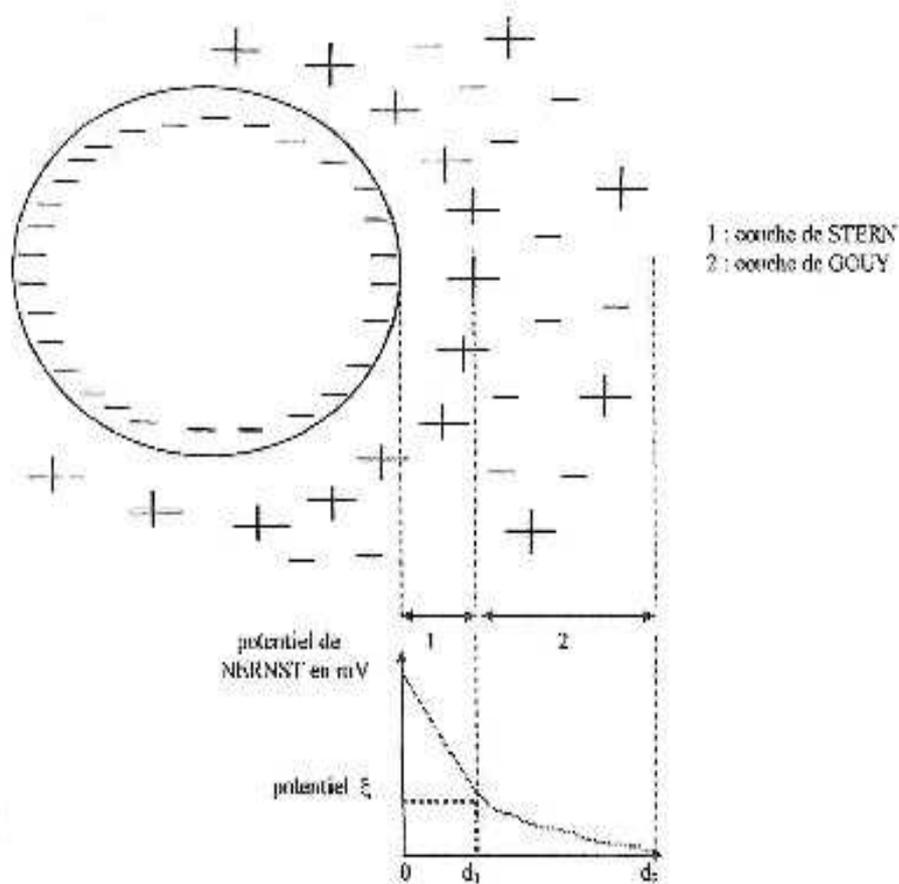
Cette couche d'hydratation s'oppose au rapprochement des particules colloïdales et constitue un facteur de stabilisation. il est à noté que les colloïdes de nature hydrophile sont responsables de la coloration des eaux .

Les colloïdes hydrophobes sont en générale de nature minérale. Ils n'ont aucune affinité pour les molécules d'eau. La formation d'une couche d'hydratation est impossible. Leur surface présente des charges négatives qui engendrent une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération. Ce type de particules est en partie responsable de la turbidité. Peu de colloïdes sont exclusivement hydrophiles ou hydrophobes .Il s'agit en fait d'un degré

d'hydratation plus ou moins important autorisé par la présence de groupement fonctionnels de type hydrophile.

III.2.3. Structure des colloïdes

Dans une eau de surface, les colloïdes portent des charges négatives situées à leur surface. Ces charges négatives attirent les ions positifs en solution dans l'eau. Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou de STERN, qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations : c'est la couche diffuse ou de GOUY. Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'une accompagnant la particule lors de ces déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard.



FigureIII.2- Distribution ionique autour d'un colloïde [4].

Il existe entre ces deux couches un potentiel électrostatique ou de NERNST, qui varie en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde.

Dans la couche liée, le potentiel de NERNST décroît linéairement car les cations constitutifs sont empilés uniformément. En revanche, dans la couche de GOUY, le potentiel électrostatique varie de manière non linéaire, étant donné que la répartition ionique résulte d'un mélange aléatoire de cations et d'anions.

La valeur du potentiel à la surface de la couche de NERNST est appelée potentiel zêta. Les colloïdes étant chargés négativement, ce potentiel est négatif. Dans les eaux naturelles, sa valeur varie de -30 à -35 mV. Les particules de potentiel zêta négatif se repoussent très fortement. C'est pourquoi, les colloïdes sont très stables et inhibent toute agglomération.

III.3. But de la coagulation – floculation

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion de produits chimiques. La floculation a pour but de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on pourra facilement éliminer par décantation.

Donc, L'opération de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floccs par absorption et agrégation. Les floccs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite (Figure III.3).

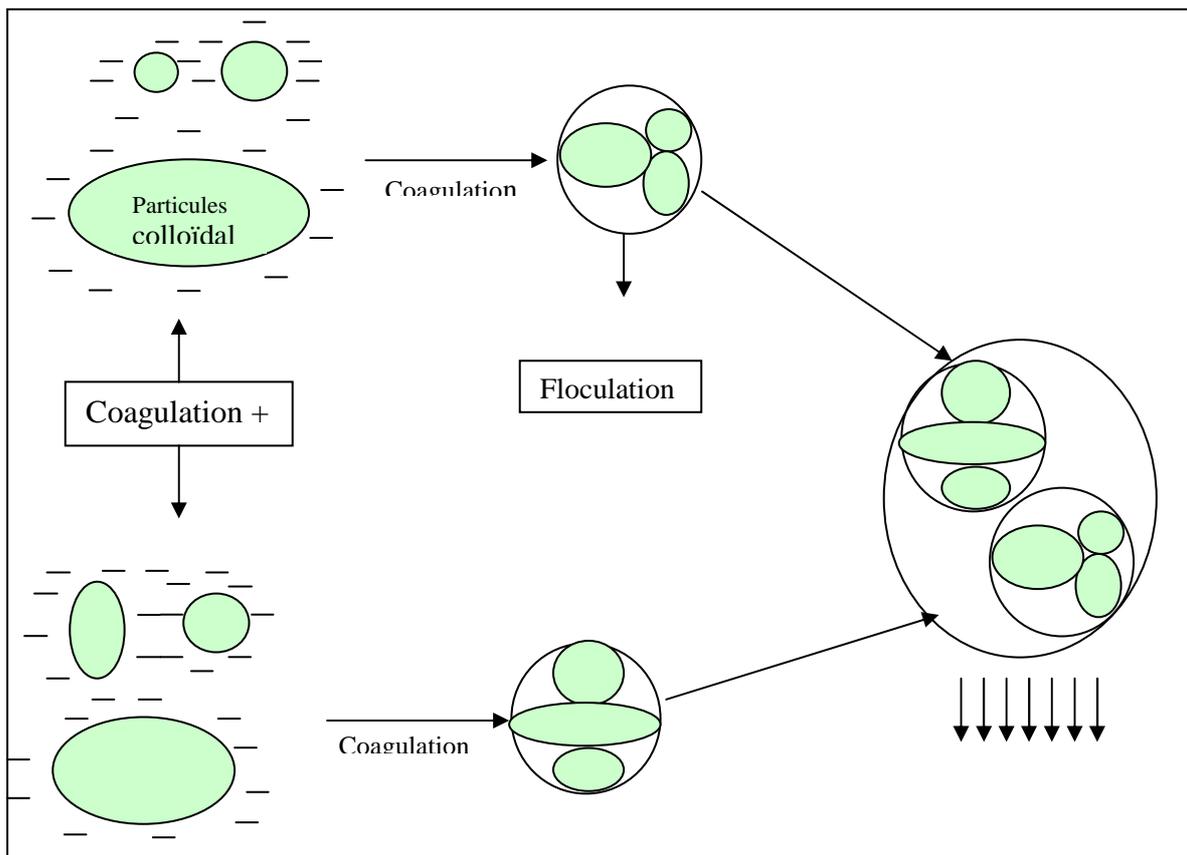


Figure III.3 - Coagulation - Floculation [8].

III.4. Phénomène de la coagulation

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les une des autres et, par conséquence, à les stabiliser dans la solution. Le but principale de coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération. On peut obtenir cette déstabilisation par:

- a) compression de la double couche;
- b) adsorption et neutralisation des charges;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité;
- d) adsorption et pontage;

III.4.1. Compression de la double couche

Lorsqu'on rapproche deux particules colloïdales semblables, leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion. La figure illustre la variation du potentiel de répulsion E_r , en fonction de la distance qui sépare deux particules. Tout comme le potentiel électrostatique, le potentiel de répulsion chute plus rapidement en fonction de la distance lorsque la force ionique est élevée.

Il existe par ailleurs un potentiel d'attraction, ou force d'attraction, E_a , entre les particules. Ces force, appelées force de Van der Waals, dépend des atomes qui constituent les particules et de la densité de ces dernières. Contrairement aux forces de répulsion, les forces de van der Waals ne sont pas affectées par les caractéristiques de la solution.

L'effet global, entre deux particules, est représenté par la résultante de ces deux forces, E , lorsque la distance qui sépare les particules est supérieure à une certaine distance critique, L (figure.III.4), La force de répulsion l'emporte : les

particules colloïdales en suspension sont continuellement en mouvement ; les particules dont l'énergie cinétique est suffisante pour surmonter le potentiel de répulsion s'agglomèrent, alors que les autres demeurent dispersées. Afin de favoriser l'agglomération des particules, on peut soit augmenter l'énergie cinétique des particules, soit réduire le potentiel de répulsion entre les particules.

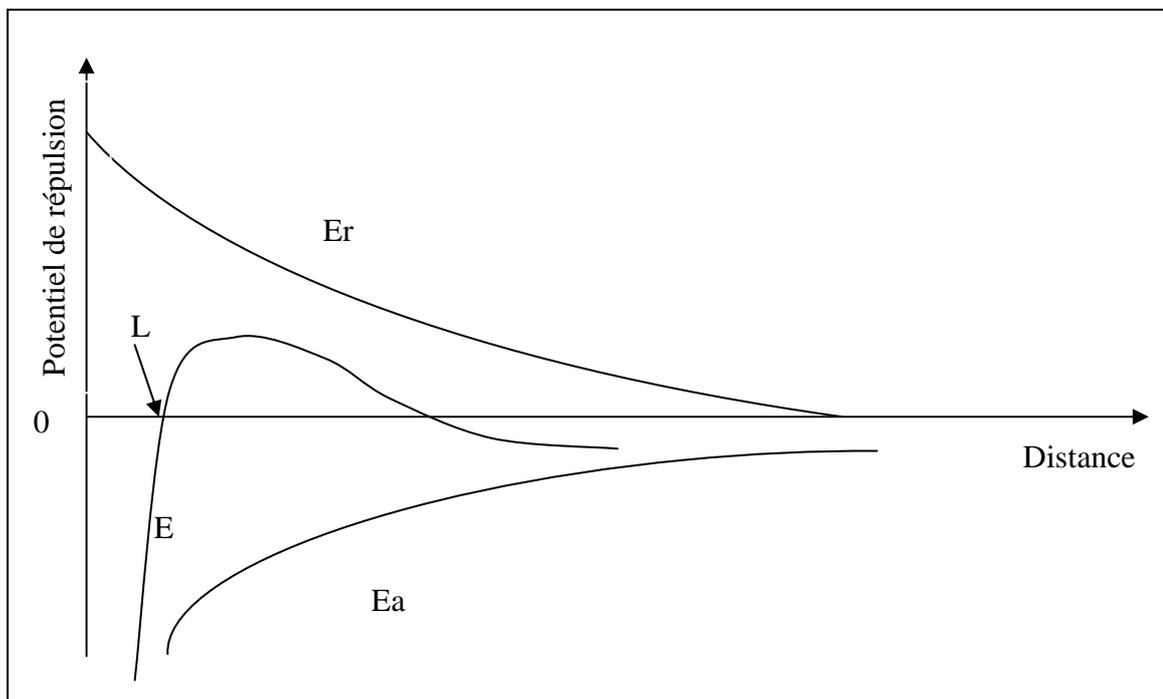


Figure III.4-Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules [14].

Pour réduire le potentiel de répulsion entre les particules, on peut augmenter la force ionique de la solution. On a observé que l'addition d'ion de charge opposée à la charge initiale était d'autant plus efficace que la charge de ces ions était élevée. Ainsi, les concentrations de Na^+ , Ca^{+2} et Al^{+3} requises pour déstabiliser une suspension de particules colloïdales négatives varient approximativement dans des rapports de $1:10^{-2} : 10^{-3}$. Par ailleurs, en augmentant la force ionique d'une eau, on comprime la couche diffuse vers la particule. Dans la zone située près de la particule, les forces de van der Waals sont alors assez importantes pour neutraliser la force de répulsion (Fig.III.5). toutefois, la

théorie de la compression de la double couche n'explique pas à elle seule tous les phénomènes observés lors de la déstabilisation des particules lorsqu'on augmente la quantité de coagulant, phénomène qu'on ne peut pas expliquer à l'aide de la théorie de la compression de la double couche.

III.4.2. Adsorption et neutralisation des charges

On peut tout fois expliquer la renstabilisation des particules colloïdales en posant l'hypothèse que des charges issues d'un surplus de coagulant sont adsorbées à la surface des particules. Les particules colloïdales ainsi renstabilisées possèdent alors une charge inversée, ce qui est contraire au but recherché.

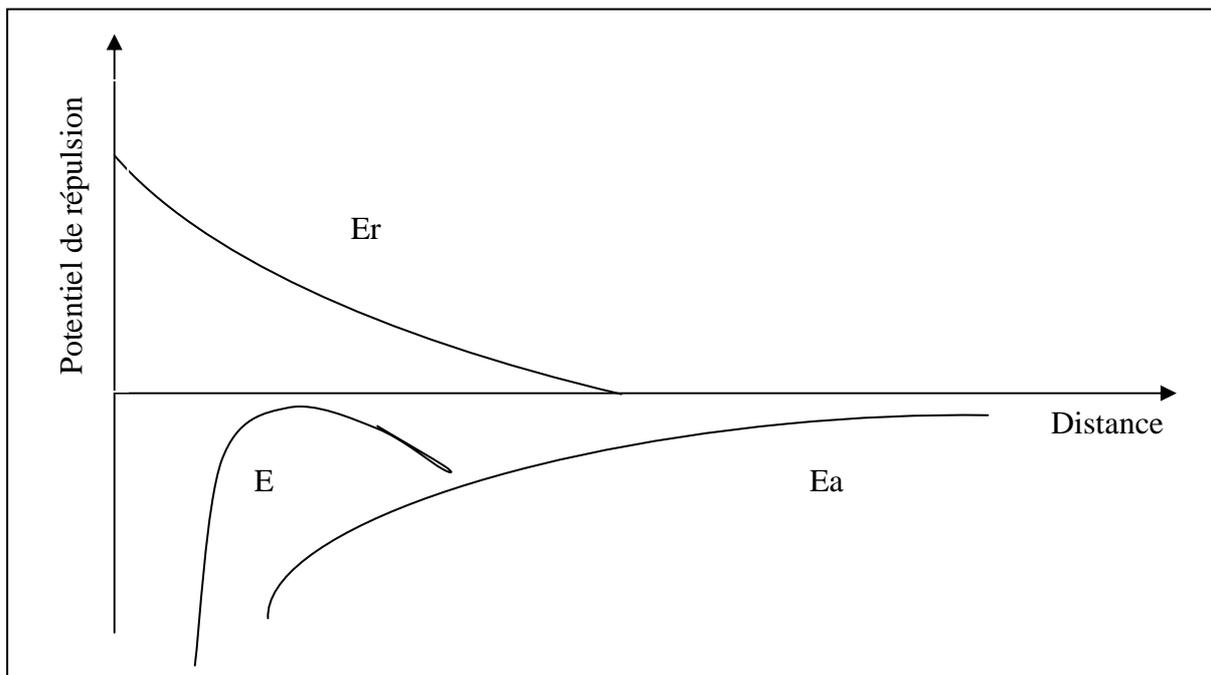


Figure III.5-Variation du potentiel de répulsion en fonction de la distance qui sépare deux particules, après compression de la double couche [14].

III.4.3. Emprisonnement des particules dans un précipité

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner dans une particule floc lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des

coagulants , habituellement des sels de métaux trivalents , $Al_2(SO_4)_3$ ou $FeCl_3$,on obtient un précipité appelé floc .Lorsque le pH de l'eau est situé dans une plage acide ou neutre , le floc, constitué de molécules de $Al(OH)_3$ ou de $Fe(OH)_3$,possède habituellement une charge positive .La présence de certains anions et de particules colloïdal accélère la formation du précipité . Les particules colloïdales-les jouent le rôle de noyaux lors de la formation du floc; ce phénomène peut entraîner une relation inverse la turbidité et la quantité de coagulant requise. En d'autre mots, une concentration importante de particules en suspension peut entraîner une diminution de la quantité de coagulant nécessaire.

III.4.4. Adsorption et pontage

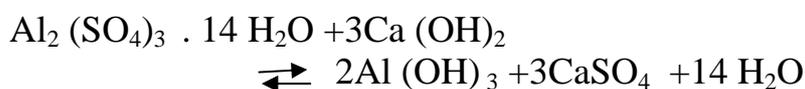
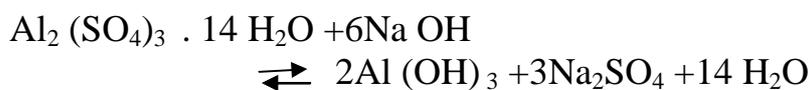
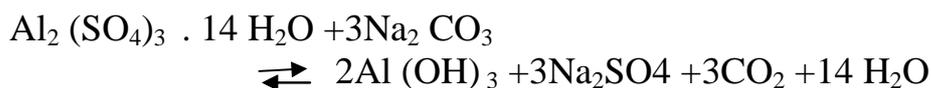
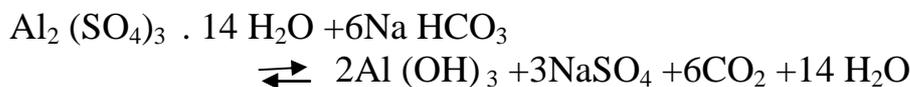
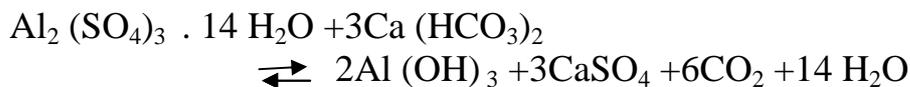
Dans quelques cas , on a obtenue le traitement le plus économique en utilisant un polymère anionique lorsque les particules étaient chargées négativement .Ce phénomène ,inexplicable à l'aide de la théorie électrique , peut toutefois être explique par le "pontage" .les molécules de polymère ,très longue contiennent des groupes chimique qui peuvent adsorber des particule colloïdale à une de ses extrémité ,alors que d'autre sites sont libre pour adsorber d'autre particules .On dit alors que les molécules polymères forment des "ponts" entre les particules colloïdal .Il peut y avoir restabilisation de la suspension , imputable à une concentration excessive de polymères de polymères s'accrochent à une même particules colloïdale .Cet ensemble particule –molécule de polymères ne peut plus par la suite absorber d'autres particules colloïdal , ce qui est encore contraire au but recherché.

III.4.5. Coagulants utilisés

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et pour produire un floc sont : le sulfate d'alumine, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$, l'aluminate de

sodium, NaAlO_2 , le chlorure d'aluminium, AlCl_3 , le chlorure ferrique, FeCl_3 , le sulfate ferrique, $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$, le sulfate ferreux, FeSO_4 , le sulfate de cuivre, CuSO_4 , et les polyélectrolytes. Les produits les plus utilisés pour la purification des eaux sont les sels d'aluminium et de fer. On a longtemps pensé que ces sels libéraient des ions Al^{+3} et Fe^{+3} qui neutralisaient la force de répulsion entre les particules colloïdales et favorisaient ainsi la coagulation. On sait maintenant que le mécanisme qui entrent en jeu sont plus complexes et que les produits d'hydrolyse des sels d'aluminium et de fer sont des coagulants plus efficaces que les ions eux-mêmes.

Lorsqu'on additionne à l'eau les sels d'aluminium ou de fer, ces derniers réagissent avec l'alcalinité de l'eau et produisent des hydroxydes, $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$, insolubles et formant un précipité. Les principales réactions de l'alun sont:



On peut montrer, à partir des équations chimiques ci-dessus, que 1mg/L d'alun,

$\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ réagit avec 0.50mg/L d'alcalinité (exprimée en CaCO_3).pour conserver à l'eau son alcalinité, on peut ajouter 0.33mg/L de chaux vive, CaO , à 85 %

De pureté ; 0.39mg/L de chaux éteinte, $\text{Ca} (\text{OH})_2$,à 95% de pureté ; ou 0.54mg/L de cendre de soude , Na_2CO_3 .Dans la plupart des cas , cependant , il permette une coagulation optimale .

En fait, les réactions chimiques sont beaucoup plus complexes que celles présentées ci-dessus .La réaction des sels de métaux avec l'eau engendre en effet un ensemble de produits complexes qui, par différents moyens, déstabilisent particules colloïdales et favorisent leur agglomération [14].

III.4.6. Facteurs influençant la coagulation

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelations, comme le pH, les sels dissous, la température de l'eau, le coagulant utilisé, les condition de mélange, la turbidité et la couleur .Ces interrelation complexes interdisent actuellement toute approche théorique permettant de prédire quelle sont les concentrations optimales de coagulants.

III.4.6.1. Influence du pH

Le pH est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité [8].

Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH optimales s'étendent respectivement de 4 à 6 et de 5 à 7. Pour certaines eaux, il faut parfois corriger le pH à l'aide de divers produits (acides, chaux ou soude). Pour abaisser le pH, il

est plus avantageux, dans certains cas, d'augmenter la quantité de coagulant. Lorsque le pH est optimal, les produits solubles d'aluminium ou de fer sont pratiquement inexistantes.

III.4.6.2. Influence des sels dissous

Les sels contenus dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la floculation :

- a) modification de la plage de pH optimale;
- b) modification du temps requis pour la floculation;
- c) modification de la quantité de coagulant requis;
- d) modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

On a constaté que l'addition d'ions sulfates, SO_4^{2-} , élargissait la plage de pH optimale vers l'acidité, alors que l'addition d'orthophosphates, sans l'élargir, la plage de pH optimale vers l'acidité.

A partir d'observations expérimentales, on peut par ailleurs affirmer que :

- a) La coagulation à l'aide de sels d'aluminium ou de fer est davantage affectée par les anions que par les cations. Ainsi, les ions sodium, calcium et magnésium exercent une influence minime sur la coagulation;
- b) Les anions élargissent vers l'acidité la plage de pH optimale. Cette influence est d'autant plus marquée que la valence des anions est élevée.

III.4.6.3. Influence de la température de l'eau

On dispose de peu d'informations en ce qui concerne l'influence de la température de l'eau sur la coagulation. Toutefois, l'expérience révèle que durant l'hiver, lorsque la température de l'eau avoisine 0°C , le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres.

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité; c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc. De plus, pour une même vitesse de filtration, les forces de cisaillement qui s'exercent sur le floc sont plus importantes, ce qui en favorise le bris et l'entraînement dans le filtre. On constate en outre que la plage de pH optimale se rétrécit. On peut surmonter de diverses manières les difficultés dues à une diminution de la température de l'eau:

- a) On effectue la coagulation dans la plage de pH optimale pour cette eau à cette température.
- b) On augmente la quantité de coagulant, ce qui a pour effet d'accroître la probabilité de collisions entre les particules et d'élargir la plage de pH optimale.
- c) On augmente la turbidité de l'eau (par addition de glaise), afin d'alourdir le floc, ou on ajoute un aide-coagulant (silice activée ou polyélectrolyte) pour alourdir et renforcer le floc.

III.4.6.4. Influence du coagulant

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation. Ainsi, même si l'alun est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimale plus large que celle due à l'alun. De plus, pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais en laboratoire. La théorie qui explique les différents mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales n'est pas suffisamment développée pour qu'on puisse résoudre un problème aussi complexe. Cette théorie est cependant très utile aux

moments de la planification des aussi complexe .Cette théorie est cependant très utile aux moments de la planification des essais de laboratoire et de l'interprétation des résultats obtenus.

III.4.6.5. Influence du mélange

Au cours de la coagulation et de la floculation , on procède au mélange des produits chimiques en deux étape .A la première étape , le mélange est énergique et de courte durée (120s au maximum) : c'est le mélange rapide .Ce mélange a pour but principal de disperser les produits dans la totalité du volume d'eau à traiter .On effectue le mélange rapide en injectant les produits chimique dans une zone de forte turbulence ou en utilisant des équipement de mélange mécanique .Un mélange rapide inadéquat entraîne en général un accroissement de la quantité de produits chimique nécessaires.

A la deuxième étape, le mélange est lent et il a pour but de favoriser les contacts entre les particules de floc, de turbidité et de couleur. Cependant, le mélange doit être suffisamment énergique pour engendrer des différence de vitesse de l'eau dans le bassins, mais pas trop .En effet risquent de briser ce dernier, même si la durée du mélange dans un bassin de floculation peut n'être que de 10min (elle varie en général de 30à 60min).

III.4.6.6. Influence De la turbidité

La turbidité des eaux de surface en grande partie due à la présence de particules de glaise dont le diamètre varié de 0,2 à 0,5 μ m. Il s'agit donc la de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement .la coagulation de ces particules set assez facile à réaliser lorsqu'on maintien le pH dans sa plage optimale. On peut faire par ailleurs les constations générales suivantes :

- a) Il faut ajouter une concentration minimale de coagulant pour obtenir une certaine quantité de floc.
- b) Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration de coagulant. L'augmentation de la quantité de coagulant ne varie toutefois pas de façon linéaire en fonction de l'augmentation de la turbidité.
- c) Lorsque la turbidité est très élevée, la quantité de coagulant nécessaire est relativement faible, car la probabilité de collision entre les particules est très élevée. Par contre, lorsque la turbidité est faible, la coagulation est difficile.
- d) La matière organique adsorbée sur les particules de glaise n'exerce aucune influence sur la quantité de coagulant nécessaire.
- e) Lorsque la turbidité est due à des particules de diamètres variés, il est plus facile d'effectuer la coagulation que lorsqu'elle est imputable à des particules de diamètre sensiblement égaux.
- f) La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau.
- g) Il est toujours plus difficile de coaguler les eaux contaminées par des eaux d'égout domestiques et industrielles, car elle exigent des concentrations de coagulant plus importantes que les eaux non contaminées.

III.4.6.7. Coagulation de la couleur

En général, la couleur d'une eau est due à la décomposition de matières organiques contenues dans l'humus des sols. Elle dépend donc d'une grande variété de composés organique, dont les substances humiques, lesquelles sont des polymères dont la masse moléculaire varie de 800 à 50000.

Des études ont révèlent que 90% des particules responsables de la couleur avaient un diamètre supérieur à 3.5 nm ; ces particules sont donc des particules

colloïdal-les beaucoup plus petites que les particules de glaise responsable de la turbidité (rappelons que le diamètre des particules de glaise est de l'ordre $1\mu\text{m}$). La plus part des particule responsable de la couleur possèdent des charge négatives à leur surface, dont l'intensité dépend du degré d'ionisation et du pH de l'eau.

En résumé, on peut dire que les particules responsables de la couleur sont de natures organiques, hydrophiles, petites et chargées négativement.

Les mécanismes qui permettent l'élimination de la couleur ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour celle de la turbidité .La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale : pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée .Le pH optimale pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6 , alors que le pH optimal pour celle de la turbidité varie entre 6,5et 7,5 .Le pH optimal pour l'élimination de la couleur étant faible , on doit , dans certains cas , le rehausser avant la filtration , afin de faire précipiter les composés de fer et d'aluminium , qui sont solubles à des pH faibles [14].

III.5. Phénomène de la floculation

III.5.1. Théorie de la floculation

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres, c'est la floculation.

Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers .La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts les particules, lesquelles sont provoquées par la différence de vitesse entre ces particules.

L'expression de SMOLUCHOWSKI permet de comprendre ce phénomène .La formulation est la suivante:

$$\ln \frac{N}{N_0} = - \frac{4}{\Pi} \Gamma \Omega G t \quad (\text{III.1})$$

Où:

N, N₀: Concentration totale des particules en suspension à l'instant t et t₀ (nombre de particules /m³).

Γ: Facteur qui rend compte de l'efficacité des collision (nombre de collisions effectives / nombre de collisions totales, une collision effective étant une collision qui entraîne l'agrégation des deux particules).

Ω: le volume de particules par le volume de suspension.

G: gradient de vitesse (s⁻¹).

t : le temps de contact.

Si le paramètre Γ est égale à 1, un choc interarticulaire donne une agglomération donc une floculation .L'élément Ω est constant, sauf intervention extérieure, car il n'y a ni création ni disparition de matière. Le gradient de vitesse G n'est q'une valeur moyenne des vitesses spécifiques des particules dans la solution .La floculation est de qualité si le rapport $\ln \frac{N}{N_0}$ est petit .Dans ce cas, N est inférieur à N₀ .Il y a donc moins de particules libres au temps t₀ .Toute augmentation des paramètres énoncés entraîne une diminution ce rapport.

La stratégie pour obtenir une bonne floculation se résume en une augmentation des facteurs temps de contact t, du volume de particules Ω et du gradient de vitesse G. L'importance relative de chacun de ces paramètres est, en première intention, la même .On comprend alors l'importance de l'agitation qui augmente le facteur G lors de la floculation.

Toute injection de particules supplémentaires de type microsable ou toute traversée de lit de boues par les colloïdes déstabilisés, augmente

considérablement Ω . Le rapport $\ln \frac{N}{N_0}$ diminue en raison du signe moins. Le nombre de particules libres N à l'instant t est donc inférieur à N_0 . La floculation est alors de qualité.

Toutes les techniques de floculation applique l'un et /ou l'autre de ces principes.

On distingue la floculation péricinétique due à l'agitation désordonnée des particules et la floculation orthocinétique provoquée par les mouvements de l'eau. Cette floculation est fonction du gradient de vitesse conféré au milieu par agitation. Elle est responsable en grand partie du phénomène de floculation [4].

III. 5.1.1. Floculation péricinétique

En cas de floculation péricinétique, F_p , les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien. On peut exprimer le taux de variation de concentration des particules à l'équation suivante:

$$F_p = \frac{dN}{dt} = -\frac{4\Gamma k \theta (N)^2}{3\eta} \quad (\text{III.2})$$

Où

K : constante de boltzmann (1.38×10^{-23} J. K^{-1})

Θ : température absolue (K)

η : viscosité dynamique de l'eau (Pa . s)

Après intégration et en posant $N = N_0$ à $t = 0$, on obtient

$$N = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{4\Gamma k \theta N_0}{3\eta}\right)t} \quad (\text{III.3})$$

Par ailleurs, on pose

$$t_{1/2} = \frac{3\eta}{4\Gamma k \theta N_0} \quad (\text{III.4})$$

En combinant les équations (III.3) et (III.4), on a

$$N = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{t}{t_{1/2}}\right)}$$

Où $t_{1/2}$: temps nécessaire pour que la concentration des particules en suspension soit réduite de moitié.

Pour une à 25°C, on obtient par exemple

$$t_{1/2} = \frac{1.6 \times 10^{17}}{\Gamma N_0} \quad (\text{III.5})$$

Dans cette équation, $t_{1/2}$ est exprimé en secondes et N_0 en nombre de particules par m^3 , Γ étant sans dimension.

On remarque que $t_{1/2}$ est fonction de l'efficacité des collision et du nombre initial de particules .Ainsi, si le nombre initial de particules est faible (concentration faible) et si Γ est petit (déstabilisation inefficace), $t_{1/2}$ peut prendre une très grande valeur.

III.5.1.2. Flocculation orthocinétique

On appelle flocculation orthocinétique, F_0 , la flocculation provoquée par l'agitation de l'eau. L'agitation facilite l'agrégation en augmentant la probabilité des collisions entre les particules .la vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps .On caractérise la variation de la vitesse du fluide dans l'espace à l'aide de l'équation suivante :

$$F_0 = \frac{dN}{dt} = -\frac{2\Gamma G d^3 (NN_0)}{3} \quad (\text{III.6})$$

Où

d: diamètre des particules (m)

Après intégration, et en posant $N = N_0$ à $t= 0$ et $N =N$ à $t = t$, on obtient

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -4\Gamma Gt\left(\frac{\pi d^3 N_0}{6}\right) \quad (\text{III.7})$$

On remarque que $(\pi d^3 N_0 / 6)$ est le volume total de particules par unité de volume de solution.

Pour comparer la floculation péricinétique, F_p , à la floculation orthocinétique, F_0 , on divise l'équation (III.6) par l'équation (III.2); on obtient

$$\frac{F_0}{F_p} = \left(-\frac{2\Gamma Gd^3(N)^2}{3}\right) \div \left(-\frac{4\Gamma k\theta(N)^2}{3\eta}\right) \quad (\text{III.8})$$

$$= \frac{\eta Gd^3}{2k\theta} \quad (\text{III.9})$$

On peut, à l'aide de l'équation (III.9), calculer la valeur du gradient de vitesse, G , pour laquelle le taux de floculation péricinétique est égal au taux de floculation orthocinétique ($F_0/F_p = 1$). La figure III.6 illustre les valeurs de G qui permettent d'obtenir ce rapport pour différents diamètres de particules et pour une eau à 20°C. On constate que, pour de petites particules, la valeur de G doit être élevée, c'est-à-dire que l'agitation doit être énergique, si l'on souhaite obtenir une floculation orthocinétique équivalente à la floculation péricinétique. Par contre, lorsque les particules sont assez grosses, une agitation relativement orthocinétique.

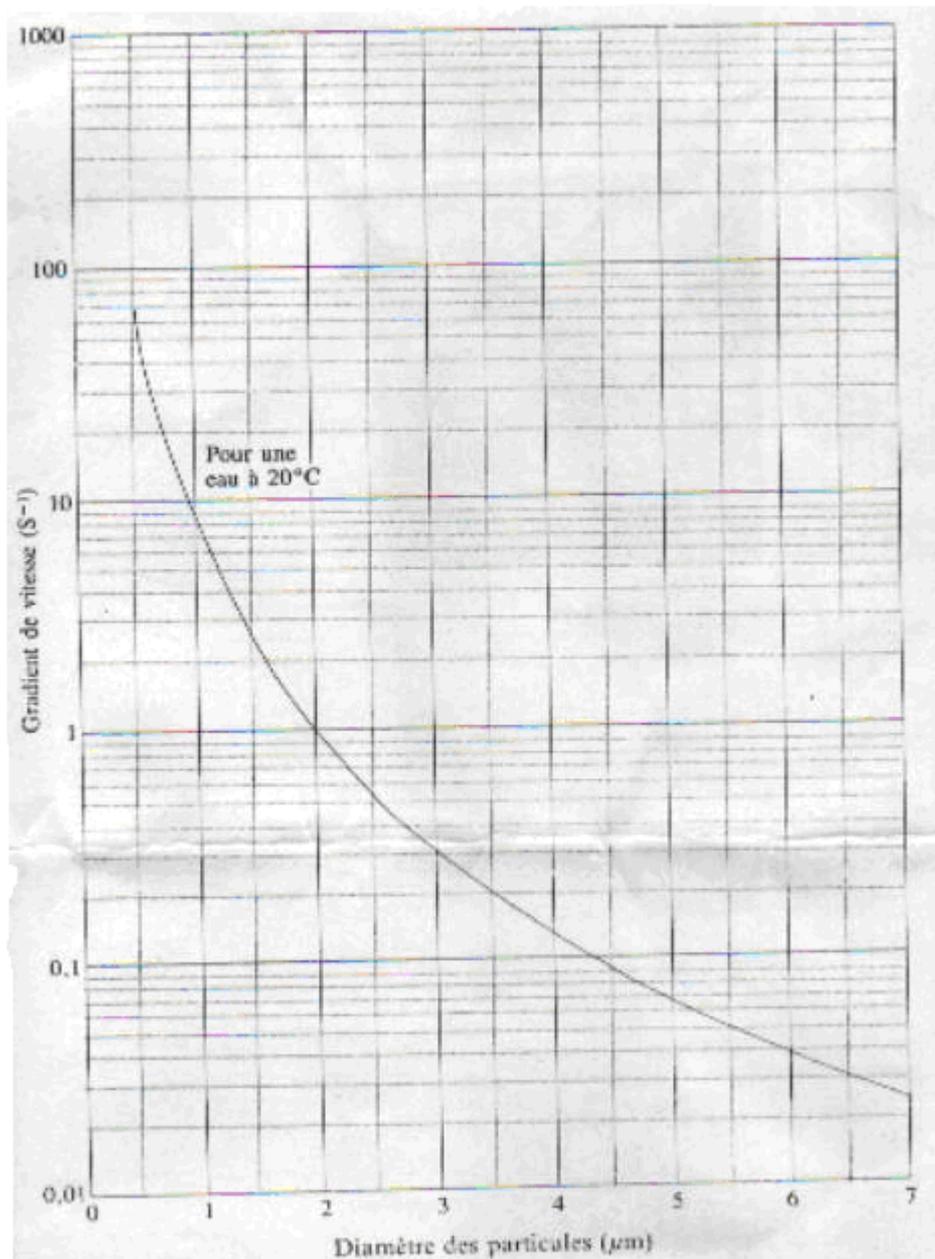


Figure III.6 - Variation de gradient de vitesse, G , en fonction du diamètre des particules.

III.5.2. Nature des flocculants

Les flocculants sont des composés agissant par pontage. Il s'agit de polymères à haut poids moléculaire présentant des groupes réactionnels de

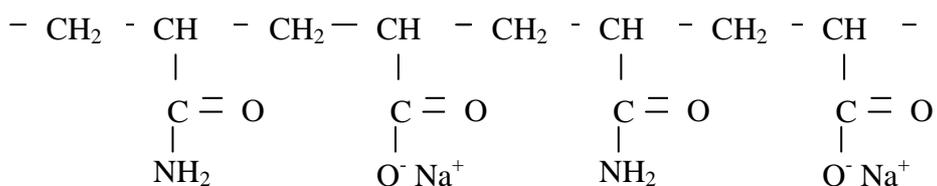
charge inverse de celle de la suspension à traiter. On distingue des flocculants naturels et synthétiques.

Les polymères synthétiques se répartissent en polyanions, polycations, non ioniques et amphotères. Ce sont des polymères de type polyacrylate. Toutes ces molécules se définissent par leur poids moléculaire (PM). Un PM élevé est caractéristique de polymères à longue chaîne. Les polymères chargés, ou polyélectrolytes, se définissent également par leur densité de charge (DC). De nombreuses charges électriques neutralisantes procurent une forte DC.

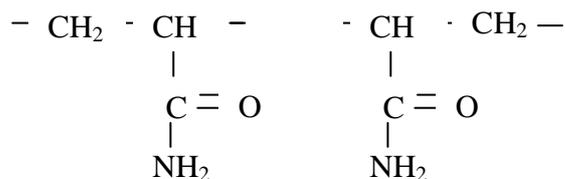
On distingue comme flocculants naturels, ceux de nature organique comme l'alginate ou aqualgine extraits des algues et l'amidon G 60 issu de la pomme de terre ou du tapioca et ceux de nature minérale telles que la silice activée, l'alumine et la bentonite. *Laminaria digitata* est l'algue la plus utilisée pour la production d'alginate.

Les flocculants synthétiques sont très nombreux. On peut obtenir des fabricants la formule que l'on désire. Ils se regroupent en trois grandes catégories.

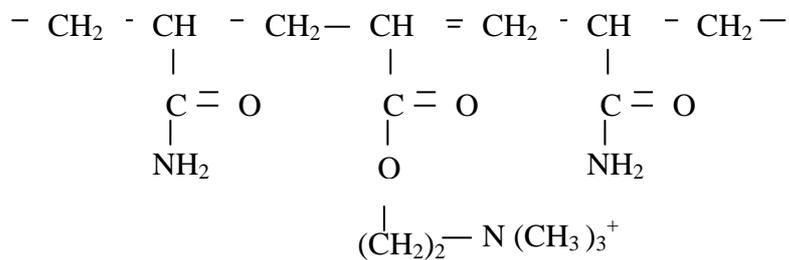
Polymères anioniques obtenus par polymérisation d'un acrylamide ou d'un acide acrylique :



Polymères neutres qui regroupent essentiellement des polyacrylamides:



Polymères cationique ou copolymères d'acrylamide avec monomeres cationiques:



Leur poids moléculaire est compris entre 10^5 à $20 \cdot 10^6$ daltons, leurs chaînes polymérisées de longueur maximale $40\mu\text{m}$, peuvent être linéaires, spiralées en zigzag ou branchées .Ces polymères peuvent être préparés sur mesure : toutes les valeurs de PM et de DC sont possibles . Les produits agréés pour l'utilisation en eau potable doivent contenir moins de 500ppm d'acrylamide libre [4].

III.5.3. Processus de la floculation

Les polyanioniques agissent par pontage en association avec les cations bivalents du milieu tels que les ions Ca^{+2} et Mg^{+2} . Dans ce cas, le titre hydrotimétrique de l'eau est essentiel .On ne l'ajoute qu'en fin de floculation lorsque les microflocs sont formés.

Les polycationique agissent directement par leurs charge positive .Elle neutralisent les charge primaires des colloïdes qui ont échappé au coagulant .Il faut les ajouter juste après la phase d'agitation rapide (coagulation).

On considère que l'adsorption de la chaîne de polymère sur la surface du colloïde est solide quand au mois 50% de cette surface est occupée par 70% de la longueur des molécules de flocculant .Les 30% restants forment des boucles et des queues qui réalisent le pontage intercolloïdes. Pour respecter cette condition, la chaîne de polymère doit présenter un PM élevé et une DC faible .Dans le cas contraire, les molécules de flocculant sont trop courtes et trop riches en charges .En conséquence, 100% du polymère s'adsorbe à plat sans boucles déstabilisée

grâce à leurs acides α -L-guluroniques et β -D-mannuroniques .L'effet de pontage est renforcé par les ions Ca^{2+} qui permettent la formation d'un réseau maillé.

On appelle traitement primaire physico-chimique la mise en œuvre de coagulant dans le traitement des eaux usées. La demande chimique en oxygène (DCO) d'une eau résiduaire se répartit dans les proportions de 1/3 de MES décantations, de 1/3 de colloïdes et 1/3 granulométrique .L'addition d'un coagulant provoqué un transfert de la population granulométrique. Les colloïdes de taille comprise entre 1nm et 1 μ m floccule pour donner des particules dont le diamètre entre dans la fourchette 1 μ m-1mm. Leur vitesse limite de sédimentation frôle alors 30 m.h⁻³. Leur décantation ne pose plus de problèmes.

L'évolution de la répartition relative des populations granulométriques permet d'évaluer avec précision l'efficacité du traitement. L'eau brute présente une valeur en DCO de 350 g.m⁻³ avec la répartition précédente. Un décantation primaire élimine une grande partie des MES. Les composés solubles et colloïdaux voient leur proportion augmenter. Seul un traitement physico-chimique alliant coagulation, élimine la fraction colloïdale. La DCO de l'eau décantée est réduite est réduite de 70% pour atteindre 100 g.m⁻³.

III.6. Technologie de la coagulation –floculation

III.6.1. Stratégie

Il faut associer dans un temps assez court, deux phases distinctes et incompatibles.

En effet, les conditions de mise en ouvre de la coagulation sont différent de celle de la floculation .On distingue les deux phases suivantes :

- 1 ère phase : mélange rapide et vigoureux.
- 2 ème phase: mélange lent.

Dans un premier temps, un mélange rapide est nécessaire pour disposer les additifs dans la totalité du volume d'eau à traiter .L'injection se fait dans une zone de turbulence créée par des chicanes ou par des mélange mécanique avec des pales ou hélices .La deuxième phase favorise les contacts entre les particule de floc sans les léser .Le mélange doit être néanmoins assez énergétique pour engendrer des différences de vitesse dans le bassin nécessaire à la rencontres des particules.

Le CYCLOFLOC, procédé hongrois, met en œuvre une floculation lestée avec du microsable .Cette technique permet d'augmenter le facteur Ω de l'équation de SMOLUCHWSKI. Le microsable de 20 à 40 μ m de diamètre joue le rôle d'amorce de floculation et leste les MES et colloïdes .La décantation est améliorée car la densité du sable est de l'ordre de 1,65. Les décanteurs Actiflo d'OTV et Fluorapid de DEGREMONT reprennent cette technique [6].

III.6.2. Choix du coagulant

Les critères de choix d'un coagulant sont nombreux .Son efficacité à réduire la couleur, la turbidité et les matières organiques d'une eau est essentielle .On ne peut, néanmoins, négliger son prix et les effets secondaires comme les fuites en Fe^{3+} et Al^{3+} . Il faut savoir que le chlorure ferrique contient du manganèse sous forme de Mn^{2+} à raison de 0,057 g pour 100 g de coagulant .Le traitement d'eau chargée en matières organiques exige du chlorure ferrique .Les coagulants à base de sels d'aluminium permettent d'obtenir une eau traitée très faible en turbidité .La vérification de la dose de coagulant à mettre en œuvre passe par le JAR-TEST .En analyse continue , la quantité de matières organiques déterminée à 254 nm , permet d'obtenir le taux optimum de traitement du coagulant.

Nom commercial	Masse molaire	Densité	Forme	Formule	Apport en M_2O_3	Remarque
----------------	---------------	---------	-------	---------	--------------------	----------

SELS ALUMINIUM

Sulfate d'alumine	666	-	solide	$Al_2(SO_4)_3, 18 H_2O$	17 à 18	Poudre irritante
Sulfate d'alumine	654	1,45	liquide		8,2	Liquide corrosif
Polychlorosulfate basique d'aluminium	-	1,2	liquide	$Al_n(OH)_m(SO_4)_k Cl_{3n-m-2k}$		

SEL DE FER

Chlorure ferrique	162,5	1,45	liquide	$FeCl_3$	41% Fe	Réactif acide
Sulfate ferrique	278	-	Poudre	$FeSO_4, 7 H_2O$	20% Fe	

Chlorosulfate ferrique	187	1,5	liquide	FeClSO ₄	14% Fe	Réactif acide
------------------------	-----	-----	---------	---------------------	--------	---------------

Tableau III.1- Caractéristique de quelques coagulants [4].

Les sels d'aluminium sont très largement utilisés dans le domaine de l'eau potable. Les sels de fer sont plutôt destinés aux eaux résiduaires et en particulier pour l'élimination physico-chimique du phosphore .Le chlorure ferrique a sa place dans les filières de traitement des boues hydroxydes ou organiques.

Chapitre IV

La cinétique de sédimentation des particules

Chapitre IV. La cinétique de sédimentation des particules

IV.1. Introduction	51
IV.2. Types de décantation	52
IV.3. Vitesse de décantation des particules dans un liquide	53
IV.3.1. Particules isolées de forme sphérique	53
IV.3.2. Particules réelles	57
IV.3.3. Cas de suspension concentrée	58
IV.3.4. Paramètre intervenant dans le processus de décantation.....	59
IV.4. Conclusion	60

IV.1.Introduction

La séparation des phases solides et liquides d'une suspension comprend généralement deux étapes. La première étape physico-chimique implique la conversion des petites particules non flocculées du colloïde en de plus grosses particules (Chapitre 3) afin d'obtenir deux phases distinctes : un surnageant clair et propre, et une phase solide composée de particules plus grosses et plus facile à décantier. Cette opération est effectuée par l'ajout d'agents flocculants, une étape importante puisqu'elle permet d'établir les conditions requises pour que la seconde étape soit efficace.

La décantation est une opération unitaire, parmi les techniques de séparation liquide - solide basée sur le phénomène de sédimentation, qui consiste à séparer d'un liquide les particules en suspension en utilisant les forces gravitaires, pour qu'il puisse y avoir séparation effective faut-il encore que les forces de gravité soient suffisamment élevées par rapport aux effets antagoniste : effet de frottement, champ de turbulence, répulsion électrostatique courant de convection, etc. ...

Toutes les constructions de décanteurs modernes conçues pour clarifier l'eau sont en état dynamique, car la décantation des matières en suspension se passe pendant l'écoulement continu de l'eau de l'entrée à la sortie.

Par ailleurs la vitesse d'écoulement d'eau dans les décanteurs doit être très faible pour ne pas perturber la décantation des particules en suspension par le mouvement et des turbulence de l'eau.

Dans cette section seront décrits dans l'ordre, les différents types de décantation, les différentes forces agissant sur les particules, le calcul des vitesses de sédimentation des particules durant le procédé de décantation, le phénomène de la sédimentation .

IV.2. Types de décantation

Selon la concentration en solide et la nature des particules (densité et forme) on distingue 4 types de décantation [14].

Type 1 : décantation de particules discrètes

Ce type de décantation (dite discrète ou individuelle) est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physique initiales (forme, dimension et densité au cours de leur chute). La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solides ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici, on retrouve ce type de décantation dans les dessableurs.

Type 2 : Décantation de particules floculantes

Ce type est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leurs chutes. Les propriétés physiques de ces particules sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration.

Type 3 : Décantation freinée (en piston)

Ce type est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et, par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant, on retrouve ce type de décantation dans la partie profonde des décanteurs.

Type 4 : Décantation en compression de boue

Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les une avec les autres et reposent sur les couches inférieures, dans cette zone le phénomène

de consolidation est relativement lent, en retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues par gravité.

IV.3. Vitesse de décantation des particules dans un liquide

IV.3.1. Particules isolées de forme sphérique

Lorsque la concentration en volume des solides en suspension est inférieure à 0,5% ; on considère que les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres et que, de ce fait, chacune d'entre elle sédimente comme si elle était isolée dans le liquide.

Dans un fluide, un solide en mouvement libre est soumis à :

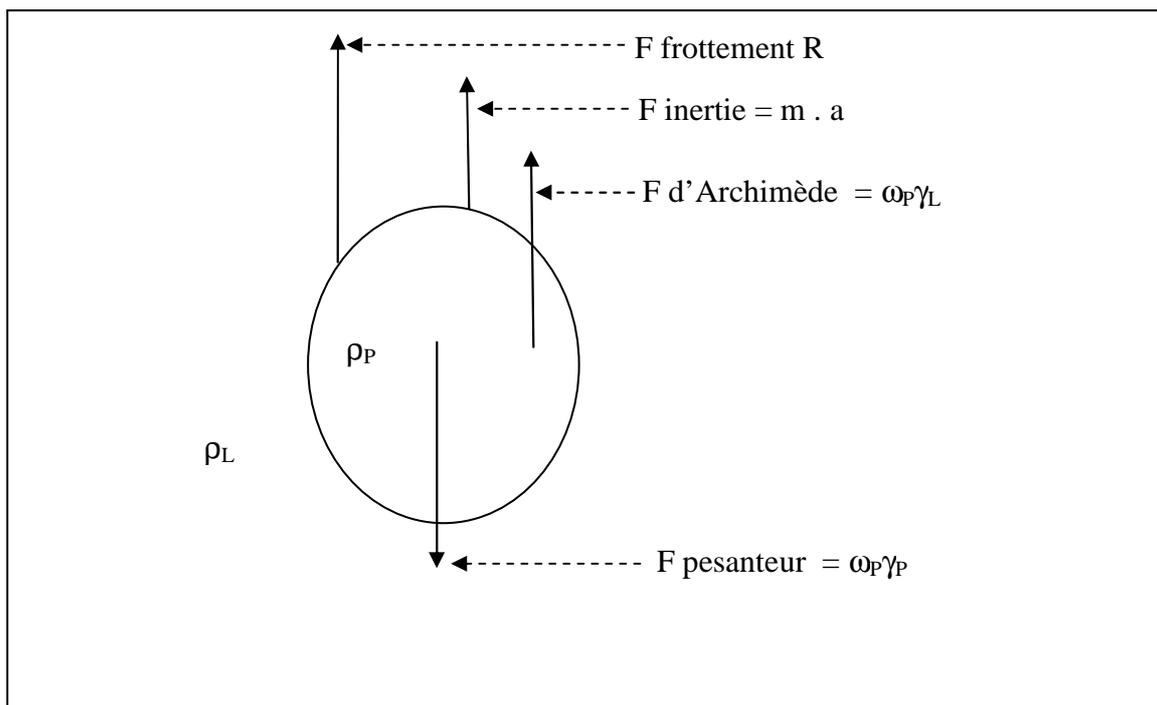


Figure IV.1- Forces agissant sur une particule en eau [14].

- La pesanteur : $G = \omega_P \cdot \rho_P \cdot g = \omega_P \cdot \gamma_P$
- la poussée d'Archimède : $\omega_P \cdot \rho_L \cdot g = \omega_P \cdot \gamma_L$
- la résistance à l'avancement : $R = \frac{C_D}{2} \cdot S_P \cdot \rho_L \cdot V_C^2$

- la force d'inertie : $m \cdot a = \omega_p \cdot \rho_p \cdot \frac{dV_C}{dt}$

Avec :

- γ_P, γ_L : poids volumique de la particule et du fluide.
- ρ_P, ρ_L : masse volumique de la particule et du fluide
- ω_P, S_P, d : volume, surface, diamètre de la particule.
- V_C : vitesse de décantation de la particule.
- g : accélération de la pesanteur
- C_D : Coefficient de traînée (adimensionnel) dépend du nombre de Reynolds

$$Re = \frac{V_C \cdot d}{\nu} \quad \text{Avec : } \nu \text{ viscosité cinématique du liquide } \nu = \frac{\eta}{\rho_L}$$

η Viscosité dynamique du liquide

Pour l'équilibre la somme des forces égale à zéro :

$$\omega_p \cdot \rho_p \cdot \frac{dV}{dt} = \omega_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_L) - \frac{C_D}{2} \cdot \rho_L \cdot S_P \cdot V^2 \quad (\text{IV.1})$$

la particule qui chute accélère jusqu'à ce que $\frac{dV}{dt} = 0 \Rightarrow (1) = 0 \Rightarrow$

$$V_C^2 = \frac{2\omega_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_L)}{C_D \cdot S_P \cdot \rho_L} \quad (\text{IV.2})$$

Avec : $\omega_p = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$, $S_P = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ donc :

$$V_C^2 = \frac{4g \cdot (\rho_p - \rho_L) \cdot d}{3C_D \cdot \rho_L} \quad (\text{IV.3})$$

Le coefficient de frottement C_D dépend du régime d'écoulement hydrodynamique (nombre de Reynolds Re) et de la forme de la particule figure (IV.2). Ce coefficient peut être calculé par la formule $C_D = aR_e^{-n}$ avec a et n constantes tableau (IV.1).

R_e	Régime	a	n	C_D	Formule
$10^{-4} < R_e < 1$	Laminaire	24	1	$24R_e^{-1}$	Stokes
$1 < R_e < 10^3$	Intermédiaire	18,5	0,6	$18,5R_e^{-0,6}$	Allen
$10^3 < R_e < 2 \cdot 10^5$	Turbulent	0,44	0	0,44	Newton

Tableau 1V.1- Coefficient de frottement $C_D = f(R_e)$ [14].

a- en régime laminaire et on utilisant $C_D = \frac{24}{R_e} = \frac{24\eta}{\rho_L \cdot V_C \cdot d}$

On obtient l'expression de la loi de Stokes soit :

$$V_C = \frac{g}{18\eta} (\rho_P - \rho_L) \cdot d^2 \quad (\text{IV.4})$$

b- si le nombre de Reynolds compris entre 0,5 et 10^4

Fair-Geyer donne : $C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{3}{\sqrt{R_e}} + 0,34$

Dans ce cas, pour calculer V_p , en remplaçant C_D dans la formule V_C (IV.3).

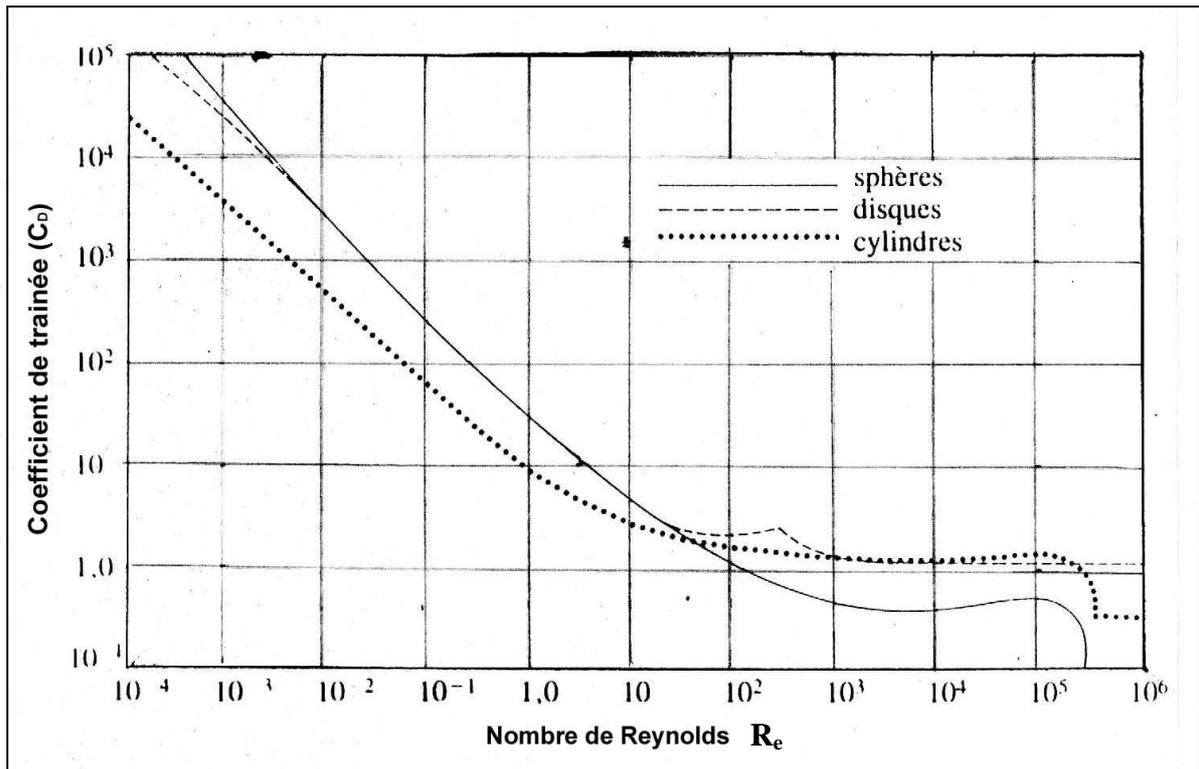


Figure IV. 2 - Variation de coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds, pour des particules de différentes formes [14].

Le tableau (IV.2.) donne les relations exprimant la vitesse de chute des particules pour chaque domaine, en fonction du coefficient C_D ; tiré des résultats de nombreux travaux expérimentaux. Avec $g = 9,81$ (accélération de pesanteur)[14].

R_e	C_D	U	U_{lim}	Domaine
$<10^{-4}$	La loi de Stokes ne s'applique pas ; car le mouvement des particules est influencé par le mouvement brownien.			
10^{-4} à 1	$24 / R_e$	$0,545 \cdot (\rho_s - \rho_L) \cdot \eta_L^{-1} \cdot d^2$		Régime laminaire
1 à 10	$26 / R_e^{0,77}$	$0,57 \cdot (\rho_s - \rho_L)^{0,814} \cdot \eta_L^{-0,625} \cdot d^{1,439}$		Régime de transition
10 à 10^2	$20 / R_e^{0,65}$	$0,73 \cdot (\rho_s - \rho_L)^{0,741} \cdot \eta_L^{-0,481} \cdot d^{1,222}$		
10^2 à 10^{-3}	$4,92 / R_e^{0,346}$	$1,81 \cdot (\rho_s - \rho_L)^{0,604} \cdot \eta_L^{-0,209} \cdot d^{0,813}$		
10^{-3} à $2 \cdot 10^5$	0,44	$5,40 \cdot (\rho_s - \rho_L)^{0,5} \cdot d^{0,5}$		Régime turbulent

Tableau IV.2 - Vitesse limite de chute des particules sphériques en fonction du nombre de Reynolds [21].

La valeur inférieure du domaine de validité de la loi de Stokes Navier ($R_e < 10^{-4}$) correspond à la distinction que font les exploitants de la décantation entre une « particule » et un « colloïde »

IV.3.2. Particules réelles

De nombreuses formules existent dans la littérature. Toutes ces formules sont différentes les unes des autres ; donc beaucoup de facteurs influencent ce phénomène. Ces formules sont valables pour des cas particuliers et on a du mal à faire un choix, on cite quelques formules à titre d'exemple.

$$\text{Steinour} \quad V_C = V_t \frac{1-e}{e^3} f(e) \quad (\text{IV. 5})$$

$$\text{Raise} \quad V_C = \frac{V_t}{b} \cdot \left[1 - \left(\frac{1-e}{a} \right)^{2/3} \right] \quad (\text{IV.6})$$

V_C : vitesse de sédimentation de la suspension

V_t : vitesse de sédimentation individuelle d'une particule

e : volume du vide sur le volume total de la suspension

Où on utilise le **facteur de sphéricité [6]**:

La forme d'une particule réelle à une surface plus grande que la surface d'une sphère de même volume, il en résulte que la vitesse de chute V_C diminue, on corrige le facteur de traînée C_D , à l'aide d'un facteur de forme ou de sphéricité (ψ) tel que :

$$C'_D = \psi \cdot C_D$$

Le facteur ψ est donné par :

$$\psi = \frac{\text{Volume de la sphère de même surface}}{\text{volume du grain}}$$

Le tableau (IV.3) donne les valeurs de ψ pour différents matériaux.

Sable	2
Charbon	2,25
Talc	3,25
Gypse	4
Lamelles de graphite	22
Mica	170

Tableau IV.3 - valeur de ψ [6].

V.3.3. Cas de suspension concentrée

Si la concentration volumique en solides devient élevée ($>0,5\%$) donc en régime laminaire ($Re < 1$) et en milieu Newtonien, on peut admettre que la viscosité cinématique équivalente d'une suspension (ν_m) et sa masse volumique (ρ_m) s'expriment approximativement à partir de celle du liquide (ν_L et ρ_L) suivant les relations :

$$\nu_m = \nu_L \frac{D + \left(\frac{1}{\rho_s} \right)}{D - D_{lim}} \quad (IV.7)$$

$$\rho_m = \frac{D\rho_L + 1}{D + \left(\frac{1}{\rho_s} \right)} \quad (IV.8)$$

Avec D et D_{lim} ; dilution (volume du liquide par unité de masse de solides) de la suspension et de la boue en fin de sédimentation (tassement), respectivement en remplaçant ρ_L par ρ_m et ν_L par ν_m dans l'équation de la loi de Stokes en régime laminaire tableau (IV.2) on obtient la valeur approximative de la vitesse limite de chute des particules en suspension concentrée, soit :

$$V_{\text{lim}} = 0,545 \frac{(\rho_s - \rho_L) \cdot (D - D_{\text{lim}}) \cdot d^2}{[(1/D) + \rho_L] \cdot [D + (1 + \rho_s)] \cdot \nu_L} \quad (\text{IV.9})$$

Dans le cas des particules flocculées, la valeur de V_{plim} est obtenue en remplaçant, dans la relation (IV.7) ; D_{lim} par D_C : la dilution correspondant au début de compression [21].

IV.3.4. Paramètre intervenant dans le processus de décantation

En dehors des cas, très rares dans la pratique du traitement des eaux, où la séparation par décantation s'effectue par cuvée (dans de bassins sans écoulement), il y a lieu de tenir compte des effets produits par l'écoulement, il faut considérer le nombre de Reynolds concernant l'écoulement du liquide :

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu_L} \quad \text{Avec : } v : \text{vitesse d'écoulement de l'eau dans le décanteur ;}$$

d : dimension caractéristique de l'ouvrage de décantation ;

ν : Viscosité cinématique ;

Lorsque ce nombre R_e est inférieur à 2000 l'écoulement est dit laminaire et dans certaine mesure on peut considérer que son effet sur la particule se ramène uniquement à une translation caractérisée par le vecteur vitesse d'écoulement.

Si la valeur de $R_e > 4000$, le régime d'écoulement est turbulent, le régime transitoire se situe entre les deux limites de R_e .

Si l'écoulement est turbulent la particule subit des impulsions aléatoires dans tous les sens, les impulsions situées au-dessus du plan horizontal s'opposant, dans une certaine mesure, à la sédimentation recherchée.

La mécanique des fluides turbulents donne des indications sur la valeur de la composante verticale de la turbulence $\bar{\omega}$.

Des valeurs expérimentales ont été proposées par certains auteurs pour estimer d'une façon simple le ralentissement de la vitesse de chute due à la turbulence de l'écoulement.

Pour Gomella, dans les ouvrages habituellement en service [5] :

$$V_1 = V_c - \frac{\bar{V}}{20} \quad (\text{IV.10})$$

avec : V_1 : Valeur de chute relative dans l'écoulement à la vitesse moyenne \bar{V}

V_c : Vitesse de chute dans une eau immobile

\bar{V} : Vitesse moyen de l'écoulement

$\frac{\bar{V}}{20} = \bar{\omega}$: Composante verticale moyenne de la turbulence.

Pour Piskounov et Troufanov, la valeur de $\bar{\omega}$ peut être obtenue à partir d'une relation de la forme :

$$\bar{\omega} = a \frac{\bar{V}}{H} 0,2 \quad (\text{IV.11}) ; \text{ (a coefficient numérique)}$$

et en pratique, ils conseillent d'adopter :

$$\frac{1}{29} \bar{V} < \bar{\omega} < \frac{1}{25} \bar{V} \quad (\text{IV.12})$$

Une autre formule est donnée par Karpensky :

$$V_1 = \sqrt{V_c^2 - \left(\frac{V_{\max}}{20}\right)^2} \quad (\text{IV.13})$$

et on peut adopter $V_{\max} = 1,2\bar{V}$

IV.4. Conclusion

De toute façon, il y a lieu de retenir que la vitesse d'écoulement, qui est fonction de la forme du décanteur, a une influence directe sur la vitesse réelle de chute d'une particule et que le facteur de forme doit être pris en compte.

Il ne faudrait cependant pas en déduire que dans un décanteur à écoulement continu, il faudra choisir la forme conduisant à l'écoulement le plus lent. En effet, il faut encore répartir et guider, l'ensemble du débit dans tout l'ouvrage et pour cela communiquer à l'eau une vitesse minimale assurant la stabilité de l'écoulement.

Chapitre V. Modélisation hydraulique des décanteurs

V.1. Introduction.....	62
V.2. Modélisation hydraulique des décanteurs	62
V.2.1. Décanteurs à écoulement horizontal.....	62
V.2.1.1. Le paramètre d'efficacité (condition de capture)	62
V.2.1.2. Modèle de Hazen	62
V.2.2 .Décanteur à écoulement vertical	66
V.2.3 .Décantation réelle	69
V.3. Structure des décanteurs	70
V.4. Conclusion.....	72

V.1. Introduction

L'étape de clarification est le plus souvent précédée d'une étape de coagulation/floculation qui permet la déstabilisation des colloïdes et leur rassemblement en floccs de taille suffisante pour qu'ils sédimentent.

Il reste à instaurer un régime hydraulique qui permette à ces floccs, très légers, de se déposer dans un ouvrage d'où l'on pourra les évacuer facilement. C'est le rôle de la décantation et des décanteurs.

V.2. Modélisation hydraulique des décanteurs

V.2.1. Décanteurs à écoulement horizontal

V.2.1.1. Le paramètre d'efficacité (condition de capture)

Pour être retenue lors de la décantation, une particule doit atteindre le radier du décanteur (et y rester). Or, cette particule est entraînée horizontalement (décanteur horizontal) ou verticalement (décanteur vertical) sous l'effet du courant d'eau à traiter.

La figure (V.1) indique un découpage du décanteur en différentes zones correspondant à des comportements différents des fluides et matières traversant l'ouvrage [6].

V.2.1.2. Modèle de Hazen : figure (V.2)

Le dimensionnement des décanteurs sont souvent effectués à partir de calcul fondé sur la théorie de Hazen qui est une des théories qui sont basé les modèles conceptuels où semi-empiriques intègrent les facteurs complexe en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Les modèles de ce type, tout en conservant une certaine signification physique, sont cependant dépourvus de réalité physique.

Le fonctionnement hydrodynamique des bassins de décantation est généralement décrit de façon grossière.

Cette théorie est une approche globale aux hypothèses très simplificatrice, mais la méthode est aisée à maître en œuvre.

On suppose qu'une particule (P) introduite dans le décanteur à hauteur H est entraînée :

- verticalement vers le fond du décanteur à vitesse $V_{P_{lim}}$ vitesse de Stokes de la particule (P) dans l'eau.
- Et horizontalement par la vitesse de circulation de l'eau.

$$V_E = \frac{Q}{H \cdot l} = \frac{Q}{S_t} \quad (V.1)$$

Cette particule est retenue par le décanteur de longueur L si :

$$\begin{aligned} \frac{V_{P_{lim}}}{H} &\geq \frac{V_E}{L} \quad \text{Et en tenant compte de la relation (V.1)} \\ \Rightarrow \frac{V_{P_{lim}}}{H} &\geq \frac{Q}{H \cdot l \cdot L} \Rightarrow V_{P_{lim}} \geq \frac{Q}{l \cdot L} = \frac{Q}{S_H} \end{aligned}$$

On note que $\frac{Q}{S_H} = V_H \Rightarrow V_{P_{lim}} > V_H \quad (V.2) \text{ (méthode de Hazen "simple")}$

Avec $S_H = l \cdot L$: surface horizontale du décanteur

Q : le débit permanent entrant dans le bassin

$V_H = \frac{Q}{S_H}$: Vitesse de Hazen (où charge hydraulique superficielle) qui est

donc indépendante de la profondeur d'un décanteur appelé aussi : l'efficacité intrinsèque d'un décanteur.

De la formule (V.2) on constate que plus V_H est faible, plus un pourcentage élevé de particules présentés à l'entrée peut être décanté.

La zone -1- correspond à la zone de dispersion des filets liquides (ici par intermédiaire d'un déversoir et d'une cloison).

La zone -2- correspond à une zone de collecte et de tassement des matières sédimentées.

La zone -3- est la zone théorique où les filets liquides sont considérés comme parallèles et horizontaux.

La zone -4- est la zone de mise en vitesse avant le déversoir de sortie.

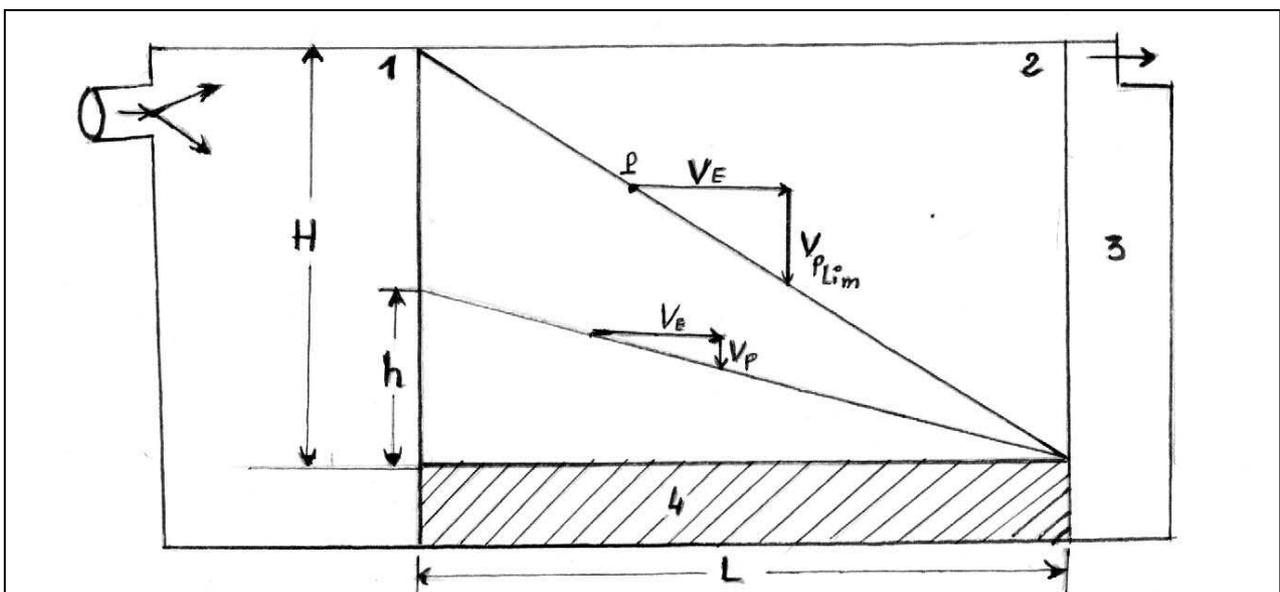


Figure V.2- Bassin de décantation idéal [14].

Dans le cas où les particules n'ont pas la même granulométrie (les vitesses de chute sont différents) donc pour calculer le rendement global d'un bassin de décantation il faut :

- Classifier les particules selon leur vitesse de chute.
- Calculer le pourcentage retenu pour chaque classe.

Puis en trace un graphe qui donne en abscisse les vitesses de décantation et on ordonnée la proportion en poids des particules ayant une vitesse de chute inférieure figure (V.3).

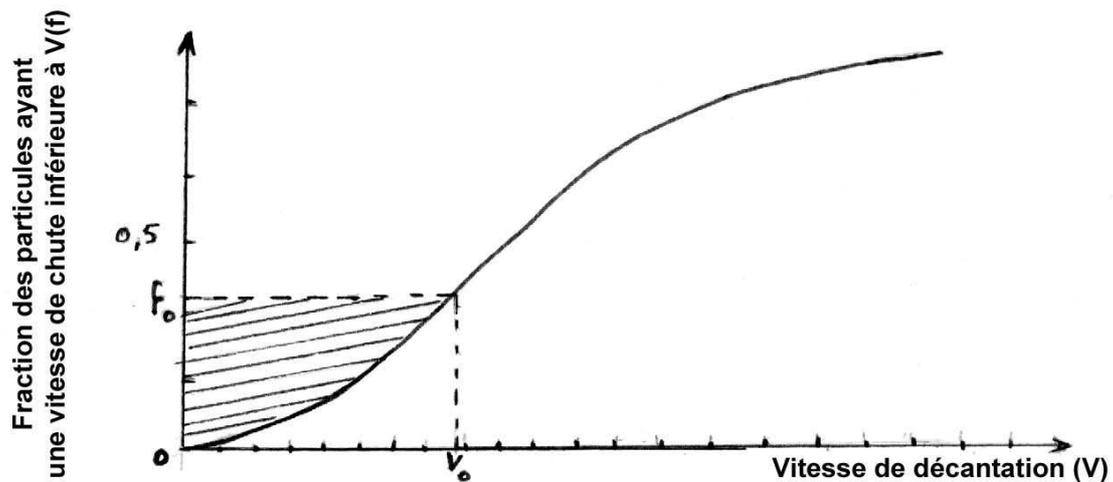


Figure V.3 - Fraction des particules dont la vitesse de décantation est inférieure à celle portée en abscisse [14].

Si f_0 représente la fraction des particules dont la vitesse de chute est supérieure à V_0 . La fraction des particules complètement éliminées est représentée par $(1-f_0)$. Pour toutes les particules dont la vitesse de chute est inférieure à V_0 , la fraction des particules éliminées est donnée par $\frac{V_p}{V_{p_{lim}}}$. Donc la fraction totale de particules éliminées est donné par :

$$F = (1 - f_0) + \frac{1}{V_{p_{lim}}} \int_0^{f_0} V_p df \quad (V.6)$$

A partir de l'équation (6) on calcul graphiquement la valeur de l'intégrale en mesurant la surface délimitée par la courbe de vitesse, l'ordonnée et la droite $f = f_0$; (Surface hachurée figure V.3)

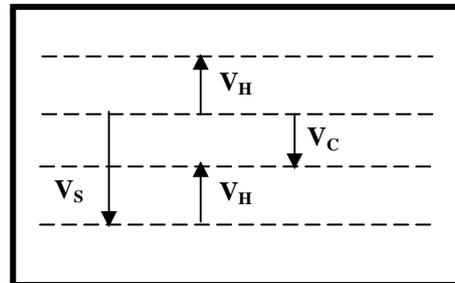
V.2.2. Décanteur à écoulement vertical

La même notion s'applique à la décantation verticale, dans le décanteur vertical simple, la vitesse de Hazen est égale à la vitesse ascensionnelle.

La vitesse ascensionnelle est la vitesse de circulation de l'eau vers le haut dans la partie supérieur cylindrique de l'ouvrage.

La chute d'une particule obéit donc au schéma de la figure (V.4)

Figure V.4 - Décantation verticale



Avec V_S : vitesse de Stokes où vitesse de chute théorique en statique

V_H : vitesse de Hazen dans l'ouvrage

V_C : vitesse de chute réelle.

Si $V_S > V_H \Rightarrow V_C$ entraîne la particule vers le bas ;

Si $V_S < V_H \Rightarrow V_C$ entraîne la particule vers le haut ;

Donc théoriquement, à surface horizontale égale, un décanteur à flux horizontal permet donc la séparation d'un plus grand nombre de particules figure (V.5).

P : fraction des particules retenues de taille d_i

d : diamètre des particules

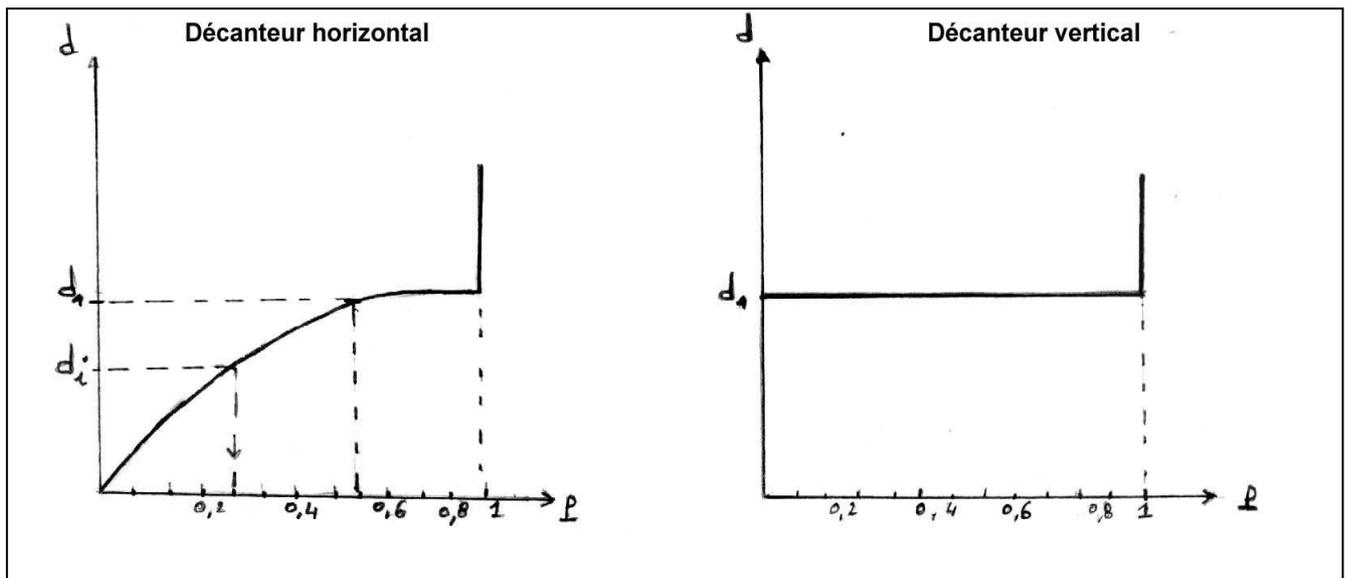


Figure V.5 - Efficacité comparée des décantations horizontales et verticale (Particules grenues) [6].

Dans la pratique, cette différence est atténuée, voir inversée, pour les raisons suivantes liées à la décantation à flux horizontal [6] :

- difficulté de répartition hydraulique sur un plan vertical aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de l'ouvrage (voir schéma de décantation réelle)
- Accumulation et collecte des boues.
- Dans un décanteur circulaire à flux horizontal ; la composante horizontale de la vitesse de la particule (V_p) diminue du centre vers la périphérie et sa trajectoire devient curviligne.

Suivant le paragraphe (V.2.1.2) Hazen appelle « décanteur idéal » un appareil où sont respectées les hypothèses suivantes :

- toutes les particules sont indépendante et tombe à leur V_C ;
- il n'y a ni floculation, ni turbulence, ni courants ;
- il n'y a pas de perturbation thermique ;
- l'écoulement est laminaire partout (en particulier l'entrée est horizontale et uniformément répartie) ;
- il n'y a pas remise en suspension ;

- la loi de Stokes reste valable si on passe d'une sédimentation statique à une sédimentation dynamique.

Pour ces hypothèses ; dans un tel bassin idéalisé, toute particule entrante suit une trajectoire rectiligne.

V.2.3. Décantation réelle

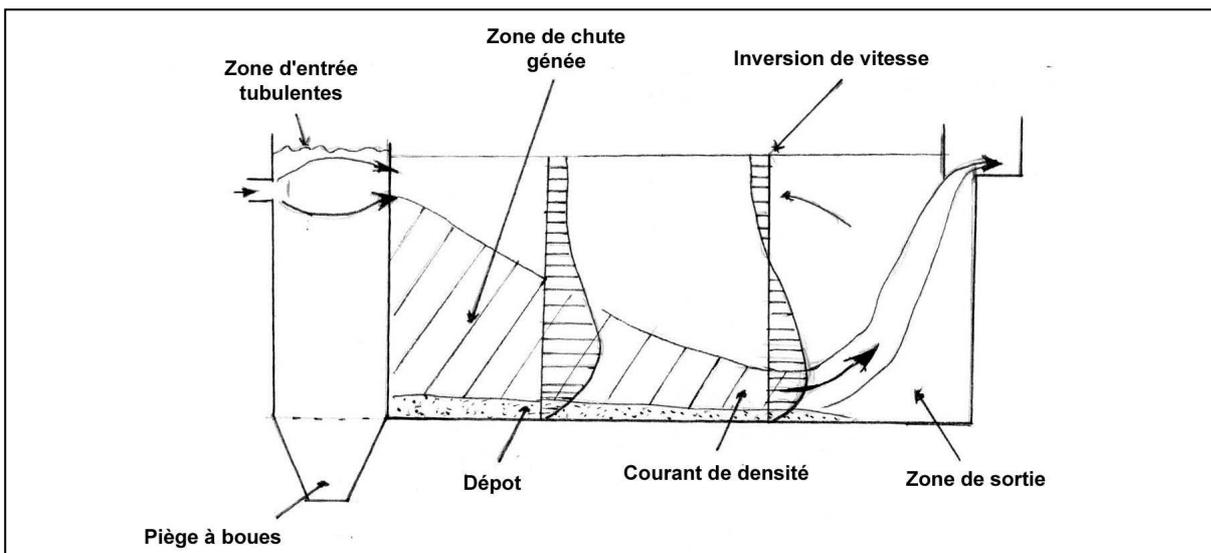


Figure V.6 - Décantation réelle

Les conditions de décantation idéale ne sont pas complètement réalisées dans la pratique, à cause des phénomènes perturbateurs suivants :

- la chute gênée, due au ralentissement de la vitesse de descente des particules au fond du décanteur au fur et à mesure de l'augmentation de la densité de l'eau due à la concentration des particules déposées.
- La coalescence des particules à l'intérieur du décanteur (regroupement des granules d'une suspension colloïdale), qui favorise l'étalement des vitesses de décantation.
- Les courants de densité, dus à la différence de charge en matières en suspension de l'eau entrant dans le décanteur et de celle qui s'y

trouve, l'eau chargée se comporte comme du liquide lourd qui s'écoule dans le fond du décanteur sans aucun mélange avec le reste de la masse liquide et remonte au déversoir.

- Les turbulences d'écoulement, par exemple, l'arrivée en fontaine ...

On peut réduire ces phénomènes perturbateurs en donnant des formes adéquates au décanteur : pentes des parois, arrondis, chicanes, etc. mais la complication des formes influe sur le temps de réponse du décanteur aux variations de débit d'alimentation où de consommation. .

Les hypothèses qui sont à la base de la théorie de Hazen sont cependant loin de refléter la réalité. Elles négligent en particulier la turbulence ; la dispersion des particules n'est donc pas du tout prise en compte. Il s'agit pourtant d'un phénomène important dans la plupart des ouvrages de décantation. Donc pour un décanteur réel la théorie de Hazen devient comme suit figure (V.7).

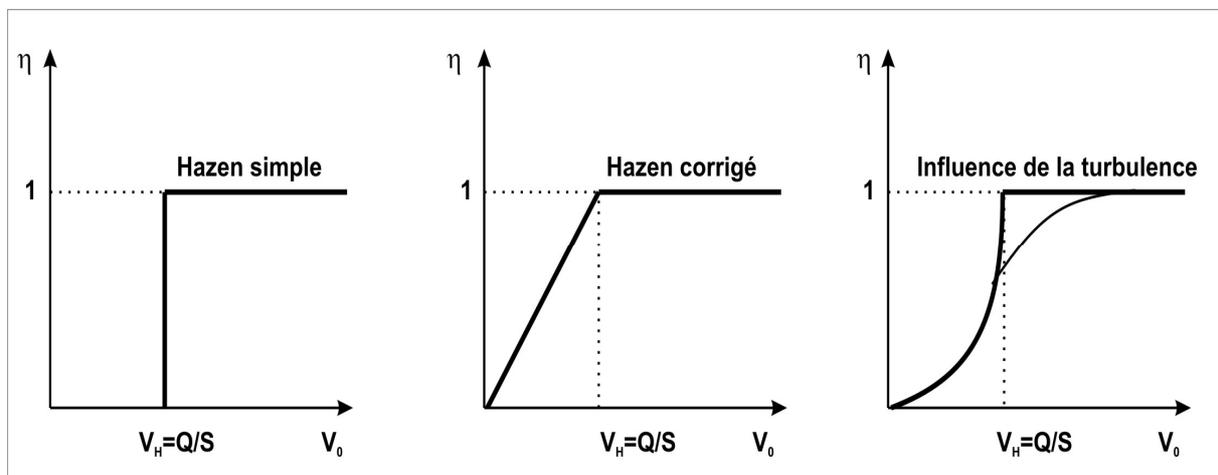


Figure V.7 - Filtre d'efficacité selon la théorie de Hazen et pour un décanteur réel

V.3. Structure des décanteurs

En pratique, il n'est y a pas de décanteur idéal:des turbulence se produisent au sein du liquide, en particulier dans la zone d'entrée, le vent peut crée des vagues

à sa surface ; des courant de convection liés aux différence locales de température (ensoleillement) et de densité affectent le rendement de décantation. Il faut, autant que possible, s'efforcer d'obtenir une circulation laminaire et stable caractérisée par des valeurs appropriées du nombre de Reynolds défini par :

$$Re^* = \frac{V \cdot d_h}{\nu} \quad (V.7)$$

Re^* : nombre de Reynolds;

V : Vitesse de circulation de l'eau;

d_h : Diamètre hydraulique équivalent ;

ν : Viscosité cinématique du liquide ;

Avec:

$d_h = 4 \cdot (Surface\ mouillée / périmètre\ mouillé)$

Remarque : dans le cas d'une conduite circulaire pleine, le diamètre hydraulique s'identifie au diamètre du conduit.

En pratique, le régime est considéré comme laminaire si $Re^* < 800$.

Par ailleurs, le nombre de Froude permet d'apprécier la stabilité d'un processus circulatoire lorsque l'écoulement est influencé principalement par la force de gravité et les forces d'inertie.

$$F_r = \frac{V^2}{g \cdot d_h} \quad (V.8)$$

Plus la circulation est stable, plus la distribution des vitesse est uniforme sur toute la section du bassin et meilleure est la séparation. Or, des circulations stables se caractérisent par des nombres de Froude élevés.

En pratique, on peut définir les rapports H/L ou H/R optimaux , H étant la hauteur mouillée des décanteurs rectangulaires de longueur L ou circulaires de rayon R . En pratique, En se fixant un temps de séjour de deux heures, Schmidt-Bregas donne les recommandations suivantes [4]:

- décanteurs rectangulaires à flux horizontal :

$$\frac{1}{35} < \frac{H}{L} < \frac{1}{20} \quad (\text{V.9})$$

- décanteurs circulaires:

$$\frac{1}{8} < \frac{H}{R} < \frac{1}{6} \quad (\text{V.10})$$

V.4. Conclusion

Le dimensionnement des décanteurs sont souvent effectués à partir de calcul fondé sur la théorie de Hazen qui est une des théories qui sont basé les modèles conceptuels où semi-empiriques intègrent les facteurs complexe en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Les modèles de ce type, tout en conservant une certaine signification physique, sont cependant dépourvus de réalité physique. Le fonctionnement hydrodynamique des bassins de décantation est généralement décrit de façon grossière.

Une particule (P) introduite dans le décanteur à hauteur H est entraînée :

- verticalement vers le fond du décanteur à vitesse $V_{P_{lim}}$ vitesse de Stokes de la particule (P) dans l'eau.
- Et horizontalement par la vitesse de circulation de l'eau.

Le calcul des décanteurs pour des particules ayant les mêmes vitesses de chute c'est-à-dire même granulométrie est facile à réaliser par rapport au cas où les particules n'ont pas la même granulométrie (les vitesses de chute sont différentes) donc pour calculer un bassin de décantation il faut classer les particules selon leur vitesse de chute objet rechercher dans le présent mémoire.

Dans le chapitre suivant on verra en détail la détermination expérimentale de la vitesse de décantation (vitesse de sédimentation de la plus petite particule à retenir).

Chapitre VI

Détermination expérimentale de la vitesse de décantation

Chapitre VI. Détermination expérimentale de la vitesse de décantation

VI.1. Modélisation de la sédimentation	74
VI.2. Détermination expérimentale de la vitesse de décantation.....	76
VI.2.1. Décantation diffuse des particules floculées	76
VI.2.2. Décantation en piston des particules floculées.....	79
VI.3. Conclusion.....	81

VI.1. Modélisation de la sédimentation

La modélisation de la sédimentation est due à KYNCH (1952) ; qui propose la théorie suivante [21]:

La vitesse de chute de particules rigides en sédimentation libre ne dépend que de la concentration locale en solide de la suspension. Elle est une fonction décroissante de la concentration en solide. Les particules de même dimension, de même forme et de même masse volumique sont equitombantes et leurs concentrations sont uniformes pour chaque niveau de la colonne de sédimentation.

Ainsi ; à partir d'essais en éprouvette, KYNCH (on négligeant la phase de coalescence) trace dans le diagramme $[h=f(t)]$ les droites d'isoconcentration correspond aux niveaux ou la concentration a une valeur (c) données, et à leurs déplacement dans le temps (figure VI.1). La pente de ces droites est donnée par la relation :

$$\frac{dh}{dt} = v(c) \quad (\text{VI.1})$$

Avec $V(c)$: Vitesse de déplacement d'un plan de concentration constante (c) par rapport à l'éprouvette.

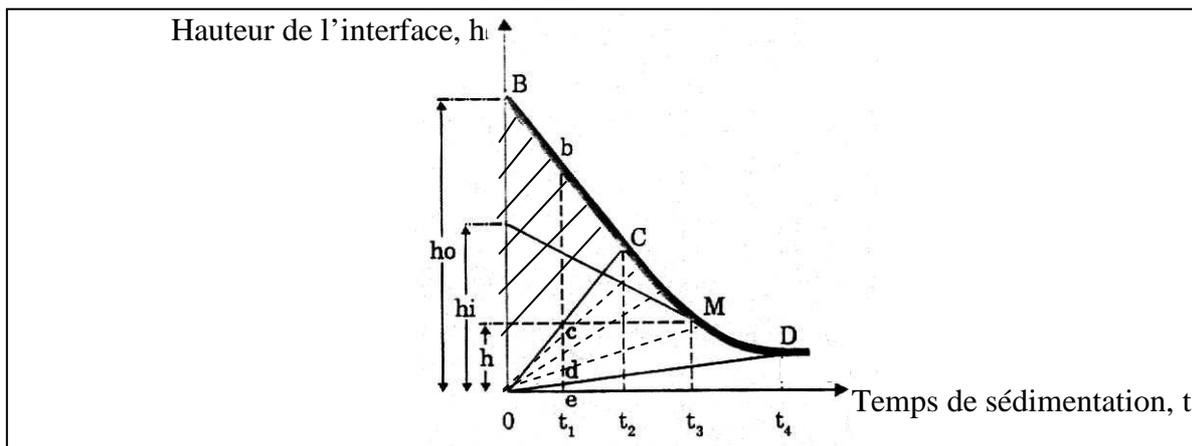


Figure VI.1 - Courbe de sédimentation et droites d'iso concentration (Kynch ,1952) [6].

Dans le triangle BOC, la vitesse de chute est constante donc pour $C_b < C < C_c$ l'équation s'écrit :

$$h = h_0 + V(c) t \quad (\text{VI.2})$$

Dans le tronçon CD, on assiste à un ralentissement progressif de la vitesse de chute du dépôt, et les lignes d'iso concentration constituent dans le triangle COD un faisceau de droite passant par l'origine, ce qui signifie que dès le démarrage de la décantation, les couches voisine du fond passe par toutes les concentrations comprises entre la concentration initiale C_0 et celle correspondant au point de début de compression (C_D), l'équation de ces droites s'écrit :

$$h = V_{(C)} t \quad (\text{VI.3})$$

Le milieu boueux de hauteur eb , à l'instant t_1 , présente donc trois zones distinctes :

- Une zone supérieure bc où la concentration et la vitesse de chute sont uniformes et ont gardé leur valeur initiale C_0 et V_0 .
- Une zone intermédiaire cd dans laquelle la concentration augmente progressivement de c en d et la vitesse de chute diminue en conséquence.
- Une zone inférieure de où les flocons de boues se touchent et sont soumis à la compression.

Dans le milieu considéré au temps t_2 , la zone supérieure disparaît, et au temps t_4 la zone inférieure seul subsiste.

Pour le point M de la partie CD, deux concentrations peuvent être définies :

C_M^i : Concentration à l'interface.

C_M : Concentration moyenne.

D'après l'hypothèse de Kynch [6] :

$$C_M^i = C_0 \frac{h_0}{h_i} \quad (\text{VI.4})$$

Par ailleurs :

$$C_M = C_0 \frac{h_0}{h} \quad (\text{VI.5})$$

VI.2. Détermination expérimentale de la vitesse de décantation

VI.2.1. Décantation diffuse des particules floculées

Ce processus se produit dès que la concentration en matière floculée est supérieure à environ 50 mg.l^{-1} .

Durant la décantation, les particules s'agglomèrent à un certain rythme, et les particules qui résultent sont à la fois plus grosses et moins denses que les particules initiales, cela favorise la décantation en augmentant la vitesse de décantation puisque cette dernière est fonction de diamètre (d) et de la densité (γ_p) des particules ainsi que de la viscosité dynamique de l'eau (η) dans la plus part des cas, on ne peut pas contrôler ce dernier paramètre (η) toutefois si on contrôle les deux premiers paramètres (d) et (γ_p) en agissant sur l'agglomération des particules on constate que lorsque (γ_p) passe de 1,10 à 1,09 (modification de 0,9%), la valeur de ($\gamma_p - \gamma_L$) diminue de 10% par contre, étant donné que la vitesse de chute est proportionnelle au carré du diamètre, l'effet final est favorable à une meilleure décantation, c'est-à-dire à une augmentation de (V_p) qui varie le long de leur trajet (figure VI.2), la floculation joue un rôle important dans le procédé de décantation le taux de floculation des particules dans le bassin de décantation est fonction de:

- a) la distance que les particules parcourent ;
- b) la charge superficielle ;

- c) gradients de vitesse dans le bassin ;
- d) la concentration des particules ;
- e) diamètre des particules.

Il n'existe pas de formule mathématique qui permette de quantifier l'influence de la floculation sur la décantation qui nous aide à calculer la vitesse de décantation, on doit donc procéder à des essais de laboratoires et des méthodes graphiques pour connaître cette vitesse.

Ces essais de laboratoire sont fait dans des colonnes de décantation (figure VI.3) d'une hauteur égale à la profondeur du décanteur (entre 1,8 et 2,4m).

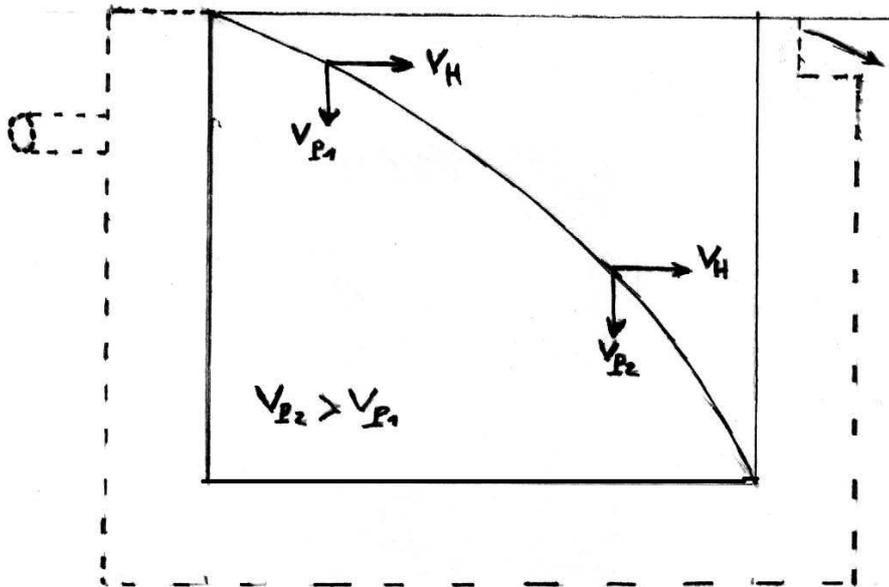


Figure VI.2 - vitesse de décantation de particules floculantes

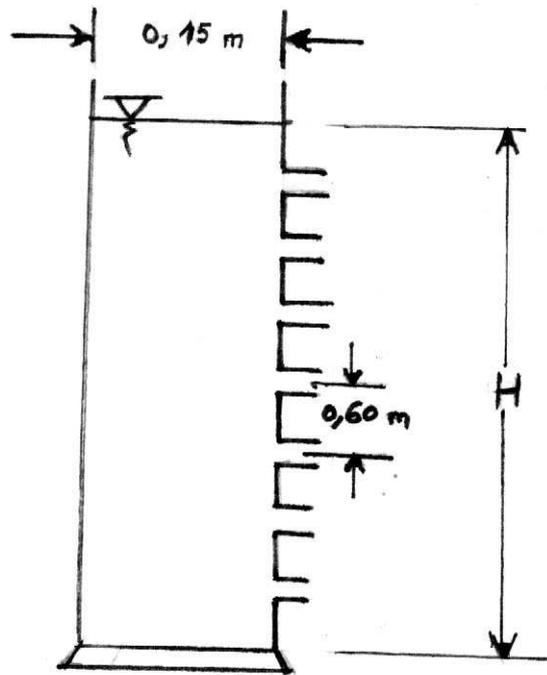


Figure VI.3 - Colonne de décantation [14].

Après homogénéisation de fluide dans cette colonne on le laisse en repos puis on effectue des prélèvements à intervalles réguliers des échantillons par siphon et à des profondeurs en général de 0,6, 1,2 et 1,6 m de la surface, on établit ainsi un pourcentage en poids, de particules éliminées que l'on reporte ensuite sur un diagramme (figure VI.4).

A partir de ces résultats on peut évaluer le pourcentage des particules éliminées par un bassin idéal, en fonction de divers temps de rétention et de diverses profondeurs à l'aide de l'équation suivante :

$$R = \frac{\Delta h_1}{H} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{2} + \frac{\Delta h_2}{H} \cdot \frac{(R_2 + R_3)}{2} + \dots + \frac{\Delta h_n}{H} \cdot \frac{(R_n + R_{n+1})}{2} \quad (\text{VI.6})$$

où :

R : Pourcentage total de particules éliminées dans un bassin de décantation idéal (rendement)

R_1, R_2, \dots, R_n : pourcentage de particules éliminées dans un bassin de décantation idéal, à une profondeur h , et après un temps de retentions t .

$\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$: hauteur moyenne entre deux couches de même pourcentage d'élimination des particules

H : hauteur totale de la colonne.

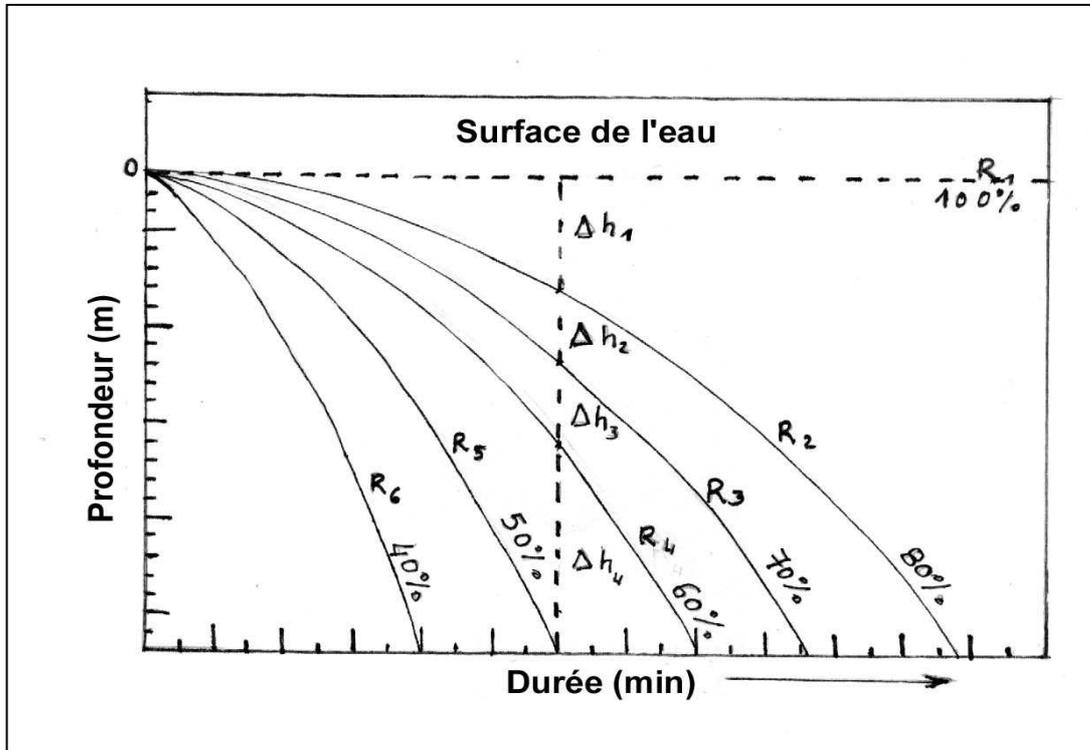


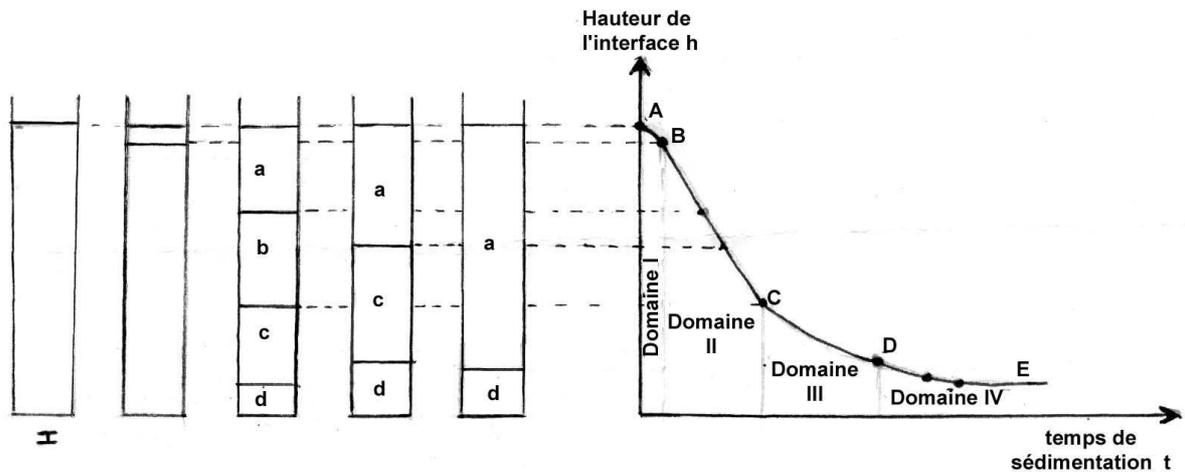
Figure VI.4 - Courbe un même pourcentage d'élimination des particules [14].

VI.2.2. Décantation en piston des particules floculées

Dés que la concentration en particule floculées devient importante ($> 500\text{mg/l}$).

Les interactions entre particules ne sont plus négligeables ; les particules adhèrent entre elles et la masse décante en piston avec formation d'une interface nette entre les floccs et le liquide surnageant.

La vitesse de décantation est mesurée on utilisant un tube de hauteur et de diamètre suffisant (au minimum une éprouvette de un litre) en suivant la hauteur de boue en fonction du temps. Figure (VI.5).



I : état initial de la suspension homogène

a : liquide clair

b : zone de même aspect que la suspension initiale

c : zone de transition (pas toujours observable)

d : zone d'épaississement des boues dont le niveau augmente rapidement avant de diminuer lentement

Figure VI.5 - Schéma de la décantation [6].

La courbe de sédimentation présente quatre domaines :

- **Domaine 1** : (AB) il correspond à la durée initiale de floculation et est souvent inexistant si la floculation est rapide (phase de coalescence des flocons).
- **Domaine 2** : de B à C, c'est le domaine où les flocons commencent à se rassembler en flocons et la vitesse de décantation est constante, (pente de la partie rectiligne) s'écrit comme suit :

$$V = \frac{h_c - h_b}{t_c - t_b} \quad (\text{VI.7})$$

ou

$$V = \frac{v_c - v_b}{s(t_c - t_b)} \quad (\text{VI.8})$$

- **Domaine 3 :** (CD) concave vers le haut ; correspond a un ralentissement progressif de la vitesse de chute due aux actions perturbatrices entre les flocons et les particules. Ce point est souvent mal défini sur la courbe
-
- **Domaine 4 :** (DE) A partir du point D ; les flocons se touchent en exerçant une compression sur les couches inférieures. la vitesse de cette zone et la courbe de sédimentation s'infléchit pour devenir asymptotique à une droite parallèle a l'axe des abscisses.

VI.3. Conclusion

La vitesse de chute de particules en sédimentation libre ne dépend que de la concentration locale en solide de la suspension. Elle est une fonction décroissante de la concentration en solide. Les particules de même dimension, de même forme et de même masse volumique sont equitombantes et leurs concentrations sont uniformes pour chaque niveau de la colonne de sédimentation.

On a étudié deux cas de décantation :

- Décantation diffuse des particules floculées
- Décantation en piston des particules floculées

Pour le premier cas se produit dès que la concentration en matière floculées est supérieur a environ 50 mg/l et il n'existe pas de formule mathématique qui permette de quantifier l'influence de la flocculation sur la décantation qui nous aide à calculer la vitesse de sédimentation on a donc procéder à des essais de laboratoires pour connaître cette vitesse.

Pour le deuxième cas se produit dès que la concentration en particule floculées devient importante (> 500mg/l). Les interactions entre particules ne sont plus

négligeables ; les particules adhèrent entre elles et la masse décante en piston avec formation d'une interface nette entre les floes et le liquide surnageant.

La vitesse de décantation est mesurée on utilisant un tube de hauteur et de diamètre suffisant (au minimum une éprouvette de un litre) en suivant la hauteur de boue en fonction du temps.

Chapitre VII
Conclusion générale

VII. Conclusion générale

Les principaux facteurs influençant la vitesse et la nature de la sédimentation sont:

- La nature des particules : la forme des particules et leur niveau d'agglomération influencent grandement leur vitesse de sédimentation. Une particule sphérique sédimente beaucoup plus rapidement qu'une particule de forme quelconque. Les propriétés chimiques et minéralogiques peuvent elles aussi avoir un effet sur la vitesse de sédimentation, car elles peuvent provoquer une auto-coagulation des particules ou former des liens avec le fluide,etc.

- L'effet de la concentration des particules : dans un bassin, lorsqu'un fluide contient une certaine concentration de particules, la sédimentation de chaque particule est influencée par les autres particules et par la présence des parois du bassin. Dans ce cas, il ne s'agit plus de la sédimentation libre d'une particule mais de sédimentation entravée.

La sédimentation entravée résulte de la collision des particules entre elles et avec les parois du bassin. L'ajout d'une forte concentration de particules réduit l'espace de déplacement.

- La nature du prétraitement : ce facteur consiste essentiellement à altérer les propriétés initiales de la suspension, telle l'introduction d'agents flocculant, coagulant, neutralisant, etc.

- La différence de densité entre le fluide et les particules : comme nous avons déjà vu que lors de la sédimentation de particules solides de masse m , de diamètre d et de masse volumique ρ_P dans un milieu fluide de masse volumique ρ_L et de viscosité μ , à priori au repos, les particules sont soumises à l'action de trois forces :

- La pesanteur, $\omega_p \gamma_p$ dirigé vers le bas,
- la poussée d'archimède, fonction de la différence de masse volumique entre la particule et le milieu fluide et dirigée vers le haut,
- les forces de frottement exercées sur la particule par le fluide, du fait de sa viscosité (ces frottements croissent avec le carré de la vitesse relative particule-fluide).

Lorsque les forces de frottement visqueux équilibrent la résultante du poids et de la poussée d'archimède, la particule se déplace alors à une vitesse constante, que l'on peut déterminer dans les deux cas suivants :

- En régime laminaire, loi de Stokes, $V_c = (d^2 \cdot (\rho_p - \rho_L) \cdot g) / (18 \cdot \mu)$
- En régime turbulent, loi de Newton, $V_c = (3 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_L) / \rho_L)^{1/2}$

En conséquence, la vitesse de sédimentation augmente avec la différence de masse volumique particule-fluide ($\rho_p - \rho_L$), l'accélération de la pesanteur g , le diamètre de la particule (son carré en régime laminaire) .

- Infrastructures servant à la décantation : plusieurs facteurs doivent être pris en considération lors de la construction des infrastructures servant à la décantation, car ils ont une influence directe et non négligeable sur cette dernière. Ces facteurs sont : la hauteur, le diamètre, la capacité de sédimentation du bassin, l'alimentation en eau et en flocculant, la forme des râteliers, etc.

- La viscosité du liquide : l'influence de ces caractères est donnée par l'équation de la vitesse de sédimentation:

- En régime laminaire, loi de Stokes, $V_c = (d^2 \cdot (\rho_p - \rho_L) \cdot g) / (18 \cdot \mu)$
- En régime turbulent, loi de Newton, $V_c = (3 \cdot g \cdot d \cdot (\rho_p - \rho_L) / \rho_L)^{1/2}$

La vitesse de sédimentation diminue lorsque la viscosité du milieu augmente, ou le diamètre des particules diminue.

Les facteurs de la sédimentation sont la différence de masse volumique entre le solide et le liquide, la taille des particules et la viscosité du fluide. Pour des particules de quelques microns, la vitesse de sédimentation devient trop faible.

On utilise alors des adjuvants de floculation pour agglomérer les particules entre elles et augmenter ainsi leur vitesse limite de chute.

Références

1- Ademe, Dabee ; « Séparation mécanique», Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Département Industrie et Agriculture, Année 2006.

2- Alain Boivin ; « Etude expérimental sur le compactage de la boue rouge dans un décanteur semi - industriel », Mémoire présente a l'université du Québec à Chicoutimi, Juillet 2004.

3- Ahmed A. Fadel and Robert Baumann; « tube Settler modeling » journal of environmental engineering (New York) 1990, vol 116 No 1, pp 107 – 124.

4- Claude Cardot ; « les traitement de l'eau», Procèdes physico–chimiques et biologique - cours et problèmes résolus – Edition Marketing.S.A.1999.

5- Cyril Gomella et Henri Guerrée ; « Le traitement des eaux publiques industrielles et privées » édition Eyrolles 1978.

6- Degrémont ; Mémento technique de l'eau ; 9^e édition 1989.

7- Springer Berlin, Heidelberg; «Colloid and Polymer Science », Vol 256; 1987.

8- Héctor Ricardo Hernández De León ; « Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable», Thèse de doctorat à l'institut nationale des sciences appliquées de Toulouse, Année 2006.

9- Holland, F.A; « Fluid flow for Chemical Engineers », New York, Chemical Publishing CO. Inc., 1973, 269 pages.

10- Jacques Mayet ; «La pratique de l'eau»,2^e édition mise à jour.

11- Jean Pierre Bechac, Pierre Boutin, Bernard Mercier et Pierre Nuer;
« Traitement des eaux usées » V.I. Édition Eyrolles 1984.

12- Mohamed - Said ouali; «Cours de Procèdes unitaires biologiques et traitement des eaux », Chimie industrielle; Office de publications Universitaires.

13- Murphy, C.H; « Handbook of particle sampling and analysis methods», Floride, Verlag Chem. International Inc., 1984, 354 pages.

14- Raymond Desjardins; « le traitement des eaux » édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.

15- Robert Thomazeau ; « station d'épuration eaux potables – eaux usées », technique et documentation 1981.

16- Shook,C.A. et Roco, M.C ; « Slurry Flow, Principles and Practice», Boston, Butterworth-Heineman, 1991, 322 pages

17- Siping Zhou and John A. Mc Corquodale ; «Modeling of rectangular settling tanks» journal of hydraulic engineering (New York) 1992 vol 118 No. 10, pp 1391 – 1405.

18- Somasundaran, P; « Fine Particule Process, volume 2 », Baltimore, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. 1980, 1865 pages

19- Svarovsky, Ladislav ; « Solid-Liquid Separation », Chemical Engineering Series, London, Éditions Butterwoths, 1977, 333 pages.

20- Technique de l'ingénieur ; volume (C10) article 5199 – 05 – 2000
Hugues Godart ; « Eau de distribution clarification ».

21- Technique de l'ingénieur ; volume (J) Article J 3450 et J 3451 03-1999 ;
Pierre Blazy ; « Décantation Aspects théoriques »

22- Technique de l'ingénieur ; volume (J) Article J 3450 et J 3451 03-1999 ;
Pierre Blazy ; « Décantation équipements et procédés ».

23- V.I. Kalitsouv, Y. M. Laskov ; « travaux pratique en ouvrages hydrauliques sous la traduction du professeur » C. W. Yakoulix Strouzdat 1978, 125 p
Moscou.