

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique
Département du Génie de l'Environnement

MEMOIRE DE MASTER EN GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Rédigé par :

ALI RACHEDI Mohamed Lotfi

THÈME

Traitement d'un rejet laitier par coagulation-floculation

Soutenu le : 22/06/2015 devant le jury suivant :

Président :	M. N. MAMERI	Professeur à l'ENP
Promoteurs :	M. M.DROUCHE	Professeur à l'ENP
	M. F.BOUAMRA	Doctorant à l'ENP
Examinatrice:	Mme. N. ABDI	Professeur à l'ENP

Promotion Juin 2015

Remerciements

Je commence par remercier DIEU d'avoir eu la bonté de m'entourer de personnes formidables qui ont, chacune à leur façon, et ce, à différentes étapes de mon cheminement, contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de ce mémoire.

En second lieu, je tiens à remercier mes promoteurs M^{me} Fariza BOUAMRA et Mr Madani DROUICHE pour leur présence et leur aide inestimable durant toute la période du travail. Ainsi que Mr Hakim LOUNICI pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

Des remerciements s'imposent aussi pour M^{lle} Leila BENSADALLAH qui m'a guidé, et aussi pour sa disponibilité et sa gentillesse tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr Nabil MAMERI et M^{me} Nadia ABDI pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail Et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A mes parents

A mon frère et ma sœur

A mes amis

Et à tous ceux qui me sont chers

Merci

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية تقنية التخثر الكيميائي لمعالجة النفايات السائلة المحاكاة للملينة التي تتميز بمحتوى عضوي عالي. عامل التخثر Al^{3+} المتحصل عليه بالإضافة المباشرة ، مكثنا من الحصول على معدلات القضاء على DCO 70 % ، و القضاء التام على الفوسفات. الكلمات المفتاحية: النفايات السائلة للملينة، التخثر الكيميائي، سلفات الألومنيوم.

Résumé

Le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité du procédé de coagulation-floculation pour le traitement d'un effluent simulé de laiterie qui se caractérise par une forte teneur en matière organique. L'agent coagulant Al^{3+} obtenue par ajout direct dans la solution a permis de réduire la DCO de 70 % , et d'éliminer totalement les phosphates.

Mots clés : effluent laitier, coagulation-floculation, sulfate d'aluminium.

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the efficiency of the chemical coagulation process for the treatment of a simulated dairy wastewater that have a high concentration in organic matters. Coagulating agent Al^{3+} obtained by direct injection reduced the COD by 70 % , and totally eliminated the phosphorus.

Keywords : dairy wastewater, coagulation-flocculation, aluminium sulfate

Sommaire

Introduction.....	- 1 -
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	- 3 -
1.L'industrie Laitière	- 3 -
1.1.Définition du Lait.....	- 3 -
1.2.Composition du lait.....	- 3 -
1.3.L'industrie Laitière en Algérie	- 4 -
1.4.Origine des rejets Laitiers	- 5 -
1.5.Paramètres caractérisant les effluents laitiers	- 6 -
1.6.Caractéristiques des rejets Laitiers	- 6 -
1.6.1.Caractéristiques des effluents produits par l'industrie laitière.....	- 7 -
1.6.2.Caractéristiques des effluents produits par les fermes d'élevage	- 7 -
1.7.Impact des effluents laitiers	- 8 -
1.8.Normes et réglementation des effluents laitiers.....	- 8 -
1.8.1.Rejets urbains.....	- 8 -
1.8.2.Rejets en milieu rural	- 9 -
1.9.Techniques de traitement des effluents laitiers.....	- 9 -
1.9.1.Techniques biologiques	- 9 -
1.9.2.Techniques physico-chimiques.....	- 9 -
2.La Coagulation-Floculation	- 10 -
2.1.Définitions	- 10 -
2.1.1.Particules présentes dans l'eau.....	- 10 -
2.1.2.Théorie de la double couche	- 12 -
2.2.La coagulation.....	- 14 -
2.2.1.Principe de la coagulation.....	- 14 -

2.2.2.Facteurs influençant la coagulation	- 15 -
2.2.2.1.Influence du pH	- 15 -
2.2.2.2.Influence des sels dissous	- 15 -
2.2.2.3.Influence de la température.....	- 15 -
2.2.2.4.Influence du coagulant.....	- 15 -
2.2.2.5.Influence de la turbidité	- 15 -
2.2.2.6.Influence de la vitesse d'agitation	- 16 -
2.2.3.Type de coagulants utilisés	- 16 -
2.2.3.1.Les coagulants minéraux	- 16 -
2.2.3.2.Les coagulants organiques	- 17 -
2.3.La floculation	- 17 -
2.3.1.Les floculants	- 17 -
Chapitre II : Matériels et Méthodes	- 19 -
1.Produits utilisés.....	- 19 -
2.Méthodes d'analyse	- 19 -
2.1.Spectroscopie d'absorption UV	- 19 -
2.2.pH.....	- 19 -
2.3.DCO	- 20 -
2.4.Phosphates	- 20 -
2.5.Nitrates.....	- 21 -
3.Dispositif expérimental.....	- 21 -
4.Procédure expérimentale.....	- 21 -
Chapitre III : Résultats et Discussions	- 23 -
Conclusion	- 26 -
Références bibliographiques.....	- 27 -
Annexes	- 29 -
Annexe 1 : Dosage de la DCO	- 29 -

Annexe 3 : Dosage des phosphates (ISO N° 6878)	- 30 -
Annexe 4 : Dosage des nitrates (AFNOR NFT 90 102)	- 31 -
Annexe 5 : Diagramme de prédominance des espèces	- 32 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : La composition moyenne du lait de vache

Tableau 2 : Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière

Tableau 3 : Valeurs limites des rejets en milieu urbain

Tableau 4 : Caractéristiques du rejet laitier

Liste des figures

Figure 1 : Temps de décantation des particules

Figure 2 : Représentation du colloïde hydrophile

Figure 3 : Potentiel électrique de particules colloïdales

Figure 4 : Energie d'interaction entre deux particules en fonction de la distance depuis la surface de la particule

Figure 5 : Jar test

Figure 6 : Pourcentage d'abattement des MES en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Figure 7 : Pourcentage d'abattement des DCO en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Figure 8 : Pourcentage d'abattement des phosphates en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Figure 9 : Pourcentage d'abattement des nitrates en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Figure 10 : Variation du pH en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Liste des abréviations

% : pourcent

°C : degrés Celsius

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: sulfate d'aluminium

C : concentration du soluté

C_i : Concentration de l'ion i.

D: Constante diélectrique du milieu.

DBO : Demande Biologique en Oxygène

DBO_5 : Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

e: Epaisseur effective de la couche diffuse.

E_A : énergie d'attraction de la particule colloïdale B

E_R : énergie de répulsion de la particule colloïdale A

ERIAD : les Entreprises Régionales des Industries Alimentaires et Dérivées.

g : gramme

g.L^{-1} : gramme par litre

h: heure

I : intensité de la lumière à la sortie de la cellule du spectroscope

I_0 : intensité de la lumière à l'entrée de la cellule du spectroscope

l: épaisseur de la cellule

$\text{m}^3.\text{j}^{-1}$: mètre cube par jour

MES : Matières En Suspension

$\text{mg d'O}_2.\text{L}^{-1}$: milligramme d'oxygène par litre

mg.L^{-1} : milligramme par litre

min : minute

mol.L^{-1} : mole par litre

MVS : Matières Volatiles en Suspension

nm : nanomètre

NO_2^- : nitrite

NO_3^- : nitrate

OAIC : l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales

ONAB : l'Office National des Aliments du Bétail.

ONIL : l'Office National Interprofessionnel du Lait

pH : potentiel Hydrogène

pZ : potentiel zêta

q: Charge de l'entité mobile par unité de surface.

rpm : rotation par minute

SiO₂ : silice activée

tr/min : tour par minute

UV : Ultra Violet

z_i: Valence de l'ion i.

ε : coefficient d'extinction spécifique du soluté

λ : longueur d'onde

Φ : Potentiel total à l'interface

Φ₀ : Potentiel différentiel dans la couche adsorbée

Ω: Force ionique.

INTRODUCTION

Introduction

Les industries agroalimentaires, de par la nature de leurs productions, sont grandes consommatrices d'eau de très bonne qualité. A l'autre bout de la chaîne, leurs rejets représentent 20 % des eaux résiduaires de l'industrie nationale. La totale implication de l'agroalimentaire dans la chaîne de l'eau conduit donc à ce que la préservation de la ressource constitue une de ses priorités. 10 % des investissements des industries agroalimentaires sont réalisés pour la protection de l'environnement. Parmi les principaux investisseurs, on retrouve les sucreries, les industries du grain, le secteur de la viande et, enfin, les laiteries et les conserveries (**C.MATHIEU-ANDRE, 2010**).

Dans la filière laitière, le principal problème se situe au niveau de l'eau. Elle doit être dépolluée avant rejet dans le milieu naturel car elle a une forte teneur en DBO et DCO, en solides dissous ou en suspension qui contiennent principalement des huiles et des graisses, et des nutriments tel que les phosphates et les nitrates ; induits par les différents processus de fabrication mis en jeu et les processus de nettoyage, c'est pour cela qu'il faut d'abord réaliser un bilan pollution pour étudier les sources de pollution, caractériser le rejet et essayer de minimiser cette pollution. Ce traitement génère des boues dont il faut aussi tenir compte (**R.MOLETTA, 1999**).

La première étape du traitement des eaux usées porte sur la séparation des formes de pollution facilement récupérables (particules par exemple). Le but est de minimiser la quantité de pollution à traiter dans la suite de la filière de dépollution. Ainsi, les effluents de l'industrie laitière peuvent subir différents prétraitements : dégrillage ou tamisage, dégraissage, dessablage dans le but d'éliminer la pollution particulaire.

Par la suite, les effluents laitiers qui contiennent une pollution essentiellement organique et sous forme soluble peuvent subir un épandage sur des terres agricoles ou un traitement biologique. Dans le premier cas, la pollution est éliminée par les micro-organismes du sol et les végétaux. Dans le second cas, on confie à des populations microbiennes présentes dans des réacteurs biologiques le soin d'éliminer la pollution.

On peut aussi traiter les effluents laitiers par des procédés physico-chimiques tels que la coagulation floculation. Ce procédé étant largement utilisé pour la clarification des eaux et

l'élimination de composés organiques et inorganiques (**Massè et Mass, 2000**). Généralement ces procédés utilisent des concentrations importantes de réactifs entraînant ainsi une augmentation de la salinité des effluents et du volume de solides générés (**Baltpurvins et al. 1997**).

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'efficacité de la coagulation-floculation, sur un effluent laitier synthétique.

Le présent travail s'articule principalement sur les points suivant :

- Un premier chapitre consacré à l'étude bibliographique dans laquelle nous présentons l'état de l'art du procédé utilisé.
- Le deuxième chapitre englobe la description du matériel et des méthodes analytiques utilisées ainsi que le protocole expérimental suivi.
- Enfin le dernier chapitre présente les résultats obtenus.

CHAPITRE I :
SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

1. L'industrie Laitière

1.1. Définition du Lait

Selon le codex (norme 206-1999), le lait est la sécrétion mammaire normale d'animaux de traite obtenue à partir d'une ou plusieurs traites, sans rien y ajouter ou en soustraire, destiné à la consommation comme lait liquide ou à un traitement ultérieur [1].

Selon le Congrès international de la répression des fraudes en 1909, le lait est le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée [1].

Il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum. Le décret du 25 mars 1924 indique la définition « lait » que sans indication de l'espèce animale de provenance, est réservée au lait de vache. Tout lait provenant d'une femelle laitière autre que la vache devra être clairement caractérisé [1].

1.2. Composition du lait

Le lait est un milieu aqueux caractérisé par différentes phases en équilibre instable :

- **La phase aqueuse:** phase dispersante continue contenant des molécules (exemple : lactose) ou des ions (exemple : calcium) à l'état dissout. Cette phase est stable [1].
- **Une suspension colloïdale de caséines:** associées à des minéraux ($(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$), ce sont les micelles phosphocalciques ou micelles de caséines. Ces agrégats macro-moléculaires de forme et de masses variées sont chargés négativement dans le lait frais. Il en résulte une répulsion électrostatique des micelles, ce qui assure la stabilité en évitant l'agglomération. Il faut noter que les micelles de caséines peuvent être déstabilisées sous l'action de facteurs extérieurs qui neutralisent les charges négatives ou désagrègent leur intégrité. Il en résulte alors l'agglutination des micelles de caséines puis la séparation du liquide aqueux dispersant. C'est la coagulation du lait [1].

- **Une émulsion lipidique:** les globules gras sont constitués d'une goutte lipidique entourée d'une membrane lipoprotéique assurant l'intégrité et l'individualité du globule. Ces globules gras sont en émulsion grâce à la charge négative de l'enveloppe assurant la répulsion électrostatique [1].
- **Les micro-organismes du lait:** ce sont essentiellement des bactéries sous forme végétative ou sporulée, en suspension stable. C'est leur développement éventuel qui est générateur d'instabilité le plus souvent par acidification (cas des bactéries lactiques) [1].

La composition moyenne des principaux constituants du lait de vache est indiquée dans le tableau 1[2].

Tableau 1 : La composition moyenne du lait de vache

	Les teneurs du lait en ses différents constituants (g.L ⁻¹)
Constituants minéraux	
Eau	902
Sels minéraux	6.2
Gaz dissous	0.1
Constituants organiques	
Sels organiques	1.7
Lactose	49
Matière grasse	38
Protéines ou constituants azotés	32
protéiques	26
- Caséine	6
- Protéines solubles	1.5

1.3.L'industrie Laitière en Algérie

L'**amont** de la filière lait se compose des producteurs et importateurs d'aliments du bétail, à savoir [3]:

- l'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC).
- les Entreprises Régionales des Industries Alimentaires et Dérivées (ERIAD).
- l'Office National des Aliments du Bétail (ONAB).

L'**aval** de la filière est représenté par [3]:

- les éleveurs bovins laitiers.
- les transformateurs : le Groupe Giplait, le privé.
- les importateurs : l'importation des matières premières était confiée à une filiale spécialisée dénommée la Milk Tarde. A présent, cette mission est confiée à l'Office National Interprofessionnel du Lait ONIL.

1.4.Origine des rejets Laitiers

La composition des effluents laitiers dépend de la nature du produit formé et donc des procédés mis en œuvre dans la laiterie. Les produits retrouvés dans les effluents proviennent principalement de la matière première (lactose, protéines, lipides, sels minéraux...) et des composés ajoutés pour le lavage (soude, acide phosphorique et nitrique...). Le comportement de l'homme est aussi un facteur à prendre en compte par rapport à la rigueur avec laquelle les sous produits sont utilisés [4].

On distingue alors les sources suivantes:

- Les ateliers de pasteurisation du lait ne déversent que des eaux de lavage, correspondant à un lait très dilué.
- L'industrie des produits frais (yaourts et fromages frais) rejettent des eaux qui peuvent être assez concentrées.
- Les fromageries et caséineries produisent du sérum riche en lactose et pauvre en protéines, les beurreries du babeurre riche en lactose et en protéine mais pauvre en matière grasse. Le babeurre et le sérum correspondent à une pollution considérable [5].

Mais il ne faut pas oublier les fermes et les salles de traites qui produisent aussi de la pollution sous les deux formes suivantes :

- Les eaux vertes : proviennent des rejets de l'animal pendant le séjour du bétail dans l'étable et du lavage du sol.
- Les eaux blanches : qui sont issues des lavages et de l'hygiénisation du matériel utilisé dans la traite. Elles sont en général peu chargées mais nécessitent quand même un traitement [4].
- Les eaux brunes : ce sont les déjections des animaux qui ont été diluées par les pluies dans les endroits non couverts [6].
- Le lactosérum : c'est un sous produit de la transformation du lait en fromage et constitue la plus grande majorité de la pollution [6].

1.5. Paramètres caractérisant les effluents laitiers

De par la nature des effluents de leurs compositions il est impossible de quantifier tout les éléments présents. C'est pour cela que l'on utilise des grandeurs qui caractérisent le niveau de pollution de manière globale et qui sont [4]:

- Demande biologique en oxygène (DBO) : C'est la quantité d'oxygène consommée dans l'obscurité à 20°C pendant un temps donné par des microorganismes pour oxyder la matière organique. La plupart des temps, l'incubation dure 5 jours et on écrit DBO₅. Elle est exprimée en gramme d'oxygène par litre d'effluent.
- Demande chimique en oxygène (DCO) : C'est la quantité d'oxydant chimique nécessaire pour oxyder la matière organique et est exprimée de la même manière que la DBO.
- Matière en suspension (MES) et matières volatiles en suspension (MVS) : Les MES correspondent à la quantité de matière particulaire exprimée en gramme de matière sèche par litre d'effluent par litre d'effluent après filtration tandis que les MVS sont les résidus de la calcination des MES à 600°C pendant 2h. La différence entre ces deux valeurs donne la quantité de matière organique en suspension.
- Azote : Il est présent sous forme organique, ammoniacale ou oxydée sous forme de nitrite NO₂⁻ et nitrate NO₃⁻ exprimé en milligramme d'azote élémentaire par litre d'effluent.
- Phosphore : sous forme de phosphate organique ou minéral, il est donné en milligramme de phosphore élémentaire par litre d'effluent.
- pH : C'est la concentration en ion H⁺ et elle exprime l'acidité du milieu qui est importante car les microorganismes utilisés ne fonctionnent que pour un certain intervalle de pH.

1.6. Caractéristiques des rejets Laitiers

Bien que la source des pollutions soit toujours le lait, les caractéristiques des effluents sont très variables [6].

Nous distinguons les rejets produits par l'industrie laitière et (transformation du lait) et ceux issus de la production du lait (fermes d'élevage) [5]:

1.6.1. Caractéristiques des effluents produits par l'industrie laitière

Dans l'industrie laitière, la grande majorité des effluents sont composés d'eaux de rinçage et des pertes en produits laitiers. Ces rejets sont très variables en relation avec les caractéristiques du lait, la transformation réalisée et la technologie de nettoyage utilisée [6].

La comparaison entre trois produits différents est donnée dans le tableau 2 [5].

Tableau 2 : Comparaison des flux des effluents pour les trois types de production laitière

Paramètre	Fromage	Lait frais	Lait en poudre
pH	5.22	6.92	5.80
Concentration en DCO (mg d'O ₂ .L ⁻¹)	5 340	4 656	1 908
Eau utilisée (m ³ .j ⁻¹)	495	682	390
Lait traité (m ³ .j ⁻¹)	168	223	86
Rapport des volumes $\frac{\text{eau utilisée}}{\text{lait traité}}$	2.94	3.06	4.54

1.6.2. Caractéristiques des effluents produits par les fermes d'élevage

Ces effluents sont constitués d'un mélange d'eaux usées provenant des différentes activités du site citées précédemment.

Etant donné que les différentes fermes sont éloignées les unes des autres, il n'est pas envisageable de regrouper tout les effluents dans une station d'épuration, et il est préférable de mélanger les eaux vertes aux eaux brunes qui seront ensuite utilisées en épandage.

Les eaux blanches continent essentiellement de la matière organique avec une DCO variant entre 0.5 et 6 g d'O₂.L⁻¹ et des MES de l'ordre de 1.9 g.L⁻¹ mais ces valeurs varient d'un élevage à un autre mais le rapport DCO/DBO₅ est dans un intervalle allant de 1.2 à 2.4 avec une valeur moyenne de 2.3 ce qui montre que les eaux blanches sont biodégradable.

Le lactosérum quand à lui est traité conjointement aux eaux blanches malgré sa forte charge en DBO et en DCO [6].

La variabilité des caractéristiques des effluents peut être attribuée à la méthodologie mise en œuvre lors du nettoyage en place, à la technologie des machines à traite et les produits de lessivage en l'occurrence l'acide phosphorique qui en très grandes concentrations peut être très dangereux. Ces produits de nettoyage peuvent aussi être corrosifs.

On peut aussi trouver des oligo-éléments comme l'aluminium, le cadmium et des pesticides qui vont avoir une influence sur ces rejets [6].

1.7. Impact des effluents laitiers

Les effluents laitiers ont une charge organique extrêmement élevée. C'est cette matière qui, concentrée dans les eaux ou les sols, provoque une pollution par asphyxie du milieu récepteur: pollution des petits cours d'eau, colmatage des sols autour des points de rejets, génération d'odeurs indésirables dues à la fermentation, graves perturbations des cycles biologiques et du milieu naturel lorsqu'elles sont en trop grande quantité (l'eutrophisation) [4].

Un litre de lait transformé induit 60 g de DCO dont 50 g issus du lactosérum ce qui implique que les eaux de lavage d'une fromagerie de la salle de traite constituent une pollution 15 fois plus grande que les eaux usées ménagères [4].

1.8. Normes et réglementation des effluents laitiers

On rencontre deux situations lors du rejet des effluents en industrie laitière [6]:

- La production d'eaux résiduelles qui vont rejoindre le réseau de traitement des eaux usées en station d'épuration
- Les rejets d'eaux blanches en milieu rural où des solutions spécifiques doivent être envisagées.

La réglementation est différente pour ces deux cas :

1.8.1. Rejets urbains

Les normes algériennes applicables aux rejets industriels ont été imposées par le décret exécutif n° 93-160 du 10/07/1993, et sont données par les seuils de valeurs représentés dans le tableau 3 [6].

Tableau 3 : Valeurs limites des rejets en milieu urbain

Paramètre	Concentration maximale (mg.L ⁻¹)
MES	30
DBO ₅	40
DCO	120
Azote globale	40
Phosphore total	2

Ces normes indiquent aussi que les effluents ne doivent pas contenir de composés susceptibles d'occasionner des mauvaises odeurs que le pH est compris entre 5.5 et 8.5 et que la température est inférieure à 30 °C [6].

1.8.2. Rejets en milieu rural

La réglementation interdit le rejet direct dans le milieu naturel en particulier à cause de la pollution par les nitrates, mais il n'y a pas de normes fixes pour ce genre de milieu car chaque région a sa spécificité [7].

1.9. Techniques de traitement des effluents laitiers

Les eaux usées de l'industrie laitière sont essentiellement composées de matière organique carbonée présente sous forme soluble (concentrations élevées en lactose, acides aminés, petits peptides...). Le traitement de ce type d'effluents est donc axé en priorité sur l'élimination du carbone [7].

1.9.1. Techniques biologiques

Compte tenu de leur excellente biodégradabilité, les procédés de dépollution par voie biologique occupent une place prédominante dans le traitement des eaux usées issues de l'industrie laitière [7].

1.9.2. Techniques physico-chimiques

Les procédés physico-chimiques en traitement complet des eaux usées laitières ne permettent qu'une épuration très médiocre car ils n'assurent essentiellement que l'élimination des matières en suspension et très peu celle des composés solubles. En conséquence, ils sont généralement utilisés comme prétraitement des effluents en tête d'un dispositif d'épandage ou d'une station d'épuration biologique.

En fonction du procédé de dépollution retenu, les prétraitements peuvent inclure : un dégrillage, un dessablage, un dégraissage et un bassin tampon avec régulation du pH. La mise en place d'une décantation primaire n'est pas recommandée compte tenu de la faible concentration en MES des effluents laitiers et du risque de départ en fermentation [7].

2. La Coagulation-Floculation

Le mot coagulation vient du Latin "coagulare" qui signifie "agglomérer". La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particules de très faible diamètre appelées les colloïdes. Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation car leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible (figure 1). Le temps nécessaire pour parcourir 1 m en chute libre peut être de plusieurs années [8].

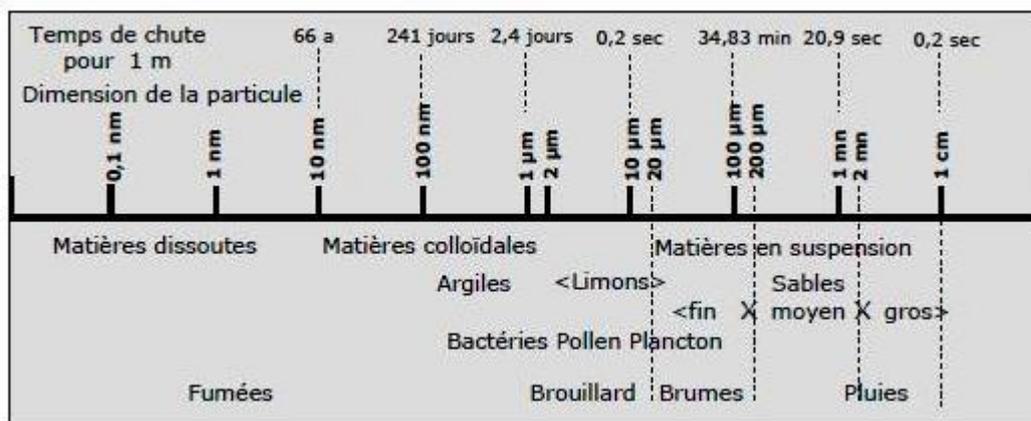


Figure 1 : Temps de décantation des particules

La coagulation et la floculation sont les processus qui permettent l'élimination des colloïdes. La coagulation va les déstabiliser en neutralisant leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre tandis que la floculation rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et/ou filtration [8].

2.1. Définitions

2.1.1. Particules présentes dans l'eau

- Particules en suspension : Elles sont généralement visibles à l'œil nu et déterminent la turbidité.
- Particules organiques dissoutes : Elles proviennent des rejets industriels et urbains et de la dissolution des végétaux décomposés présents dans les couches

superficielles des terrains, et sont pour la plus part du temps à l'origine de la coloration et/ou du mauvais goût de l'eau.

- Particules colloïdales : Elles sont dans un état intermédiaire entre l'état dissous et l'état solide. Elles sont invisibles à l'œil nu et ont des charges électriques à leur surfaces qui se repoussent les unes les autres [9]. Il existe deux types de colloïdes :
 - Les colloïdes hydrophiles : Les particules hydrophiles déshydratées se dispersent spontanément dans l'eau et sont entourées de molécules d'eau qui préviennent tout contact ultérieur entre ces particules. Ce sont en général des matières organiques [10] par ex : la gélatine, l'amidon ou les savons [9]. La figure 2 décrit les colloïdes hydrophiles

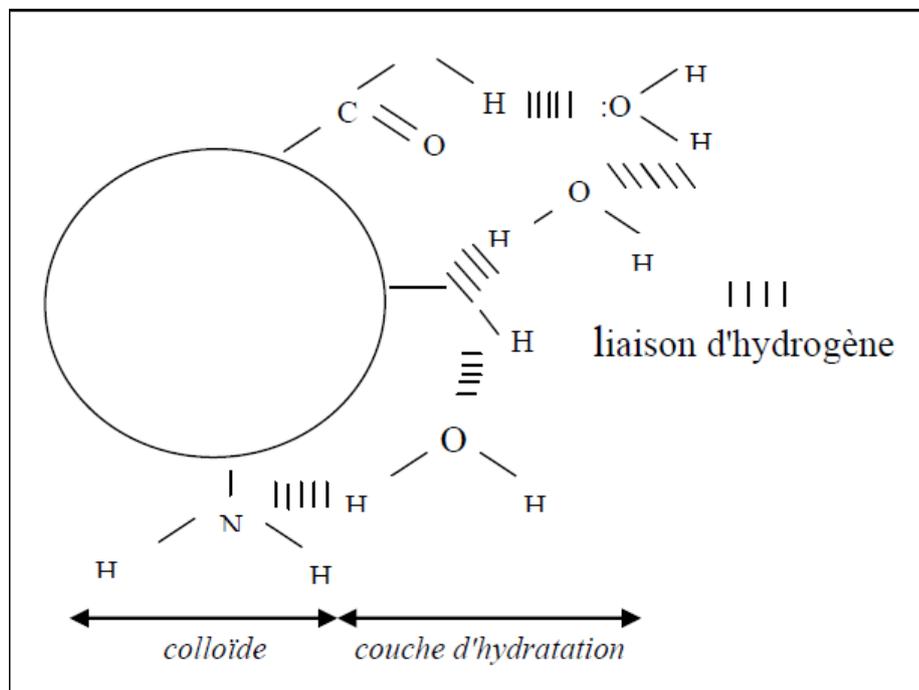


Figure 2 : Représentation du colloïde hydrophile

- Les colloïdes hydrophobes : Les particules hydrophobes ne sont pas entourées de molécules d'eau ; leur dispersion dans l'eau n'étant pas spontanée, on doit la faciliter à l'aide de moyens chimiques ou physiques [10] et sont des composés inorganiques tel que la silice. Les colloïdes hydrophobes sont plus difficiles à déstabiliser car il faut d'abord agir sur l'eau qui les entoure [9].

En fait, peu de particules sont exclusivement hydrophobes ou hydrophiles ; on retrouve des particules hydratées à différents degrés [9,10].

2.1.2. Théorie de la double couche

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent le phénomène :

- **Helmholtz**: Selon cette théorie, la totalité de la surface du colloïde est recouverte par les ions positifs assurant ainsi une électro-neutralité.
- **Guy-Chapman**: La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde; la neutralité s'obtient à plus grande distance.
- **Stern** combine les deux et arrive à la neutralisation des colloïdes par une double couche [11,12].

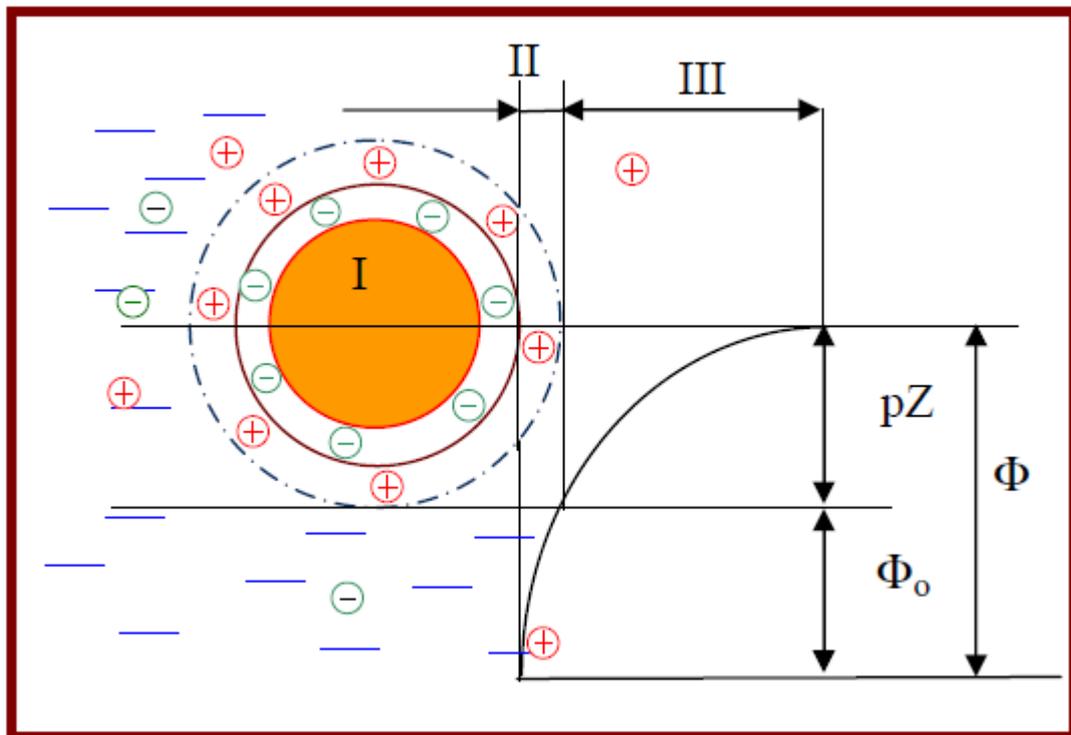


Figure 3 : Potentiel électrique de particules colloïdales

I : Particule colloïdale

II : Couche adhérente de Stern

III : Couche diffuse de Guy-Chapman

Φ : Potentiel total à l'interface

Φ_0 : Potentiel différentiel dans la couche adsorbée

pZ : Potentiel zêta

Le colloïde s'entoure donc d'une couche fixe ou couche de Stern de signe contraire à celui de la particule, et une couche diffuse ou couche de Guy-Chapman composée de contre ions se raréfiant avec la distance déformable et mobile [13].

Le colloïde se déplace dans le milieu avec tout ou une partie de sa double couche. Il est caractérisé par l'existence de deux potentiels:

- Potentiel thermodynamique ou potentiel de Nernst à la surface du colloïde [14] mais il n'est pas mesurable par des méthodes simples [12]. Il varie à peu près linéairement à l'intérieur de la gaine que constitue la couche fixe [9].
- Potentiel zêta ou potentiel électrocinétique qui est la limite entre la partie de la solution qui se déplace avec la particule et la partie qui se déplace indépendamment de la particule. Pour une particule hydrophobe, il est situé à la limite extérieure de la couche d'eau liée au colloïde [9]. Il est considéré comme un caractère de stabilité de la suspension, cette stabilité résulte principalement des caractéristiques électriques des particules qui composent ces solutions [10]. Le potentiel Zêta reste négatif comme la charge générale des colloïdes. Il donne le niveau de l'interaction mutuelle des colloïdes et se mesure par électrophorèse [15]. Il est donné par la formule suivante [9] :

$$pZ = \frac{4\pi e q}{D}$$

pZ: Potentiel Zêta.

e: Epaisseur effective de la couche diffuse.

q: Charge de l'entité mobile par unité de surface.

D: Constante diélectrique du milieu.

Le potentiel électrostatique est influencé par la force ionique Ω de l'eau.

$$\Omega = \frac{1}{2} \sum C_i (z_i)^2$$

Ω : Force ionique (mole/l).

C_i : Concentration de l'ion i (mole/l).

z_i : Valence de l'ion i.

Une augmentation de la force comprime la couche diffuse vers la particule ce qui réduit le potentiel Zêta des particules hydrophobes. Pour les particules hydrophiles il faut plutôt agir sur la couche d'eau liée lorsqu'on veut favoriser leur agglomération [8,9]. L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leur agglomération [8].

2.2.La coagulation

La coagulation constitue la première partie de la déstabilisation des particules à caractère colloïdal, elle consiste essentiellement à neutraliser ou diminuer la charge électrique (potentiel zêta) de la particule et à favoriser le rapprochement entre les particules pour former des floccs qui atteignent ainsi un état et une taille qui les rendent décantables [13]. La floculation est alors déjà amorcée [9].

2.2.1. Principe de la coagulation

Considérons deux particules colloïdales A et B. Entre ces deux particules, il existe des forces de répulsion électrostatiques, dues à la charge de surface, et des forces d'attraction intermoléculaires, dues aux interactions de Van der Walls. L'énergie potentielle de A (E_R) et B (E_A) varie donc en fonction de la distance les séparant [8].

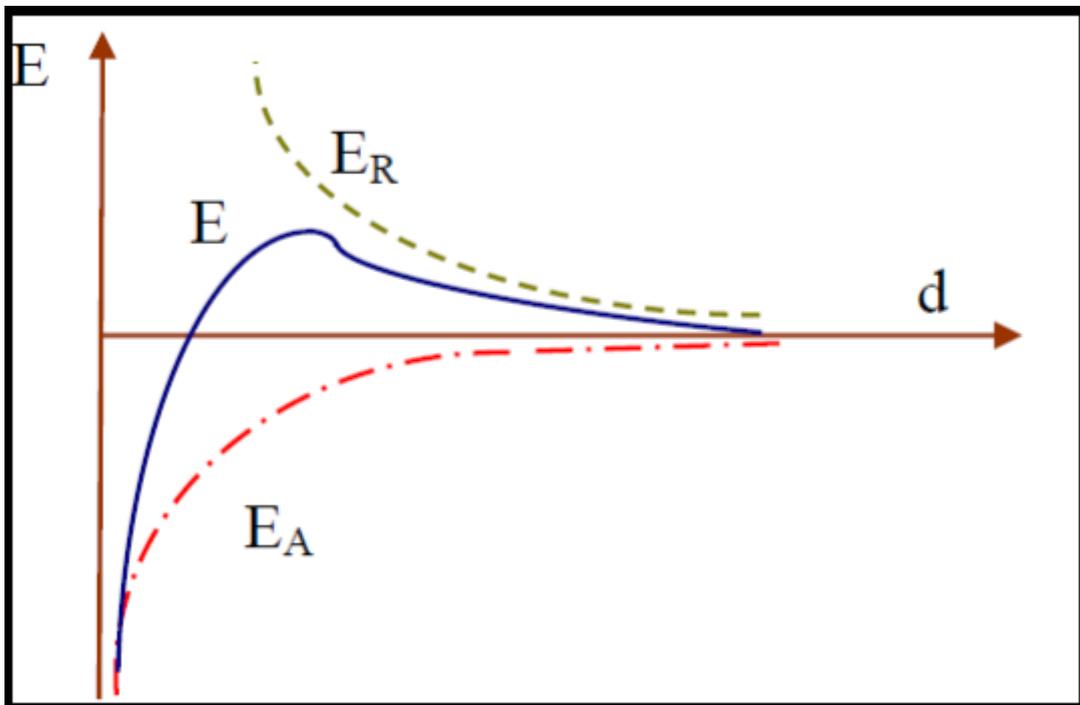


Figure 4 : Energie d'interaction entre deux particules en fonction de la distance depuis la surface de la particule

Si, le potentiel de répulsion est plus élevé que le potentiel d'attraction, la particule est dite électro-statiquement stabilisée, et doit subir un traitement pour être déstabilisée [15].

A une certaine distance limite x , la force de répulsion est plus grande que la force d'attraction, ce qui fait que les particules sont tout le temps en mouvement. Pour agglomérer ces colloïdes en augmentant la force ionique de la solution en ajoutant des ions qu'ils soient positifs ou négatifs mais il est préférable qu'ils soient doublement ou triplement valent. De cette façon on

comprime la couche diffuse vers la particule et les forces d'attractions seront alors suffisamment grandes pour neutraliser la force de répulsion [9].

2.2.2. Facteurs influençant la coagulation

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en inter relation, comme le pH, les sels dissous, la température de l'eau, le coagulant utilisé, les conditions de mélange, la turbidité et la couleur [16].

2.2.2.1. Influence du pH

Le paramètre le plus important à prendre en compte lors de la coagulation est le pH. Pour chaque eau, il existe un intervalle de pH pour lequel la coagulation a lieu rapidement, qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. 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) [16].

2.2.2.2. Influence des sels dissous

Les sels dissous modifient l'intervalle de pH optimal, la durée de la floculation, la quantité de coagulant utilisée, mais aussi la quantité résiduelle de coagulant [16].

2.2.2.3. Influence de la température

L'influence de la température du milieu sur la coagulation a été peu étudiée, néanmoins il a été établi que lorsque la température est proche de 0°C, les floccs décantent difficilement. Une diminution de la température entraîne une augmentation de sa viscosité ; c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc [16].

2.2.2.4. Influence du coagulant

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation, c'est pour ça qu'il faut d'abord déterminer faire des essais en laboratoire pour pouvoir déterminer quel coagulant utiliser et sa concentration optimale, pour une eau donnée [16].

2.2.2.5. Influence de la turbidité

Si en règle générale, la dose des sels de métaux augmente avec la turbidité, il est bien connu que les eaux très turbides flocculent rapidement, on peut par ailleurs faire les constatations suivantes :

- Il faut ajouter une concentration minimale de coagulant pour obtenir une quantité de boues minimale.

- Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration du coagulant. Cette dernière ne varie toute fois pas de façon linéaire en fonction de l'augmentation de la turbidité.
- La coagulation des eaux très chargées, telles que les lixiviats de décharges, est toujours difficile car elles exigent des concentrations de coagulant plus importantes que des eaux moins chargées telles que les eaux usées urbaines.
- La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau [16].

2.2.2.6. Influence de la vitesse d'agitation

L'injection du coagulant doit être extrêmement énergique pour qu'il se disperse rapidement et uniformément, une fois la solution homogène, la vitesse d'agitation doit être diminuée pour obtenir de bons floes décantables, soit des conditions optimales d'agitation rapide d'environ 300 tr/min pendant 2 min qui sera suivie d'une agitation lente à une vitesse de l'ordre de 50 tr/min pendant 20 min [16].

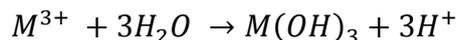
2.2.3. Type de coagulants utilisés

2.2.3.1. Les coagulants minéraux

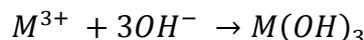
Ce sont généralement des cations de métaux trivalents tels que l'aluminium ou le fer ou des produits mixtes des deux éléments. Ils nécessitent une utilisation à des pH bien déterminés [14]. Les plus courants sont :

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

La réaction de base lors de la mise en solution des coagulants minéraux est une hydrolyse qui modifie les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter (pH, conductivité) [8].



L'acidité développée dans le milieu (libération de H^+) peut être compensée par l'ajout d'un produit alcalin (soude, chaux, carbonate de sodium...) selon la réaction [14]:



Le problème posé par les coagulants minéraux vient de la formation d'hydroxydes précipités qui entraîne la production d'un volume de boue important [8].

2.2.3.2. Les coagulants organiques

Ce sont des molécules organiques de synthèse à caractère cationique. Ces produits neutralisent les colloïdes négatifs et sont utilisables directement, en remplacement total ou partiel d'un coagulant minéral [8].

A l'inverse des coagulants minéraux, ils ne contribuent pas à une production supplémentaire de boues ; ils ne modifient pas le pH des effluents et sont utilisables à pH alcalin [14]. Mais, dans certains cas, ils sont moins efficaces. Donc, l'utilisation conjointe des deux types de coagulant permet une très nette diminution de la quantité de coagulant minéral nécessaire (40 à 80 %) tout en assurant un moindre volume de boue produite [8].

2.3. La floculation

Lors du processus de floculation, les fines particules dispersées sont combinées en agglomérats plus gros qui peuvent être éliminés par un processus subséquent tel la décantation ou la filtration [10]. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité de contact et de l'efficacité de ces derniers [9].

Donc la floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules, qui sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules. Cette différence de vitesse peut être imputable :

- Au mouvement brownien des particules (floculation péricinétique) ;
- Au déplacement d'une partie du fluide (floculation orthocinétique) ;
- Floculation macroscopique. [10]

2.3.1. Les floculants

Le floc qui se forme par l'agglomération de plusieurs colloïdes peut ne pas être suffisamment large pour se décanter ou pour se déshydrater à la vitesse souhaitée. L'utilisation d'un floculant est alors nécessaire. Il rassemble toutes les particules de floc dans un filet, construisant un pont d'une surface à l'autre et liant chaque particule pour former de vastes agglomérats [8]. De nombreuses substances ont été proposées comme adjuvant de floculation [10]:

- Des polymères minéraux comme la silice activée (SiO_2) qui est particulièrement utilisée dans des eaux froides, étant en suspension instable d'acide silicique polymérisé [10], généralement associé au sulfate d'aluminium [8].
- Des polymères organiques extraits de substances minérales ou végétales tel l'amidon et les alginates [8] (polysaccharides obtenus à partir d'algues marines [10]).

- Des polymères de synthèse apparus plus récemment qui ont fait évoluer considérablement les performances de la floculation en ayant un volume de boue très inférieur [8]. On les appelle polyélectrolytes du fait que leurs macromolécules portent de multiples fonctions ioniques. Le principe de leur action est celui de l'adsorption par pontage. On les divise en trois groupes [10]:
 - **Les polyélectrolytes cationiques** : dans leur cas, la macromolécule porte des charges positives, attribuables généralement à des fonctions amines ou ammonium quaternaire.
 - **Les polyélectrolytes anioniques** : ceux-ci se distinguent par la charge négative du polymère généralement attribuable à des fonctions acides.
 - **Les polyélectrolytes non-ioniques** : la macromolécule, dans leur cas, ne porte pas de charge aux pH usuels bien qu'elle puisse s'ioniser à certain pH extrême.

CHAPITRE II :
MATERIELS ET METHODES

Chapitre II : Matériels et Méthodes

Cette section abordera les différents produits et les dispositifs utilisés (montage expérimental), les méthodes analytiques adoptées pour la mise en marche de ces derniers, ainsi que les protocoles normés de dosages des paramètres caractérisant notre rejet.

1. Produits utilisés

- Sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L^{-1})

2. Méthodes d'analyse

2.1.Spectroscopie d'absorption UV

La spectroscopie permet d'identifier la concentration d'un soluté dans une solution, par l'interaction des électrons des molécules du soluté avec la lumière. Lorsqu'un faisceau de lumière blanche traverse la solution, le soluté contenu dans cette dernière absorbe la lumière dans une longueur d'onde bien précise et restitue une intensité plus faible que le faisceau initial. La détermination de la concentration est effectuée par dosage spectroscopique dans le domaine du visible (400-750 nm), en utilisant la loi de Beer-Lambert [17]:

$$D.O = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon.C.L$$

D.O : absorbance ou densité optique

I_0 : intensité du courant à l'entrée de la cellule du spectroscope

I : intensité du courant à la sortie de la cellule du spectroscope

ε : coefficient d'extinction spécifique du soluté ($\text{L.mol}^{-1}.\text{m}^{-1}$)

C : concentration du soluté (mol.L^{-1})

l : épaisseur de la cellule (m)

Le spectromètre utilisé dans notre analyse est PRIMLIGHT, SECOMAM® avec une gamme spectrale allant de 330 à 900 nm.

2.2.pH

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA instruments, équipé d'une électrode en verre combinée Ag/AgCl/KCl 4M et d'une sonde de température. L'étalonnage est

effectué à l'aide de solutions tampons de pH 4 et 7 à température ambiante et la précision sur la mesure donnée par le constructeur est de $\pm 0,1$ unité pH.

2.3.DCO

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommé par les matières organiques dissoutes exprimée en $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ [13].

Le protocole de dosage est donné selon la norme Canadienne MA.315 DCO 1.0. Elle est déterminée par l'oxydation de la matière organique par un oxydant puissant ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$).

L'échantillon est porté à reflux à une température de 148°C pendant 2 heures dans un bloc chauffant à plusieurs postes en milieu sulfurique concentré (96%) et en présence de sulfate d'argent jouant le rôle de catalyseur d'oxydation, de sulfate de mercure comme un agent complexant des chlorures et d'une quantité connue en excès de bichromate de potassium à une concentration de $8,33 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$.

À chaque dosage on a réalisé un essai à blanc par l'ajout des réactifs de l'oxydation à l'eau distillée.

On dose à une longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ nm}$ [11].

Le protocole détaillé est donné en annexe 1.

2.4.Phosphates

En milieu acide et en présence d'heptamolybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développent une coloration bleue pouvant être dosée colorimétriquement à une longueur d'onde de 880 nm selon la norme NF EN 1189.

Une courbe d'étalonnage a été tracée (annexe 2) afin de pouvoir déterminer sa concentration en solution.

Le pourcentage d'abattement des orthophosphates est calculé selon la relation suivante [16]:

$$\%E = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} 100$$

$\%E$: Pourcentage d'élimination d'orthophosphate.

C_i : concentration initial en orthophosphate (avant traitement)

C_f : concentration final en orthophosphate (après traitement)

2.5. Nitrates

Les nitrates présents dans l'échantillon sont transformés en dérivés nitro-phenol-sulfoniques colorés à l'aide d'acide sulfo-phenique. La coloration est proportionnelle à la concentration des nitrates et est mesurée par spectrophotométrie à 440nm.

Le protocole détaillé est donné en annexe 3.

3. Dispositif expérimental

Lors de la coagulation floculation, on a utilisé un jar test à l'aide d'un flocculateur *WiseStir* équipé de pales en acier inoxydable de dimensions 7,5 cm×2,5 cm avec une vitesse de rotation variant entre 0 et 300 tr/min, muni de 6 béchers de 1L.



Figure 5 : Jar test

4. Procédure expérimentale

Afin d'obtenir un effluent ayant une composition constante au cours de nos manipulations, nous avons dissous 5 g de poudre de lait (Loya) dans 1 L d'eau de robinet. Le choix de cette concentration a été inspiré de plusieurs études sur les rejets laitiers (Ramasamy et al. 2004 ; Balannec et al., 2005 ; Leal et al., 2006 ; Kushwaha et al., 2010), l'objectif étant d'obtenir une DCO allant de 5500 et 7000 mg d'O₂.L⁻¹ [18].

Les caractéristiques du rejet obtenu sont données dans le tableau 6.

Tableau 4 : Caractéristiques du rejet laitier

Paramètres	Valeurs
DCO (mg d'O ₂ .L ⁻¹)	5500 – 7000
Phosphates (mg. L ⁻¹)	22 – 28
Nitrates (mg. L ⁻¹)	40 – 45
MES (g. L ⁻¹)	4 – 4.5
pH	6.5 – 7.5
Protéines (g. L ⁻¹)	2.4 – 2.6
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	0.8

Lors des essais, nous avons travaillé avec le sulfate d'aluminium comme coagulant.

Le coagulant a montré une grande efficacité pour les rejets laitiers ayant une DCO initiale de l'ordre de 6000 mg.L⁻¹ [19].

Dans chaque bécher, nous avons mis un volume de 500 mL de l'effluent synthétique. Un bécher sera laissé en tant que solution témoin pour observer l'effet du coagulant. Les cinq béchers restants vont être utilisés pour deux manipulations successives, en ajoutant des quantités différentes de coagulants afin d'obtenir des concentrations de l'ordre de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 et 140 mg.L⁻¹ pour le sulfate d'aluminium.

Les conditions de travail sont les suivantes :

- Agitation rapide : 200 tr/min pendant 45 s
- Agitation lente : 50 tr/min pendant 20 min
- Décantation : entre 30 et 45 min.

Après décantation, nous prélevons le surnageant et nous procédons au dosage de ceux-ci après filtration si nécessaire.

CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre III : Résultats et Discussions

L'effet de la concentration en sulfate d'aluminium, sur le pH et l'efficacité de la coagulation a été étudié, les résultats obtenus sont représentés dans les figures 6, 7, 8 et 9.

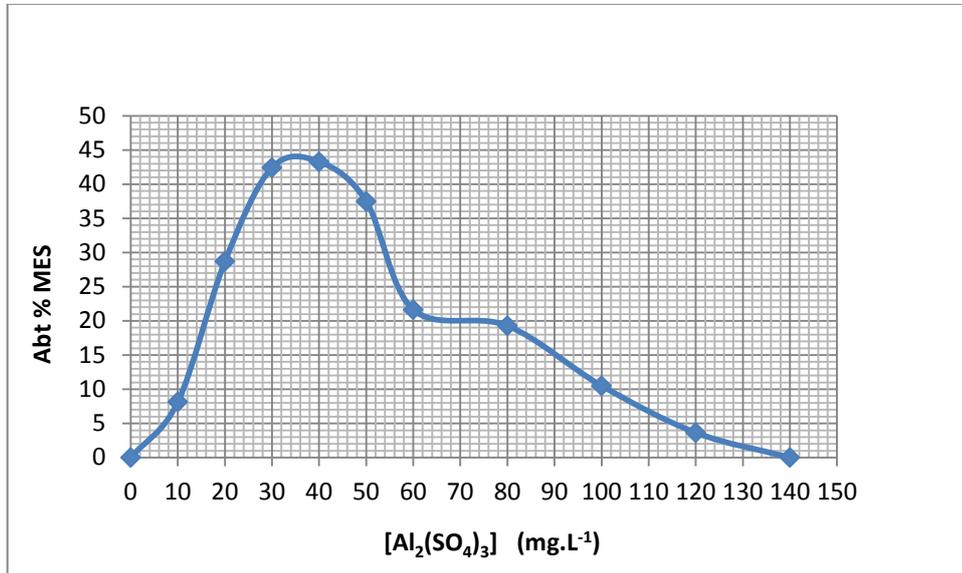


Figure 6 : Pourcentage d'abattement des MES en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

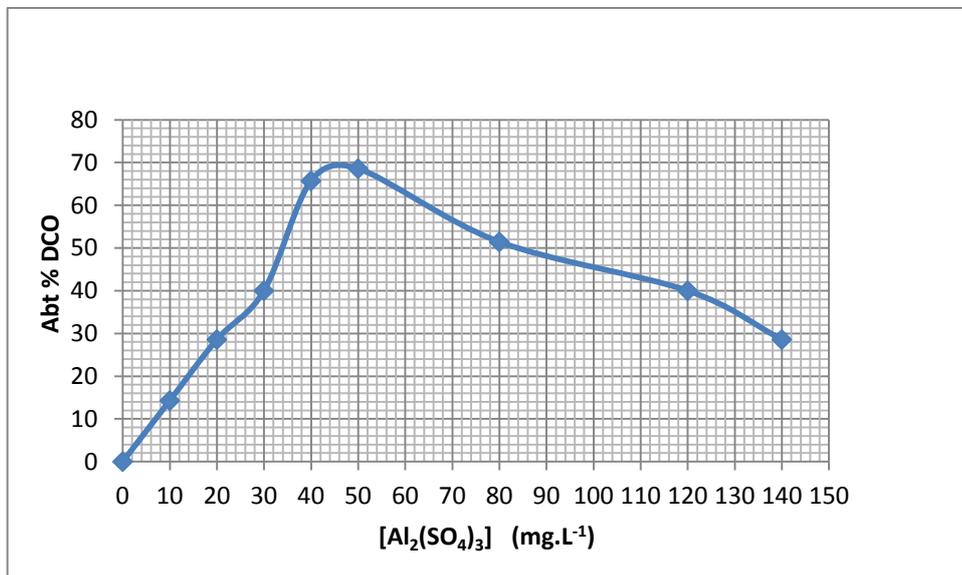


Figure 7 : Pourcentage d'abattement des DCO en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

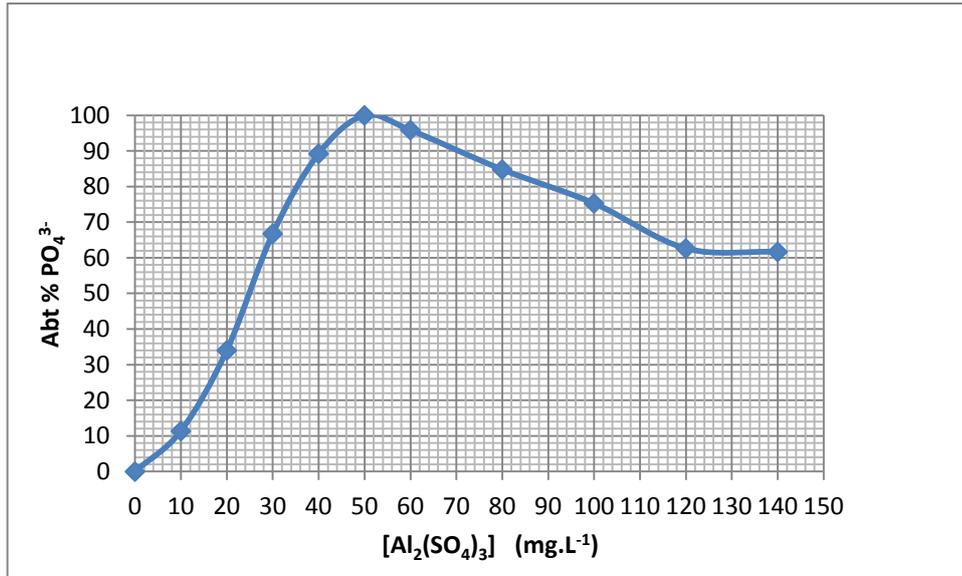


Figure 8 : Pourcentage d'abattement des phosphates en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

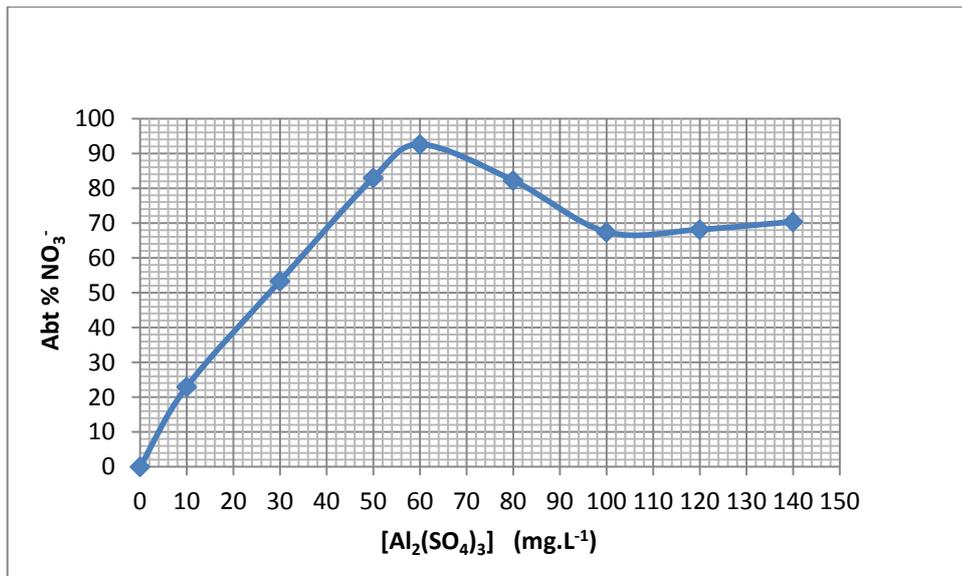


Figure 9 : Pourcentage d'abattement des nitrates en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Pour les MES, on remarque un faible taux d'abattement qui est de l'ordre de 45% pour une concentration en coagulation de 35 mg.L⁻¹. En ce qui concerne la DCO, l'optimum est observé pour une concentration de 45 mg.L⁻¹ avec un abattement de près de 70 %. Les phosphates quand à eux sont totalement éliminés pour une concentration de 50 mg.L⁻¹. Enfin, les nitrates ont été éliminés à 92 % pour une dose en sulfate d'alumine de 60 mg.L⁻¹. Au delà

de ces valeurs, le taux d'abattement diminue progressivement ce qui est expliqué par la figure 10.

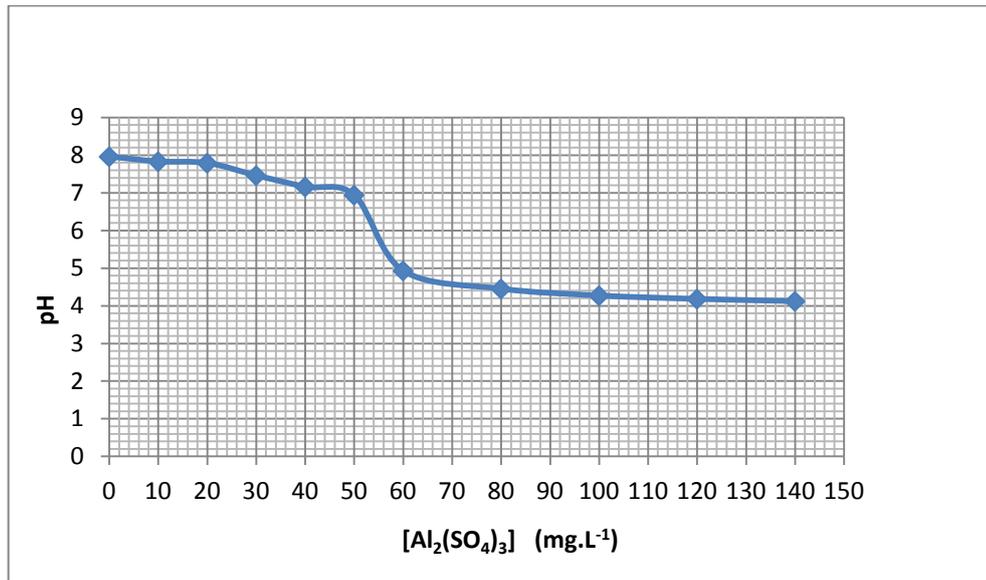
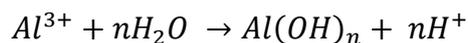


Figure 10 : variation du pH en fonction de la concentration en sulfate d'aluminium

Il est reconnu que le pH influence les taux d'abattement de la pollution contenu dans les eaux usées. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement. Lorsque le pH est optimal les produits solubles d'aluminium sont pratiquement inexistant [20].

Pour notre étude la plage de pH optimal de l'élimination des indicateurs de pollutions représentés dans les figures 17, 18, 19, 20 est entre 5 et 7. Ces valeurs de pH corroborent les résultats trouvés par Taha et al. (2000) qui ont travaillé sur l'optimisation de la coagulation-floculation des eaux blanches de laiteries et ont trouvé un pH optimal de 6.

Ce tracé montre que lorsqu'on augmente la dose du coagulant, le pH a tendance à diminuer de 8 à 4. Cette baisse du pH peut être expliquée par le fait que l'ajout de sels d'aluminium dans l'eau entraîne une libération d'ions H^+ , et rend le milieu plus acide, selon la réaction successive d'hydrolyse suivante :



Néanmoins, cette valeur est toujours située dans la gamme de pH optimal de coagulation obtenue par le coagulant, ne nécessitant donc aucune correction du pH.

En allant vers des concentrations plus élevées de coagulants, on sort de la zone de pH optimale, qui favorise la formation du $Al(OH)_3$, ce qui va créer une légère solubilisation des particules et une déstabilisation des floccs, et donc un relargage [33]. (Annexe 4)

CONCLUSION

Conclusion

L'objectif de ce travail, était l'étude de l'efficacité de dépollution des eaux issus de l'industrie laitière, et ce par le biais du procédé de coagulation-floculation

L'expérience à consisté en l'optimisation de la dose de coagulant à base d'aluminium à ajouter. Nous avons constaté que pour une concentration allant de 45 à 60 mg.L⁻¹, le taux d'abattement des différents paramètres étudiés (orthophosphates, nitrates, et DCO) ont été optimaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] **SNAPPE Jean-Jacques, LEPOUDERE Anne, SREDZINSKI Natacha** « Protéines Laitières » (F4820, 2010).
- [2] **DOUAG-TIRICHINE Nassima** « Extraction et caractérisation de quelques plantes locales à pouvoir coagulant le lait » (Ecole Nationale Polytechnique, Magister, 2010).
- [3] **ZEMMOUR Nabila** « Contribution à la compensation de la subvention par une meilleure productivité et maîtrise des coûts dans l'industrie du lait : Application laiterie Trèfle et Giplait (unité des Arribs) » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2008).
- [4] **MOLETTE René, TORRIJOS Michel** « Impact environnemental de la filière laitière » (F1500, 1999).
- [5] **GACI Sakoura** « Evaluation de la pollution issue de l'industrie laitière et valorisation du lactosérum » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2011).
- [6] **CASTILLO de CAMPINS Soraya** « Etude d'un procédé compact de traitement biologique aérobie d'effluents laitiers » (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Doctorat, 2005).
- [7] **MOLETTA René, TORRIJOS Michel** Traitement des effluents de la filière laitière (Techniques de l'Ingénieur, 1999, F1501)
- [8] **MAKHLOUFI Noureddine** « Modélisation des paramètres physico-chimiques de la coagulation floculation pour les eaux potables » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2011).
- [9] **AROUA S** « Etude de la coagulation floculation par de nouveaux coagulants sur les eaux de surface » (Ecole nationale polytechnique, Magister, 1993).
- [10] **BALASKA Adel** « Traitement de l'eau usée de la laiterie Edough-Annaba par des procédés physicochimiques et biologiques » (Université Badji Mokhtar Annaba, Magister, 2005).
- [11] **YAHIA CHERIF Mohamed El Amine** « Traitement des colorant textiles par procédé floculation-coagulation » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2013).
- [12] **ZONGO Inoussa** « Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie » (Institut National Polytechnique de Lorraine, Doctorat, 2009).
- [13] **SADEDDINE Mahdi** « Etude de la décoloration de l'eau par procédé coagulation-floculation » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 1997).

[14] **DROICHE Nadjib** « Traitement des effluents issus du traitement de surface des plaquettes de silicium par réacteurs électrochimiques » (Ecole Nationale Polytechnique, Doctorat, 2010).

[15] **BELHOUS SI AHMED Dihya** « Déphosphatation des eaux par procédés électrochimiques et chimique » (Ecole Nationale Polytechnique, Magister, 2012).

[16] **GHARSA Sabiha** « Caractérisation et traitement par coagulation-floculation et électrocoagulation des lixiviats du CET de Ouled Fayet » (Ecole Nationale Polytechnique, PFE, 2011).

[18] **J.P.KUSHAWAHA et al.** « Treatment of dairy wastesawter by inorganic coagulants : Parametric and disposal studies ». *Water Reaserch* 44 (2010) 5867 – 5874.

[20] **J.S.ROBERT, J.B.D.SHELDON,** *Wat. Res.* 1996, 30, 1169

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Dosage de la DCO

Principe

Cela repose sur l'oxydation chimique des matières réductrices par un excès de $K_2Cr_2O_7$. Cette oxydation se réalise en milieu sulfurique (H_2SO_4), en présence de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) comme catalyseur et sulfate de mercure ($HgSO_4$), à ébullition à reflux pendant 2 heures dans un bloc chauffant.

Réactifs

- Réactif acide : dissolution de 23.4 g de sulfate d'argent dans 4.25 kg d'acide sulfurique
- Solution de digestion : 10.2 g de bichromates de potassium préalablement séchés sont introduit dans 500 mL d'eau distillée auquel on ajoute 167 mL d'acide sulfurique pur et 33.3g de sulfate de mercure.

Mode opératoire

- Introduire dans un tube de DCO 2,5 mL de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 1,5 ml de solution de digestion.
- Ajouter lentement et avec précaution 3,5 mL de réactif acide.
- Agiter pendant quelques secondes à l'aide de l'agitateur vortex.
- Porter à l'ébullition dans un bloc chauffant pendant 2 h.
- Laisser refroidir jusqu'à température ambiante
- Lire la valeur de la densité optique au spectrophotomètre pour une longueur d'onde de 600nm.

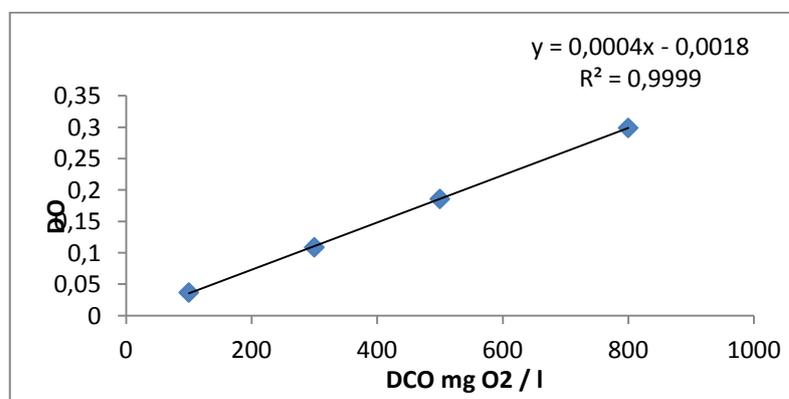


Figure 36 : Courbe d'étalonnage de la DCO

Annexe 2 : Dosage des phosphates (ISO N° 6878)

Principe

Formation en milieu acide d'un complexe avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium. Réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu qui présente deux valeurs maximales d'absorption l'une vers 700 nm, l'autre plus importante à 880 nm.

Réactifs

- Réactif mixte :
 - 13 g de heptamolybdate d'ammonium dans 100 mL d'eau distillée.
 - 0.35 g de tartrate d'antimoine dans 100 mL d'eau distillée
 - 150 mL d'acide sulfurique pur dans 150 mL d'eau distilléeMélanger les trois solutions, conserver le réactif dans un flacon brun.
- Acide ascorbique à 10 %

Mode opératoire

- Prendre 40 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 1 ml acide ascorbique
- Ajouter 2 ml du réactif mixte.
- Attendre 10 mn le développement de la couleur bleue.
- Effectuer la lecture à une longueur d'onde de 880 nm.
- La teneur en phosphates est déduite du graphe d'étalonnage

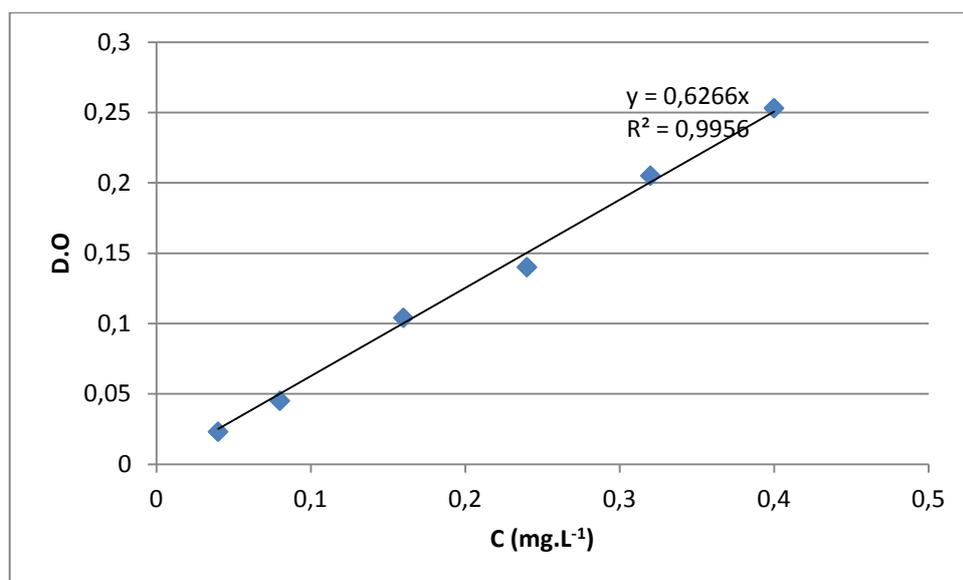


Figure 38 : Courbe d'étalonnage des phosphates

Annexe 3 : Dosage des nitrates (AFNOR NFT 90 102)**Principe**

Les nitrates présents dans l'échantillon sont transformé en dérivés nitro-phenol-sulfoniques colorés a l'aide d'acide sulfo-phenique. La coloration est proportionnelle à la concentration des nitrates et est mesurée par spectrophotométrie à 440nm.

Réactifs

- Réactif sulfophinique : dissoudre 12 g de phénol dans 144 mL d'acide sulfurique 36 N.
- Ammoniac

Mode opératoire

- Prendre 5 mL d'échantillon à analyser et le faire évaporer à sec
- Laisser refroidir puis rajouter 2 mL du réactif sulfophénique
- Attendre 10 min puis ajouter 15 mL d'eau déminéralisée et 10 à 15 mL d'ammoniac qui développe la couleur jaune
- Compléter à 50 mL avec de l'eau distillée
- Effectuer la lecture à 440 nm
- La teneur en nitrate est déduite à partir de la courbe d'étalonnage

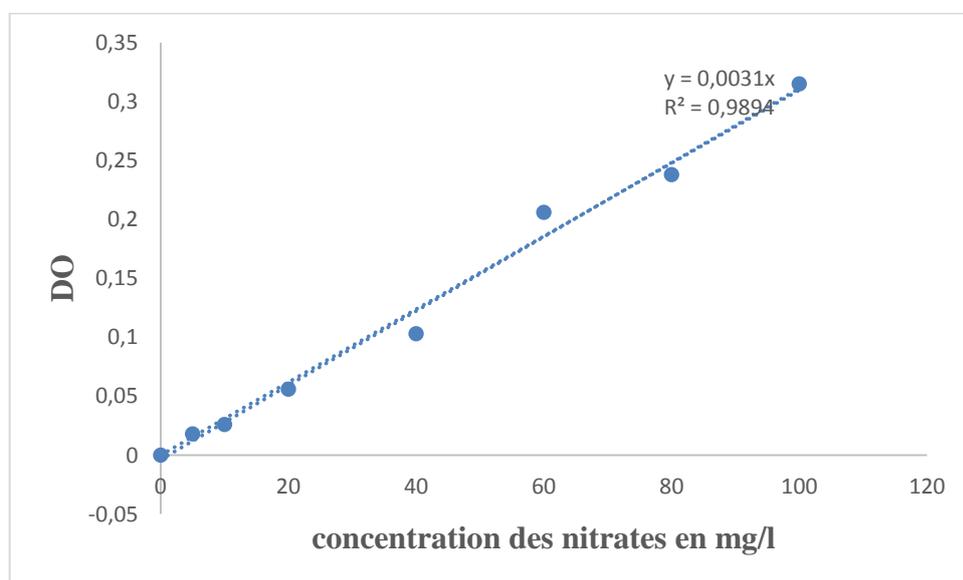


Figure 39 : Courbe d'étalonnage des nitrates

Annexe 4 : Diagramme de prédominance des espèces

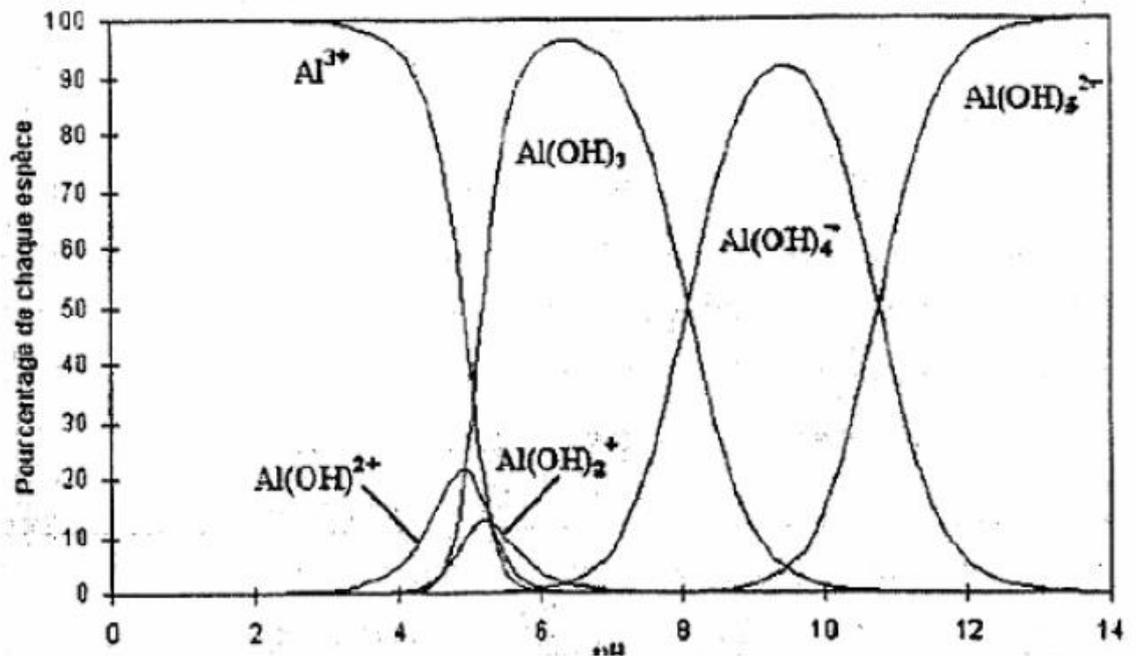


Figure 40 : Diagrammes de prédominance des espèces d'aluminium et effet du pH