

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de BLIDA
Institut de Chimie Industrielle

جامعة البليدة
معهد الكيمياء الصناعية

THESE DE MAGISTER

Présentée par : **DJAMEL GHERNAOUT**

En vue de l'obtention du Diplôme de MAGISTER en Chimie
Industrielle, Option : Génie de l'Environnement

THEME

**ETUDE ELECTROPHYSICOCHIMIQUE DE LA
COAGULATION DE LA MATIERE MINERALE
(BENTONITE) ET DE LA MATIERE ORGANIQUE
(ACIDE HUMIQUE)**

Soutenue en Public le 17 Novembre 1997 devant le Jury :

M ^R KERBACHI R.	Professeur, E.N.P.	Président
M ^R KELLIL A.	Maître de Conférences, U.B.	Examineur
M ^R HADJ BOUSAAD D.E.	Maître de Conférences, U.B.	Examineur
M ^R KHELIFA A.	Chargé de Cours, U.B.	Examineur
M ^R NACEUR M.W.	Chargé de Cours, U.B.	Directeur de la Thèse

Dédicace

*A la Mémoire de la Mère de mon Frère SMOÏN
et à ma Mère.*

AVANT - PROPOS

La présente étude a été réalisée au Laboratoire Traitement des Eaux de l'Institut de Chimie Industrielle sous la direction de Monsieur NACEUR M.W. Chargé de Cours au même institut.

Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour m'avoir dirigé et orienté tout le long du précédent travail, Projet de Fin d'étude, et tout le long de ce dont il est question en l'occurrence.

Je ne saurais le remercier pour avoir contribué à ma mise sur l'orbite de la Recherche, son « Tu est un bon élément », aussi simple soit-il, me resterait inoubliable, pour son soutien moral, et pour sa grande compétence d'Enseignant.

Que Monsieur le Professeur KERBACHI R., à l'Ecole Nationale Polytechnique, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements d'avoir bien voulu honorer ce jury de sa présidence.

Que Monsieur KELLIL A., Maître de Conférences à l'Université de Blida, trouve ici mes vifs remerciements de m'avoir fait bénéficiaire de sa grande compétence pour juger ce travail, pour ses chers encouragements, et pour ses grandes qualités humaines.

Je remercie vivement Monsieur HADJ BOUSAAD D.E., Maître de Conférences à la même Université, pour avoir accepté de faire partie du jury et pour ses chers encouragements qui me resteraient inoubliables.

Monsieur KHELIFA A., Chargé de Cours au même Institut, a agréé de me faire bénéficiaire de son immense savoir d'un Grand Electrochimiste et, a eu la bienveillance d'examiner ma thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Monsieur AOUABED A., Chargé de Cours au même Institut, a mis à ma disposition sa grande compétence d'un Traiteur des Eaux et, a su toujours m'encourager d'une manière ou d'une autre. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

Mes remerciements s'adressent également à :

Monsieur NEDJEMI O., Maître de Conférences à l'Université de Blida,
Mademoiselle BOUABDELLAH F., Maître - Assistante à l'Institut de Physique,
Messieurs DAHMOUCHE R., DOUIK R., MAASKRI M., OUMERT M.,
OUHALIMA B., Techniciens Supérieurs à l'Institut de Chimie Industrielle,
BENSAFIA D., Responsable d'un Laboratoire à l'Institut de Génie - Rural, pour
leur aide technique,

Monsieur MEGATELI S., Maître - Assistant à l'Université de Blida, pour son
intérêt envers cette étude et son soutien moral,

Monsieur BETROUNI A. pour son grand savoir-faire d'un Informaticien
affiché en particulier lors de la frappe de ce document,

Monsieur AKLI, Gérant de la papeterie - librairie « Tout - Savoir », et ses
collaborateurs pour leur compréhension,

Mademoiselle BIRANE Z., Maître - Assistante à l'Institut de Chimie
Industrielle, pour son intérêt à l'égard de cette étude, et Madame BOUTEFLIKA S.,
Responsable du Laboratoire, pour sa gentillesse.

Je tiens à remercier mes parents, mes frères, mes sœurs, mes cousins et mes
amis pour leur aide et soutien moral tout le long de ce travail.

ABSTRACT

ملخص

هذه الدراسة تهتم بكهربائية- فزيائية- كيميائية تخشير المادة المعدنية، صلصال و المادة العضوية، حامض هيومي.

لهذا الغرض، تجارب عديدة أجريت لتخشير محاليل لحامض هيومي (مسوق من طرف شركة أكروس للعضويات)، ومحاليل لصلصال (من منجم دار امبارك، تلمسان، الجزائر)، ومحاليل أمزجة صلصال- حامض هيومي، بواسطة جهاز "تجربة قارورة" وجهاز محلل كهربائي مركب بالمخبر. التحاليل المنجزة تمحورت حول قياس الكثورة و الماصية.

النتائج المتوصل إليها بيئت مايلي:

- شحنة الجزئ، الذي يجب تخشيره، تعادل حسب الترتيب التالي ذو الأهمية المتناقصة:

حامض هيومي، صلصال، صلصال- حامض هيومي،

- الثاني صلصال- حامض هيومي يصعب تخشيره؛ بواسطة تجربة قارورة، عند pH حامضي

أكثر منه عند pH معتدل.

كلمات مفاتيح : تخشير، صلصال، حامض هيومي، تحليل كهربائي.

ABSTRACT

The object of this work is to study electrophysicochemically the coagulation of mineral matter, bentonite, and organic matter, humic acid.

To do this, coagulation - flocculation testings of humic acid solutions (marketed by Acros Organics Company, U.S.A.), bentonite suspensions (Dar Embarek's deposit, Maghnia, Tlemcen, Algeria), and humic acid bentonite mixture suspensions, have been realized on a WRC type jar test and on a do-it-yourself electrolyser.

The carried out analysis concerned turbidity and U.V. absorbance measurement.

The obtained results show that :

- *the particule charge, to be coagulated, is to be neutralized following this priority decreasing order : humic acid, bentonite, humic acid - bentonite,*
- *the macromolecules - colloid system is more difficult to be coagulated - flocculated, on jar test, at acid pH than at neutral pH.*

Key words : coagulation, bentonite, humic acid, electrolysis.

Mots clés : coagulation, bentonite, acide humique, électrolyse.

Résumé

La présente étude a comme axe d'intérêt l'électrophysicochimie de la coagulation de la matière minérale, bentonite, et de la matière organique, acide humique.

À cet effet, des essais de coagulation-floculation de solutions d'acide humique (commercialisé par Acros Organics Company, U.S.A.), de suspensions de bentonite (du gisement de Dar Embarek, Maghnia, Tlemcen, Algérie), et de suspensions mélanges bentonite acide humique, ont été réalisés sur un jar test de type WRC et sur un électrolyseur monté au Laboratoire.

Les analyses effectuées se sont portées sur la mesure de la turbidité et de l'absorbance U.V.

Les résultats obtenus montrent que :

- la charge de particule à coaguler est à neutraliser suivant cet ordre décroissant de priorité : acide humique, bentonite, bentonite - acide humique,
- le système colloïde - macromolécules est plus difficile à coaguler - floculer, sur jar test, au pH acide jusqu'au pH neutre.

Mots clés : coagulation, bentonite, acide humique, électrolyse.

NOMENCLATURE

Abs	: absorbance	-
A _C	: pourcentage d'accroissement de la conductivité	-
conc	: concentration	M.L ⁻³
C _A	: concentration en acide humique	M.L ⁻³
C _B	: concentration en bentonite	M.L ⁻³
d	: épaisseur de la couche liée	L
D _{pH}	: pourcentage de diminution du pH	-
F	: nombre de Faraday (1 F = 96500 A.s ⁻¹ .mole ⁻¹)	A.T ⁻¹ .mole ⁻¹
I	: intensité du courant	A
M	: masse molaire de l'espèce mise en jeu	M / mole
m	: quantité de substance dégagée	M
pAl	: logarithme décimal négatif de la concentration en aluminium en équivalents - grammes	-
pH	: logarithme décimal négatif de la concentration en protons en équivalents - grammes	-
R _A	: pourcentage de réduction de l'acide humique	-
R _B	: pourcentage de réduction de la bentonite	-
t	: temps	T
Turb	: turbidité	NTU
Z	: nombre de valence (nombre d'électrons) de l'espèce mise en jeu	-
ψ	: potentiel électrique	L ² .M.T ⁻³ .A ⁻¹

SOMMAIRE

Dédicace	
AVANT - PROPOS	
Résumés	
NOMENCLATURE	
Sommaire	
INTRODUCTION	01
PARTIE THEORIQUE	
<u>Chapitre I</u>	
COAGULATION-FLOCCULATION	
I.1 INTRODUCTION	04
I.2 DEFINITION	04
I.3 ETAT COLLOÏDAL	04
I.4 THEORIE DE LA DOUBLE COUCHE	05
I.5 PARAMETRES DE STABILISATION DES COLLOÏDES	06
I.6 PARAMETRES DE DESTABILISATION DES COLLOÏDES	06
I.7 FLOCCULATION ORTHOCINETIQUE	07
I.8 AGENTS DE DESTABILISATION	07
I.8.1 Coagulants minéraux	07
I.8.2 Coagulants organiques	07
<u>Chapitre II</u>	
BENTONITE	
II.1 INTRODUCTION	09
II.2 ORIGINE DE L'ARGILE	09
II.3 CLASSIFICATION DE L'ARGILE	10
II.3.1 La série 1/1 ou la famille des kaolins	10
II.3.2 La série 2/1 ou la famille des micas et des smectites	10
II-3-3 La série 2/1/1 ou la famille des chlorites	11
II-4 STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE	11
II.5 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA MONTMORILLONITE	11
II.5.1 Charge de la montmorillonite	11
II.5.2 Capacité d'échange cationique	13
II.5.3 Hydratation de la montmorillonite	13
<u>Chapitre III</u>	
SUBSTANCES HUMIQUES	
III.1 INTRODUCTION	16
III.2 ORIGINE	16
III.3 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES	18
III.4 EFFETS INDESIRABLES	20
III.5 TRAITEMENT	20
III.5.1 Coaf sur jar test	21
III.5.2 Coaf en lit fluidisé	22
<u>Chapitre IV</u>	
ELECTROCOAGULATION	
IV.1 INTRODUCTION	25
IV.2 ELECTROLYSE	25
IV.3 ELECTROCOAGULATION	25
IV.4 ELECTROFLOTTATION	26
IV.5 ELECTROCOAGULATION SUIVIE PAR ELECTROFLOTTATION	26
IV.6 LOIS QUANTITATIVES DE L'ELECTROLYSE	27
IV.6 DIAGRAMME D'EQUILIBRE ELECTROCHIMIQUE TENSION - pH	28

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre V

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

V.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	32
V.2 TECHNIQUES D'ANALYSE	33
V.3 PREPARATION DE LA SUSPENSION SYNTHETIQUE DE BENTONITE	35
V.4 PREPARATION DE LA SOLUTION SYNTHETIQUE D'ACIDE HUMIQUE	35
V.5 PREPARATION DU COAGULANT	36
V.6 PREPARATION DES ELECTRODES	37

Chapitre VI

RESULTATS & INTERPRETATIONS

VI.1 INTRODUCTION	39
VI.2 COAF SUR JAR TEST	39
VI.2.1 Suspension synthétique de bentonite à 10 NTU	39
VI.2.2 Solution synthétique d'acide humique à 15 mg/l	43
VI.2.3 Suspension mélange (bentonite à 10 NTU et acide humique à 15 mg/l)	45
VI.2.4 Conclusion	49
VI.3 COAF SUR ELECTROLYSEUR	49
VI.3.1 Essai témoin sur une eau du robinet	49
VI.3.2 Electrocoagulation d'une solution d'acide humique	52
VI.3.2.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant	52
VI.3.2.2 Détermination du pH optimal	61
VI.3.2.3 Détermination de la concentration optimale en acide humique	63
VI.3.2.4 Détermination de l'intensité du courant optimale	66
VI.3.3 Electrocoagulation d'une suspension de bentonite	69
VI.3.3.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant	69
VI.3.3.2 Détermination du pH optimal	78
VI.3.3.3 Détermination de la concentration optimale en bentonite	79
VI.3.3.4 Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité	83
VI.3.4 Electrocoagulation d'une suspension mélange de bentonite et d'acide humique	85
VI.3.4.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant	85
VI.3.4.2 Détermination du pH optimal	86
VI.3.4.3 Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité	89
VI.3.5 Conclusion	91

Chapitre VII

ARGILE - HUMUS EN COAF

VII.1 INTRODUCTION	95
VII.2 CHARGE A NEUTRALISER	95
VII.3 MECANISME A RETENIR	100
VII.4 THEORIE DE LA DOUBLE COUCHE ?	102
Tableau Récapitulatif	105
CONCLUSION	107
ANNEXE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION

Approvisionner en eau potable devient tâche difficile pour plusieurs causes et effets entre autres sécheresse et accroissement de la population, ainsi, l'eau superficielle en particulier, contient souvent des polluants d'origine minérale, argiles et organique, substances humiques. Ces substances humiques issues de la biodégradation de débris végétaux et détritus animaux, confèrent à l'eau des colorations jaunâtres - brunâtres et engendrent, lors de la désinfection par chloration, la formation de trihalométhanes qui sont mutagènes et cancérogènes ; par conséquent, il est primordial d'éliminer ces composés indésirables des eaux destinées à la consommation.

INTRODUCTION

Apporter des éléments réponses sur les mécanismes de coagulation-floculation est le but de la présente étude.

En vue d'éclaircir les interférences des mécanismes, les conditions optimales de coagulation - floculation, physico-chimique, sur jar test, ont été suivies, d'une part, pour une solution d'acide humique et, d'autre part, pour une suspension de bentonite ainsi que pour une suspension mélange bentonite + acide humique.

Par ailleurs, la confirmation de tel ou tel mécanisme de coagulation physico-chimique, dans les conditions ainsi définies, est mise en évidence par les observations relevées lors d'une étude de coagulation électrochimique, sur électrolyseur, sur les mêmes solutions et suspensions, permettant alors d'établir une analogie en matière de processus entre coagulation physico-chimique et coagulation électrochimique.

INTRODUCTION

Approvisionner en eau potable devient tâche difficile pour plusieurs causes et effets entre autres sécheresse et accroissement de la population : ainsi, l'eau, superficielle en particulier, contient souvent des polluants d'origine minérale, argiles et organique, substances humiques. Ces substances humiques issues de la biodégradation de débris végétaux et détritiques animaux, confèrent à l'eau des colorations jaunâtres - brunâtres et engendrent, lors de la désinfection par chloration, la formation de trihalométhanes qui sont mutagènes et cancérigènes ; par conséquent, il est primordial d'éliminer ces composés indésirables des eaux destinées à la consommation.

A cette fin, le procédé de coagulation - floculation, fort utilisé dans les stations de traitement des eaux, ne permet pas, tel qu'il est pratiqué, d'éliminer les substances humiques du fait que les mécanismes mis en jeu, lors de la coagulation-floculation de ces composés, ont été longuement méconnus.

Apporter des éléments réponses sur les mécanismes de coagulation-floculation est le but de la présente étude.

En vue d'élucider les interférences des mécanismes, les conditions optimales de coagulation - floculation, physico-chimique, sur jar test, ont été suivies, d'une part, pour une solution d'acide humique et, d'autre part, pour une suspension de bentonite ainsi que pour une suspension mélange bentonite - acide humique.

Par ailleurs, la confirmation de tel ou tel mécanisme de coagulation physico-chimique, dans les conditions ainsi définies, est mise en évidence par les observations relevées lors d'une étude de coagulation électrochimique, sur électrolyseur, sur les mêmes solutions et suspensions, permettant alors d'établir une analogie en matière de processus entre coagulation physico-chimique et coagulation électrochimique.

PARTIE

Chapitre I

THEORIQUE

COAGULATION

-FLOCCULATION

1.1 INTRODUCTION

Clarifier une eau, souvent de surface, ou, en d'autres termes, la débarrasser de toute manière cause de trouble voire de couleur, tel est l'apanage majeur de son traitement.

Les procédés de séparation solide-liquide, décanation et filtration en guise d'exemple, peuvent contribuer, à un degré non-négligeable, à cette clarification, mais

ils n'éliminent pas les colloïdes, ni les particules fines. Ces colloïdes, qui sont de nature inorganique, comme les particules argileuses, ou de nature organique, comme les macromolécules d'origine végétale ou animale, peuvent être éliminés par un traitement physico-chimique de coagulation-flocculation [1].

Chapitre I

COAGULATION

1.2 DEFINITION

Le processus complexe faisant intervenir, en premier lieu, la désstabilisation d'un système colloïdal et, en second lieu, l'agglomération des particules est appelé coagulation-flocculation. Ce processus est appelé

-FLOCCULATION

1.3 L'ETAT COLLOÏDAL

L'état colloïdal est, généralement, associé à des particules de dimension allant de 20 à 5000 Angströms [1]. Ce domaine comprend deux types de colloïdes, suivant leur comportement vis-à-vis du milieu dispersif :

- colloïdes hydrophiles : ce sont des particules qui possèdent une forte affinité pour les molécules d'eau : protéines, polysaccharides, lignine, matière humique, savons, etc. ; elles sont plus difficiles à désstabiliser que les hydrophobes, il faudra les désolvater pour permettre leur agglutination [1].
- colloïdes hydrophobes : ce sont des particules qui ont peu d'affinité pour l'eau : fines particules de silice, manganés précipités colloïdaux, et en moindre

I.1 INTRODUCTION

Clarifier une eau, souvent de surface, ou, en d'autres termes, la débarrasser de toute matière cause de trouble voire de couleur, tel est l'enjeu majeur de son traitement.

Les procédés de séparation solide-liquide, décantation et filtration en guise d'exemple, peuvent contribuer, à un degré non-négligeable, à cette clarification, mais ils n'éliminent ni les colloïdes ni les matières organiques dissoutes.

Ces colloïdes ou quasi-colloïdes étant tantôt de nature minérale, comme les particules argileuses, tantôt de nature organique, comme les macromolécules d'origine végétale ou animale, peuvent être éliminés par un traitement physico-chimique de coagulation-floculation [1].

I.2 DEFINITION

Le processus complexe faisant intervenir, en premier lieu, la déstabilisation d'un système colloïdal et, en second lieu, l'agglomération des particules est appelé : coagulation-floculation [1,2] ; ce bivoque serait abrégé en coaf.

I.3 ETAT COLLOÏDAL

L'état colloïdal est, généralement, associé à des particules de dimension allant de 20 à 5000 Angströms [1]. Ce domaine comprend deux types de colloïdes, suivant leur comportement vis-à-vis du milieu dispersif :

- colloïdes hydrophiles : ce sont des particules qui possèdent une forte affinité pour les molécules d'eau : protéines, polysaccharides, lignine, matière humique, savons, etc.; elles sont plus difficiles à déstabiliser que les hydrophobes, il faudra les désolvater pour permettre leur agglutination [1].
- colloïdes hydrophobes : ce sont des particules qui ont peu d'affinité pour l'eau : fines particules de silice, maints précipités colloïdaux, et en moindre

degré de particules d'argile ; elles sont concernées par la théorie de la double couche [1].

I.4 THEORIE DE LA DOUBLE COUCHE

Pour expliquer la déstabilisation des particules, et la formation du floc, la théorie fait appel à la double couche électrique. Chaque particule colloïdale possède, généralement, une charge négative. Cette charge électrique, située à sa surface, attire les cations, en solution, formant ainsi la couche fixe de HELMHOLTZ (1879), cité par [2]. À leur tour, les ions positifs, qui adhèrent fortement à la particule, attirent des anions accompagnés d'une faible quantité de cations ; c'est la couche diffuse de GOUY, cité par [2]. La couche fixe et la couche diffuse forment ainsi la double couche de STERN, cité par [2], (Figure I.1).

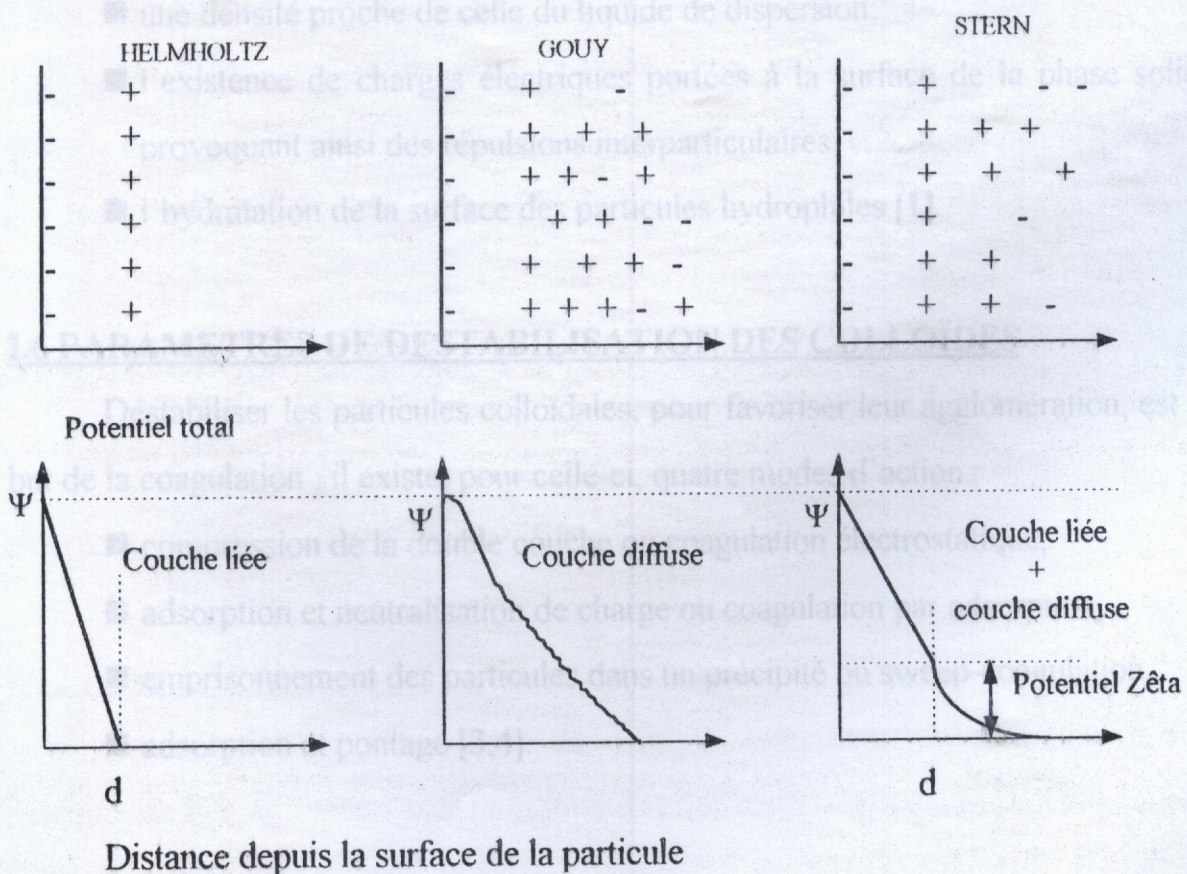


Figure I.1 : - Représentation schématique de la distribution des ions et du potentiel dans la double couche selon les diverses théories - d : épaisseur de la couche liée [2].

I.7 FLOCCULATION ORTHOCINETIQUE

Floculer est, donc, constituer des agrégats à base de particules, déjà déstabilisées et/ou, restantes, encore, vierges, par collision les unes aux autres : cette rencontre est régie par trois processus :

- le mouvement Brownien ou, en d'autres termes, la flocculation péricinétique : elle est fonction de la température du milieu dispersif.
- le mouvement, relatif, des particules dû à la différence de densité entre floccs et particules (décantation),
- l'écoulement du fluide donne naissance à la flocculation orthocinétique : celle-ci est distinguée par la notion du gradient de vitesse [5-8].

I.8 AGENTS DE DESTABILISATION

Déstabiliser ou, en fait, neutraliser la charge, négative, du colloïde en passant de la solution à la couche diffuse et puis de la couche lâche à la couche fixe, telle est la tâche de l'agent déstabilisant dit coagulant. Le choix d'un tel ou tel réactif est dicté par des critères technico-économiques.

I.8.1 Coagulants minéraux

Critères technico-économiques obligent : trivalence, densité élevée et moyenne, disponibilité, non-toxicité, le fer et l'aluminium, de moins en moins en chlorures, sont des plus utilisés [9-24].

I.8.2 Coagulants organiques

Ces polyélectrolytes, à base de carbone, intervenant fréquemment à mi-parcours de la coaf, voient leur utilisation devenir contestée à cause de leur toxicité [11].

II.1 INTRODUCTION

L'argile, matière dont la constitution minéralogique n'a été élaborée qu'au cours du siècle précédent malgré sa connaissance depuis l'antiquité, se trouve dans les sols, les sédiments, et les matériaux naturels en tant que fraction granulométrique inférieure à 20.000 Å ; elle est, essentiellement, constituée de silicates, quelques fois fibreux mais le plus souvent phylliteux, et se trouve accompagnée de quartz, muscovite, calcite, et autres minéraux.

Chapitre II

BENTONITE

II.2 ORIGINE DE L'ARGILE

Le terme bentonite fut utilisé pour désigner une argile montmorillonitique découverte près de Fort Benton aux U.S.A. ; la montmorillonite fut découverte en 1847 dans la montagne de Montmorillon, près de Vienne, en France [25].

En Algérie, c'est dans l'ouest algérien que se trouvent les plus importants gisements de réserve de la bentonite : ceux de M'Zila (Mostaganem) et Hammam Bougrara, capères de Roussel, Dar Embarek et R.M du nord (Tlemcen) ; les réserves sont estimées à trois millions de tonnes [25].

La formation de l'argile peut résulter d'un ou plusieurs processus, à savoir :

- altération hydrothermale liée aux gaz résiduels du processus magmatique,
- altération des roches éruptives de type acide,
- genèse des milieux sédimentaires [25].

II.1 INTRODUCTION

L'argile, matière dont la constitution minéralogique n'a été élaborée qu'au cours du siècle précédent malgré sa connaissance depuis l'antiquité, se trouve dans les sols, les sédiments, et les matériaux naturels en tant que fraction granulométrique inférieure à 20.000 Å ; elle est, essentiellement, constituée de silicates, quelques fois fibreux mais le plus souvent phylliteux, et se trouve accompagnée de quartz, muscovite, calcite, et autres impuretés minérales [25,26].

La bentonite est, quant à elle, un matériau argileux composé de 75% de montmorillonite qui fait partie du groupe des smectites ; ces minéraux, cristallisés, et finement divisés, sont définis, chimiquement, comme étant des phyllosilicates hydratés d'aluminium : ils sont constitués par la superposition de feuillets élémentaires et contiennent, souvent, des cations échangeables, principalement, Ca^{2+} ou Na^+ [25].

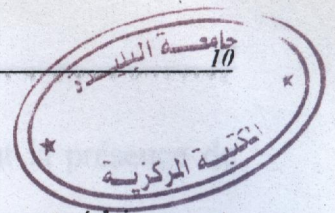
II.2 ORIGINE DE L'ARGILE

Le terme bentonite fût utilisé pour désigner une argile montmorillonitique découverte près de Fort Benton aux U.S.A. ; la montmorillonite fût découverte en 1847 dans la montagne de Montmorillon, près de Vienne, en France [25].

En Algérie, c'est dans l'ouest algérien que se trouvent les plus importants gisements de réserve de la bentonite : ceux de M'Zila (Mostaganem) et Hammam Boughrara, carrières de Roussel, Dar Embarek et R.M du nord (Tlemcen) ; les réserves sont estimées à trois millions de tonnes [25].

La formation de l'argile peut résulter d'un ou plusieurs processus, à savoir :

- altération hydrothermale liée aux gaz résiduels du processus magmatique,
- altération des roches éruptives de type acide,
- genèse des milieux sédimentaires [25].



II.3 CLASSIFICATION DE L'ARGILE

La classification est basée sur les notions structurales : couches octaédriques et tétraédriques et leurs nombres ; en effet, ces paramètres déterminent l'épaisseur du feuillet [25].

II.3.1 La série 1/1 ou la famille des kaolins

Cette famille, caractérisée par un feuillet constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique et une distance interfoliaire de 7\AA , présente deux cas de figure :

- couche dioctaédrique, cette couche n'est pas substituée et l'épaisseur des feuillets peut être constante (kaolinite) ou variable (halloysite) dans le cas de l'intercalation d'eau ;
- couche trioctaédrique, cette couche, en général, n'est pas substituée c'est le cas de l'antigorite ou serpentine [27].

II.3.2 La série 2/1 ou la famille des micas et des smectites

La caractéristique principale réside dans un feuillet comportant une couche octaédrique, en sandwich, entre deux couches tétraédriques ; cette famille, pour laquelle la distance interfoliaire y est de 10\AA , comprend deux groupes selon la nature de la couche octaédrique, à savoir :

- couche dioctaédrique : dans le cas de substitution dans la couche tétraédrique, l'épaisseur des feuillets peut être constante (muscovite et illites) ou variable (vermiculite) ; lorsque cette couche n'est pas substituée, mais que la couche octaédrique peut l'être ou non, l'épaisseur peut être, à son tour, variable (montmorillonite) ou constante (pyrophyllite) respectivement,
- couche trioctaédrique : dans cette situation, également, on rencontre des cas où la couche tétraédrique est substituée (biotite) et des cas où elle ne l'est

pas (talc) ; certains autres cas plus spécifiques concernant la présence de brucite intercalaire (vermiculite) ou non (chlorite) [27].

II-3-3 La série 2/1/1 ou la famille des chlorites

Cette structure incorporant, entre des sandwichs 2/1, des couches supplémentaires de type brucite, présente une distance interfoliaire de 14\AA [27].

II-4 STRUCTURE DE LA MONTMORILLONITE

Les éléments structuraux sont l'octaèdre d'aluminium et le tétraèdre de silicium ; chaque tétraèdre est formé, donc, d'un atome de silicium, au centre, lié à quatre atomes d'oxygène.

Les trois oxygène, formant la base de l'édifice, sont mis en commun avec trois autres tétraèdres avoisinants ; les tétraèdres se combinent, entre eux, pour former une couche tétraédrique.

L'octaèdre est formé par six atomes d'oxygène dont certains, disposés aux sommets de l'édifice, peuvent être liés à un atome d'hydrogène donnant lieu à un groupement hydroxyle OH ; le centre du motif octaédrique est occupé par un cation trivalent Al^{3+} ou parfois Fe^{3+} . À l'instar des tétraèdres (Figure II.1), les octaèdres forment la couche octaédrique du feuillet [25,27,28].

II.5 PROPRIETES PHYSICOCHEMICHES DE LA MONTMORILLONITE

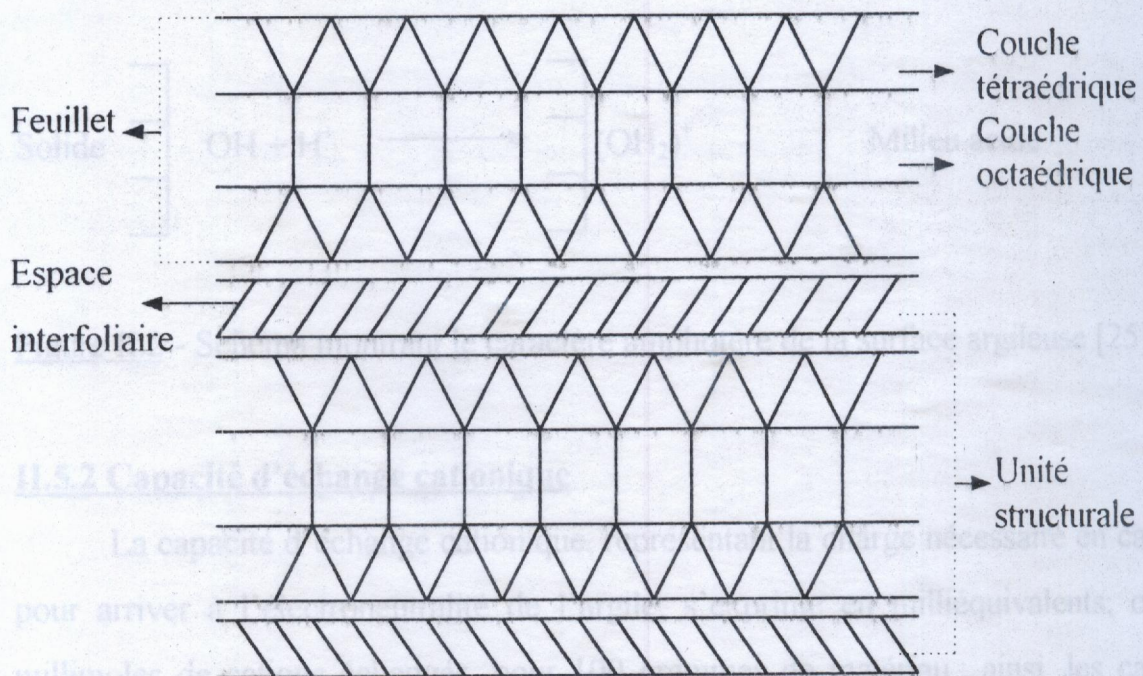
Interpréter un tel ou tel processus lié à la présence d'une argile, en l'occurrence la montmorillonite, s'étaye, souvent, sur les propriétés physicochimiques de ce matériau minéral phylliteux.

II.5.1 Charge de la montmorillonite

La charge de la montmorillonite peut être due à des substitutions isomorphiques, dans le réseau cristallin, qui apparaissent, essentiellement, en couches

octaédriques où l'aluminium est remplacé partiellement par le magnésium ; le déficit de charge, qui en résulte, est compensé par des ions (Na^+ , Ca^{2+}), échangeables, situés entre les feuillets [25].

Le minéral, ayant de faibles déficits de charge et de cations échangeables, ne présente qu'une faible attraction feuillet - feuillet ce qui facilite la pénétration, ou intercalation, de molécules d'eau en écartant les feuillets ; les cations compensateurs s'y trouvent, en conséquence, à l'état hydraté, mobile entre les plans des feuillets, et en excellente position d'échange [25].



Couche : formée par l'empilement de plans associés ; par exemple, couches tétraédriques et octaédriques

Feuillet : une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques

Espace

interfoliaire : l'espace qui se trouve entre les feuillets ; il peut être vide, mais il contient, souvent, des cations, secs ou hydratés, et des groupes hydroxylés.

Unité structurale : association d'un feuillet et d'un espace interfoliaire.

Figure II.1 - Représentation schématique de la structure de montmorillonite [28].

La dissociation des groupes hydroxyles, qui se situent aux extrémités des couches tétraédriques au niveau des liaisons de groupements [Si OH], est formée par hydrolyse d'une molécule d'eau ; l'ionisation de ces groupes de surface dépend du pH du milieu, donc en milieu basique l'ion H^+ peut être remplacé par un cation (Figure II.2).

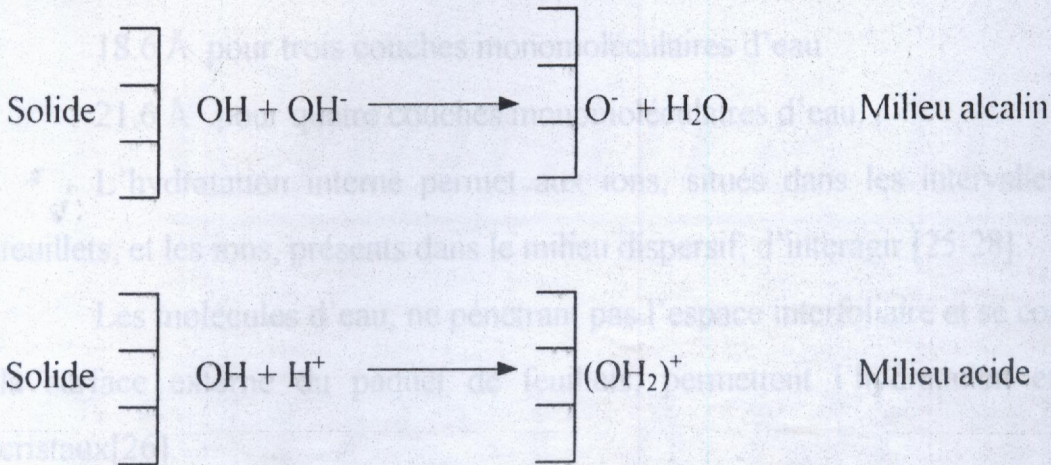


Figure II.2 - Schéma montrant le caractère amphotère de la surface argileuse [25].

II.5.2 Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique, représentant la charge nécessaire en cations pour arriver à l'électroneutralité de l'argile, s'exprime en milliéquivalents, ou en millimoles de cations échangés, pour 100 grammes de matériau ; ainsi, les cations compensateurs de la montmorillonite pouvant être remplacés par d'autres cations, et ce par lavage avec les solutions de ceux-ci, s'identifient aux cations échangeables et le taux de substitution isomorphe détermine la capacité d'échange cationique de la montmorillonite qui oscille entre 80 et 150 milliéquivalents par 100 grammes de bentonite [25].

II.5.3 Hydratation de la montmorillonite

Les molécules d'eau, pénétrant l'espace interfoliaire suite à l'attraction des cations y fixés (Na^+ , Ca^{2+}), s'organisent en couches moléculaires planes et font

augmenter ainsi la distance entre feuillets pour donner naissance au gonflement ou hydratation interne ; la distance interfoliaire est de :

- 9.6 Å pour la montmorillonite anhydre
- 12.6 Å pour une couche monomoléculaire d'eau
- 15.6 Å pour deux couches monomoléculaires d'eau
- 18.6 Å pour trois couches monomoléculaires d'eau
- 21.6 Å pour quatre couches monomoléculaires d'eau.

L'hydratation interne permet aux ions, situés dans les intervalles entre les feuillets, et les ions, présents dans le milieu dispersif, d'interagir [25-28].

Les molécules d'eau, ne pénétrant pas l'espace interfoliaire et se contentant de la surface externe du paquet de feuillets, permettent l'hydratation externe des cristaux[26].

III.1 INTRODUCTION

Pour une eau superficielle, la teneur en matière organique y est élevée et peut excéder la dizaine de milligrammes, en termes de carbone organique dissous, par litre, dont 40 à 90% constituent une fraction, des plus importantes à savoir acides humique et fulvique, des substances humiques [29]

Chapitre III

SUBSTANCES

HUMIQUES

Figure III.1 - Schéma de l'humification [30]

Les précurseurs humiques, produits par la biodégradation de la matière organique originelle, animale et végétale [29,31], sont des composés aliphatiques simples (sucres, acides aminés) et des composés contenant des cycles phénoliques qui proviennent de l'hydrolyse des tannins, substances polyphénoliques des plantes [29], et de la décomposition de la lignine [30], polymère amorphe du phénylpropane dans les cellules de bois [29]

Par insolubilisation et polymérisation, les précurseurs solubles évoluent, très rapidement, vers des substances humiques, en s'oxydant sous l'influence de

III.1 INTRODUCTION

Pour une eau superficielle, la teneur en matière organique y est élevée et peut excéder la dizaine de milligrammes, en termes de carbone organique dissous, par litre, dont 40 à 90% constituent une fraction, des plus importantes à savoir acides humique et fulvique, des substances humiques [29].

III.2 ORIGINE

La matière végétale [30], décomposée par l'activité biologique du sol, donne naissance à des éléments minéraux solubles ou gazeux (SO_4^{2-} , NH_3 , etc.) et à des complexes colloïdaux (substances humiques) qui sont stables et résistants à l'action microbienne (Figure III.1) [30].

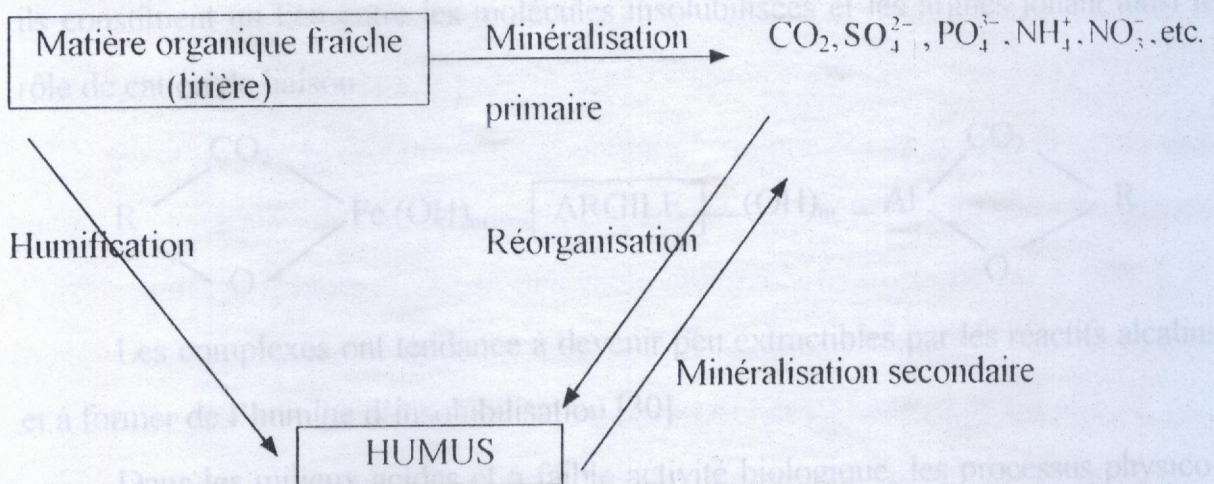


Figure III.1 - Schéma de l'humification [30]

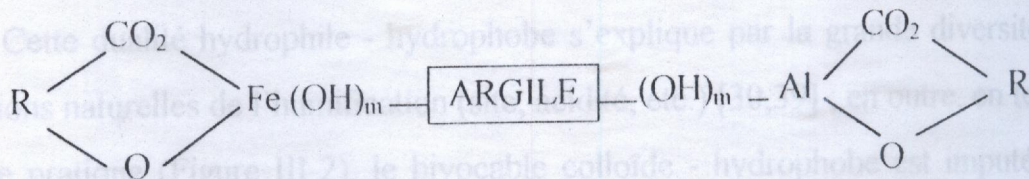
Les précurseurs humiques, produits par la biodégradation de la matière organique originelle, animale et végétale [29,31], sont des composés aliphatiques simples (sucres, acides aminés) et des composés contenant des cycles phénoliques qui proviennent de l'hydrolyse des tannins, substances polyphénoliques des plantes[29], et de la décomposition de la lignine [30], polymère amorphe du phényl propane dans les cellules de bois [29].

Par insolubilisation et polymérisation, les précurseurs solubles évoluent, très rapidement, vers des substances humiques, en s'oxydant sous l'influence des

polyphénol-oxydases microbiennes. Il se forme d'abord des acides fulviques, dont les chaînes aliphatiques l'emportent sur les noyaux aromatiques, puis des acides humiques, caractérisés par l'augmentation du volume des noyaux et diminution des chaînes aliphatiques, et enfin l'humine, en présence de l'oxyde de fer, à noyaux aromatiques très condensés mais pauvre en chaînes aliphatiques et en groupements fonctionnels, carboxyliques en particulier, ce qui abaisse leur solubilité :

Précurseurs → Acides fulviques → Acides humiques → Humine d'insolubilisation [30].

Les cations lourds (Al^{3+} , Fe^{3+}) insolubilisent les précurseurs phénoliques et forment avec les composés humiques des complexes. Les hydroxydes de fer cristallisent les processus de polymérisation enfin, adsorbés à la surface des argiles, ils constituent un lien entre les molécules insolubilisées et les argiles jouant ainsi le rôle de cation de liaison :



Les complexes ont tendance à devenir peu extractibles par les réactifs alcalins et à former de l'humine d'insolubilisation [30].

Dans les milieux acides et à faible activité biologique, les processus physico-chimiques l'emportent sur le processus biologique [30].

Selon ODEN (1919), cité par [32,33], les composés humiques sont fractionnés en quatre groupes :

- les humines insolubles dans une base forte,
- les acides humatéméliques et les acides humiques solubles dans une base forte et insolubles dans un acide fort (les premiers sont solubles dans les alcools, les seconds ne le sont pas),
- les acides fulviques solubles à la fois dans un acide fort et une base forte [32,33].

Les composés humiques jouent un rôle dans plusieurs procédés biochimiques telle que la détermination des propriétés des différentes matières dans la nature [34].

III.3 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Conférant des teintes jaunâtre ou brunâtre à l'eau et contribuant à sa turbidité, les composés humiques se situent près de la limite inférieure du domaine colloïdal ; en effet, leur taille est estimée à 4.7 ou même 100 Å [35,36].

Les composés humiques, notamment acides fulvique et humique, contiennent des groupes fonctionnels carboxyliques, hydroxyliques, et phénoliques, en moindre nombre [37], qui, une fois dissous dans l'eau, deviennent, en fonction du pH [31], plus ou moins dissociés, formant des polyélectrolytes de charge négative [15,38] ; ces composés sont, donc, des subcolloïdes [14] hydrophiles [1,22,33,35,39-41].

D'autre part, le caractère hydrophobe peut s'attribuer à ces structures moléculaires complexes [15,16].

Cette dualité hydrophile - hydrophobe s'explique par la grande diversité des conditions naturelles de l'humification (site, acidité, etc.) [30,39] ; en outre, en termes d'ordre pratique (Figure III-2), le bivocable colloïde - hydrophobe est imputé à la fraction de masse moléculaire la plus élevée et aux humines, et le bivocable subcolloïde (ou macromolécule ou bien polyélectrolyte) - hydrophile est affecté, par ordre croissant de priorité, aux acides humiques, hymatomélaniques, et fulviques.

Les masses moléculaires des substances humiques sont, en général, inférieures à 10.000 g/mole [29,43], mais une faible partie (10% de la matière humique) se présentant sous forme colloïdale aurait une masse moléculaire supérieure à 100.000 g/mole [29]. Leur composition élémentaire moyenne est [29,44] :

C = 40 à 60 %

O = 30 à 50 %

H = 4 à 6 %

N = 0.5 à 2 %

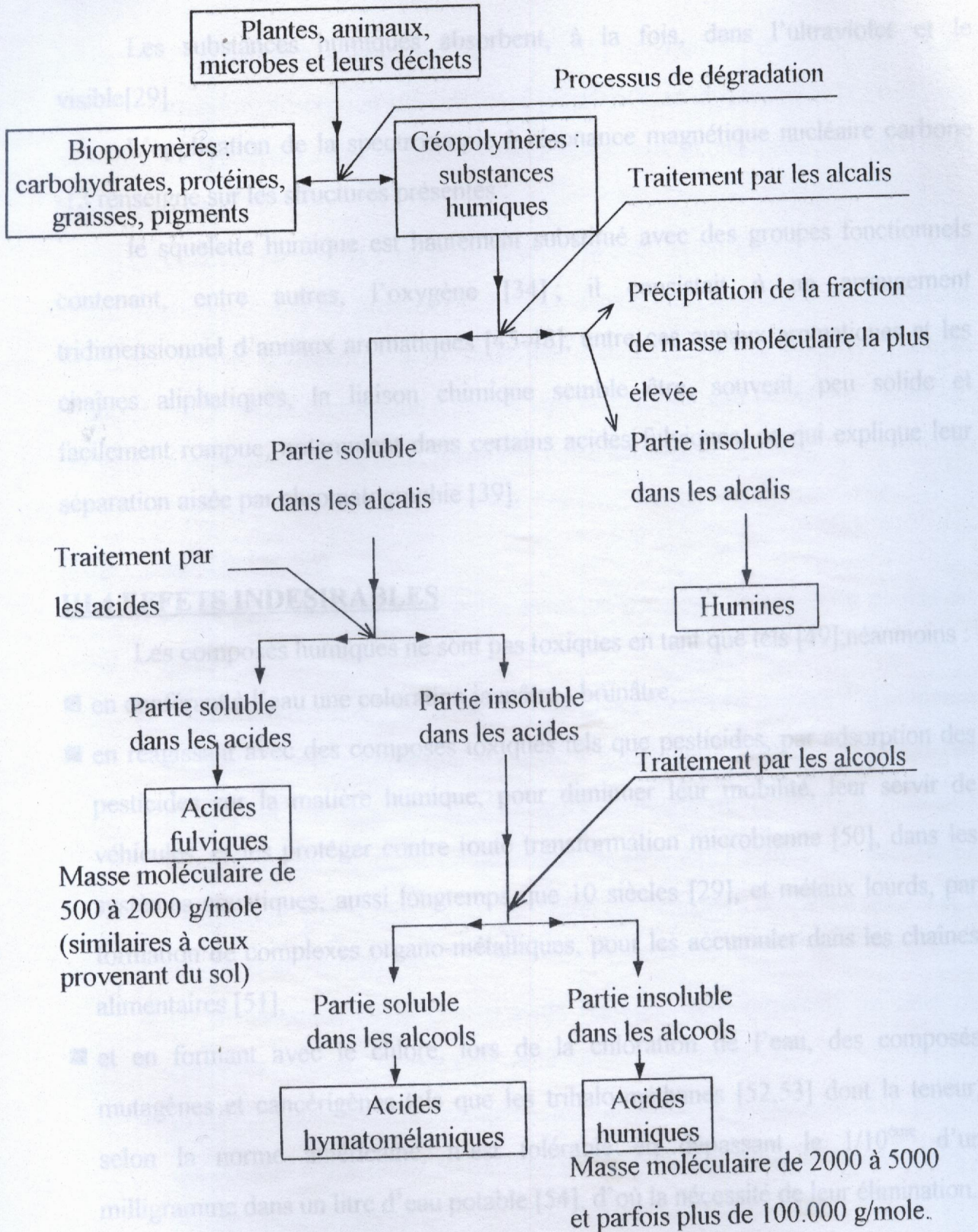


Figure III.2 - Origine et fractionnement des substances humiques selon

SAAR et WEBER (1982), cités par [24].

Les substances humiques absorbent, à la fois, dans l'ultraviolet et le visible [29].

L'application de la spectroscopie à résonance magnétique nucléaire carbone-13 renseigne sur les structures présentes :

le squelette humique est hautement substitué avec des groupes fonctionnels contenant, entre autres, l'oxygène [34]; il consistait à un arrangement tridimensionnel d'anneaux aromatiques [45-48], entre ces anneaux aromatiques et les chaînes aliphatiques, la liaison chimique semble être, souvent, peu solide et facilement rompue, notamment dans certains acides fulviques, ce qui explique leur séparation aisée par chromatographie [39].

III.5.1 Coaf sur jar test

III.4 EFFETS INDESIRABLES

Les composés humiques ne sont pas toxiques en tant que tels [49]; néanmoins :

- en conférant à l'eau une coloration jaunâtre - brunâtre,
- en réagissant avec des composés toxiques tels que pesticides, par adsorption des pesticides sur la matière humique, pour diminuer leur mobilité, leur servir de véhicules, et les protéger contre toute transformation microbienne [50], dans les systèmes aquatiques, aussi longtemps que 10 siècles [29], et métaux lourds, par formation de complexes organo-métalliques, pour les accumuler dans les chaînes alimentaires [51],
- et en formant avec le chlore, lors de la chloration de l'eau, des composés mutagènes et cancérigènes tels que les trihalo-méthanés [52,53] dont la teneur, selon la norme américaine, n'est tolérable en dépassant le $1/10^{\text{ème}}$ d'un milligramme dans un litre d'eau potable [54], d'où la nécessité de leur élimination.

III.5 TRAITEMENT

Éliminer la matière organique, humique en particulier, ou, à la limite, réduire sa concentration dans l'eau à consommer est accompli, en l'occurrence, par des

procédés d'oxydation chimique, ozonation [32,55] notamment, et par des procédés par transformation, adsorption [56-64], coaf [56,57,60], et ultrafiltration [42,65] ; ces procédés [60], couplés à des techniques électriques voire acoustiques [66], devraient être améliorés.

La coaf sur jar test, la coaf en lit fluidisé, la coaf en lit filtrant, l'adsorption, et l'ultrafiltration tels sont les procédés examinés, dans notre Laboratoire de Traitement des Eaux, en vue d'éliminer l'acide humique, commercialisé par Aldrich Chemical Company, de solution synthétique à base d'eau distillée ou eau de robinet ; dans ce qui suit, un sommaire sur les deux premières coafs est exposé.

III.5.1 Coaf sur jar test

L'étude de la réduction de l'acide humique par coaf sur jar test a permis de conclure que :

- le chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) est plus efficace en matière d'abattement de la matière organique que le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ; en effet, pour une concentration en acide humique de 15 mg/l, la réduction pour le chlorure ferrique est de l'ordre de 84% à pH 4.5 et à une dose de 12 mg/l, tandis que la réduction pour l'alun est de l'ordre de 78% à pH 5.5 et à une dose de 20 mg/l ;
- les mécanismes de la coaf d'acide humique sont différents de ceux de colloïdes minéraux, d'une part, pour un :
 - $\text{pH} \leq 4$, l'acide humique complexe les Fe^{3+} ou Al^{3+} , majoritaires à ce pH, ce qui conduit à une faible élimination (72% à 10 mg/l pour le premier, 52% à 20 mg/l pour le second),
 - $4 < \text{pH} \leq 6.5$, la réduction de l'acide humique est optimale et, nombreuses sont les réactions possibles : formation de complexes insolubles, formation de complexes de surface, et adsorption ionique,

- $\text{pH} \geq 7$, la réduction du polluant organique est moins importante (63% à 26mg/l pour le premier, 70% à 26 mg/l pour le second), les réactions d'hydrolyse sont cinétiquement favorisées,
- d'autre part, la zone optimale de réduction (supérieure ou égale à 50%) de l'acide humique portée sur le diagramme de stabilité d'alun et du chlorure ferrique coïncide avec la zone de restabilisation de colloïdes minéraux [67].

III.5.2 Coaf en lit fluidisé

L'étude de la réduction de l'acide humique par coaf en lit fluidisé, sur une installation expérimentale réalisée au Laboratoire, a permis à GHERNAOUT [7] de conclure que :

- la déstabilisation par neutralisation de charge des macromolécules organiques a lieu pendant l'étape de coagulation, de l'injection du coagulant vers l'amont du lit, puisque des colloïdes y sont observés, ces derniers sont agglutinés durant l'étape de floculation, au sein du milieu granulaire, mettant en jeu à la fois les grains de résine et les microflocs,
- l'élimination de l'acide humique, pour un pH optimal égal à 6, en fonction du gradient de vitesse est y régie ainsi :
- une première zone dont le gradient de vitesse varie de 62 à 120 s^{-1} pour la coagulation (temps de séjour de 259 à 130 s) et de 44 à 54 s^{-1} pour la floculation (temps de séjour de 502 à 333 s) marquée par une élimination de 80% qui ne peut être imputée qu'à une filtration puisque le taux d'expansion, dans ces conditions, n'y excède pas 1%,
- une deuxième zone dont le gradient de vitesse s'étend de 120 à 350 s^{-1} pour la coagulation (temps de séjour de 130 à 43 s) et de 54 à 71 s^{-1} pour la floculation (temps de séjour de 333 à 193 s) où effectivement la floculation a lieu, la réduction optimale est de 70% pour un gradient de vitesse de 177 s^{-1} pour la coagulation (temps de séjour de 86 s) et de 60 s^{-1} pour la floculation

(temps de séjour de 4.47 minutes au lieu de 30 minutes pour le procédé classique), pour un taux d'expansion égal à 25%,

- l'élimination de l'acide humique en fonction de la dose du coagulant est y dictée comme suit :
 - pour des doses inférieure ou égale à 5 mg/l, aucune réduction n'a été décelée,
 - pour une dose de 10 mg/l, la réduction atteint 63%,
 - pour des doses comprises entre 15 et 18 mg/l, la réduction est de 70%,
- l'influence de la hauteur du lit sur la réduction de l'acide humique a révélé que :
 - pour une hauteur de 180cm (gradient de vitesse constant, temps de séjour 568 s), la réduction n'a pas dépassé les 72%,
 - pour une hauteur de 41cm (gradient de vitesse constant, temps de séjour 129 s), la réduction était estimée à 31%,
 - pour un essai sans grains de résines donc l'étape de floculation en milieu granulaire y a été écartée, l'absorbance à 395 nm augmentait, au lieu de diminuer, à un taux de 20%, ceci suggère la formation de complexes humiques - métalliques espèces à pouvoir absorbant élevé [7],
- la performance de ce procédé, de coagulation en ligne et floculation en lit fluidisé, est imputée, entre autres, à l'absence du phénomène de mélange axial ; en effet, selon une étude [69] théorique, il s'est révélé que le réacteur à écoulement piston, parmi d'autres, n'est pas affecté de mélange en retour en d'autres termes, en l'occurrence, toutes les molécules d'acide humique auraient le temps et l'espace, à optimiser, nécessaires pour être neutralisées.

ELECTROCOAGULATION

La voie électrolytique est souvent utilisée pour plusieurs raisons, parmi lesquelles, la possibilité d'obtenir des produits différents, en partant de la même substance, de séparer les constituants d'un mélange, et d'en éliminer les impuretés [70-72].

Chapitre IV

IV.2 ELECTROLYSE

L'électrolyse est un processus chimique qui se produit sous l'effet du courant électrique ; les réactions sont très diverses suivant la nature du solvant, le matériau des électrodes, et la présence d'autres substances en solution.

En atteignant l'électrode pendant la séparation, les ions perdent leurs charges, en partie ou complètement, et se transforment le plus souvent en atomes neutres ou en groupes d'atomes qui se déposent sur l'électrode (s'ils sont instables à l'état libre) donnant lieu à des réactions secondaires, entre eux ou avec les molécules du solvant (oxydation ou réduction des électrodes ou des produits). Les réactions d'oxydoréduction : oxydation anodique et réduction cathodique.

Le choix du matériau anodique, utilisé pour l'oxydation anodique, est assez restreint ; au cours de cette oxydation, l'anode se corrompt facilement. Les matériaux anodiques, habituellement utilisés, sont : le platine, le carbone, et le fer (sous sa forme ordinaire ou en alliage avec du nickel).

Les procédés électrolytiques les plus utilisés sont l'électrocoagulation et l'électroflottation [70-72].

IV.3 ELECTROCOAGULATION

Pour obtenir la déstabilisation et l'agrégation des particules colloïdales, les ions métalliques, produits par dissolution électrolytique d'une anode de fer,

IV.1 INTRODUCTION

La voie électrolytique est souvent utilisée pour plusieurs raisons, parmi lesquelles, la possibilité d'obtenir des produits différents, en partant de la même substance, de séparer les constituants d'un mélange, et d'en éliminer les impuretés [70-72].

IV.2 ELECTROLYSE

L'électrolyse est le processus au cours duquel des réactions chimiques se produisent sous l'effet du courant électrique ; les réactions sont très diverses suivant la nature du solvant, le matériau des électrodes, et la présence d'autres substances en solution.

En atteignant l'électrode correspondante, les ions de la solution perdent leurs charges, en partie ou complètement, en se transformant le plus souvent en atomes neutres ou en groupes d'atomes qui se déposent sur l'électrode (s'ils sont instables à l'état libre) donnant lieu à des réactions secondaires, entre eux ou, avec les molécules du solvant (eau) ou, avec les autres substances dissoutes ou, encore, avec le matériau de l'électrode ; dans sa totalité, ce processus constitue toujours une réaction d'oxydoréduction : oxydation anodique et réduction cathodique.

Le choix du matériau anodique, utilisé pour l'oxydation anodique, est assez restreint ; au cours de cette oxydation, l'anode se corrode facilement. Les matériaux anodiques, habituellement utilisés, sont : le platine, le carbone, et le fer (sous sa forme ordinaire ou en alliage avec du nickel).

Les procédés électrolytiques les plus utilisés sont : électrocoagulation et électroflottation [70-72].

IV.3 ELECTROCOAGULATION

Pour obtenir la déstabilisation et l'agrégation des particules colloïdales, les ions métalliques, produits par dissolution électrolytique d'une anode de fer,

neutralisent directement les charges des particules ou, avec les ions OH^- , disponibles par la décharge à la cathode des protons, donnent des produits hydroxylés qui forment des floccs ; ce type de traitement, dans lequel le déplacement ionique augmente la probabilité de rencontre des particules chargées, permet d'atteindre la coagulation des colloïdes les plus fins.

Au cours de l'électrocoagulation, les résultats obtenus affirment que :

premièrement, la quantité du métal dissous croît linéairement avec la durée de passage du courant ; ainsi, la droite (courbe de dissolution du métal - fer - en fonction du temps de passage du courant) correspond bien à une dissolution d'ions sous forme divalente ; effectivement, si, au début du traitement d'électrocoagulation, la solution prend une teinte rousse, due à l'oxydation par l'oxygène dissous des premiers ions ferreux formés, très rapidement la teinte devient verte caractéristique des ions Fe^{2+} , le floc obtenu est un floc mixte ferrique - ferreux,

en deuxième lieu, pour les très faibles concentrations du produit à éliminer, le taux d'élimination est relativement constant [70].

IV.4 ELECTROFLOTTATION

Elle fait appel, quant à elle, à la production, au niveau d'électrodes inattaquables, de microbulles d'oxygène et d'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau ; les microbulles entraînent, vers la surface eau - air, les produits à éliminer ou les particules en suspension [70].

IV.5 ELECTROCOAGULATION SUIVIE PAR ELECTROFLOTTATION

En combinant les deux techniques, électrocoagulation suivie par électroflottation, les ions métalliques, solubilisés à l'anode, et les produits hydroxylés, qui s'organisent, forment un floc. Ions et molécules de la matière à éliminer vont pouvoir, s'adsorber sur le floc ou, être piégés dans le réseau formé ; des

phénomènes, d'attraction électrique, avec création de liaisons ioniques ou hydrogène, peuvent faciliter cette fixation [70].

IV.6 LOIS QUANTITATIVES DE L'ELECTROLYSE

Il existe des relations rigoureuses entre la quantité d'électricité, qui a traversé la solution, et la quantité de substance dégagée lors d'une électrolyse ; ces relations ont été établies par Faraday en 1830 [70].

D'après la première loi de Faraday, dans tout processus d'électrolyse, la quantité de substance transformée est proportionnelle à l'intensité du courant et de la durée de son passage, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui l'a traversée.

La seconde loi de Faraday caractérise l'influence de la nature des ions ; elle établie que le passage d'une même quantité d'électricité, à travers des solutions de divers électrolytes, libère chaque substance en quantité proportionnelle à son équivalent chimique. En outre, la quantité d'électricité nécessaire, pour libérer un équivalent - gramme d'un corps quelconque, est égale à : $1F = 96500 \text{ C}$.

La loi définitive de Faraday est [70] :

$$m = \frac{M}{Z \cdot F} \cdot I \cdot t \quad (\text{IV.1})$$

où :

- m : quantité de substance dégagée (g)
- M : masse molaire de l'espèce mise en jeu (g/mole)
- Z : nombre d'électrons (nombre de valence) de l'espèce mise en jeu
- F : nombre de Faraday ($1F = 96500 \text{ Coulombs.mole}^{-1}$)
- I : intensité du courant (Ampères)
- t : temps (secondes)

IV.6 DIAGRAMME D'EQUILIBRE ELECTROCHIMIQUE TENSION - pH

Les diagrammes tension - pH permettent de déterminer dans quels domaines de tension et de pH une espèce donnée (élément de ses composés) est stable.

Il convient de signaler que la présence éventuelle, dans la solution, de complexant ou de composés pouvant donner des sels insolubles, peut modifier notamment l'allure du diagramme tension - pH d'un métal ; il convient, également, de rappeler la signification des termes suivants :

corrosion : la corrosion, ou la solubilisation d'un métal, est un phénomène caractérisant la détérioration de ce métal sous l'action du milieu environnant,

immunité : état du métal dont la corrosion est thermodynamiquement impossible sous l'action du milieu environnant (domaine de protection cathodique) : le métal est thermodynamiquement stable,

passivité : état du métal dont la corrosion sous l'action du milieu environnant est empêchée par certaines modifications de sa surface,

passivation : les phénomènes de passivation, i.e. la formation de films ou superficiels, empêchant partiellement la dissolution du métal (Figure IV.1).

Donc la forme solide stable n'est pas le métal mais son oxyde, son hydroxyde, son hydrure, ou son sel ; le métal tend, alors, à se recouvrir de cet oxyde, hydroxyde, hydrure, ou sel, qui peut, selon le cas, soit former sur le métal un film non - poreux qui empêche pratiquement tout contact direct entre le métal lui-même et la solution, soit former sur le métal un dépôt qui ne soustrait que partiellement le métal au contact de la solution [70-72].

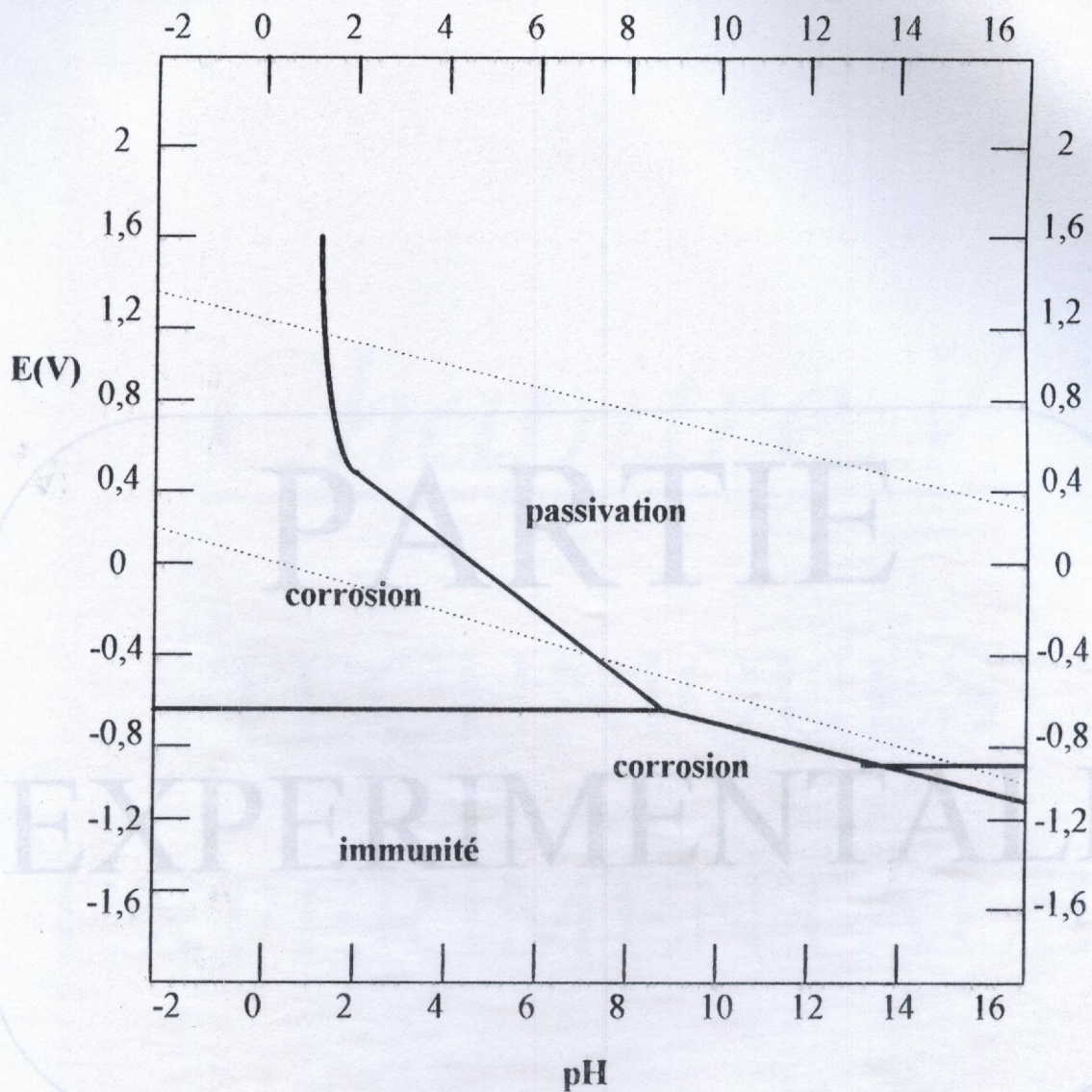


Figure IV.1 - Circonstances théoriques de corrosion, d'immunité et de passivation du fer [70].

Chapitre V

PARTIE

EXPERIMENTALE

*TECHNIQUES
EXPERIMENTALES*

V.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Les essais de coag ont été réalisés sur un jar test de type WRC composé d'une batterie de six béciers fonctionnant simultanément (Figure V.1), tandis que ceux de l'électrocoagulation ont été effectués à l'aide d'une installation montée au Laboratoire (Figure V.2).

Chapitre V

TECHNIQUES

EXPERIMENTALES

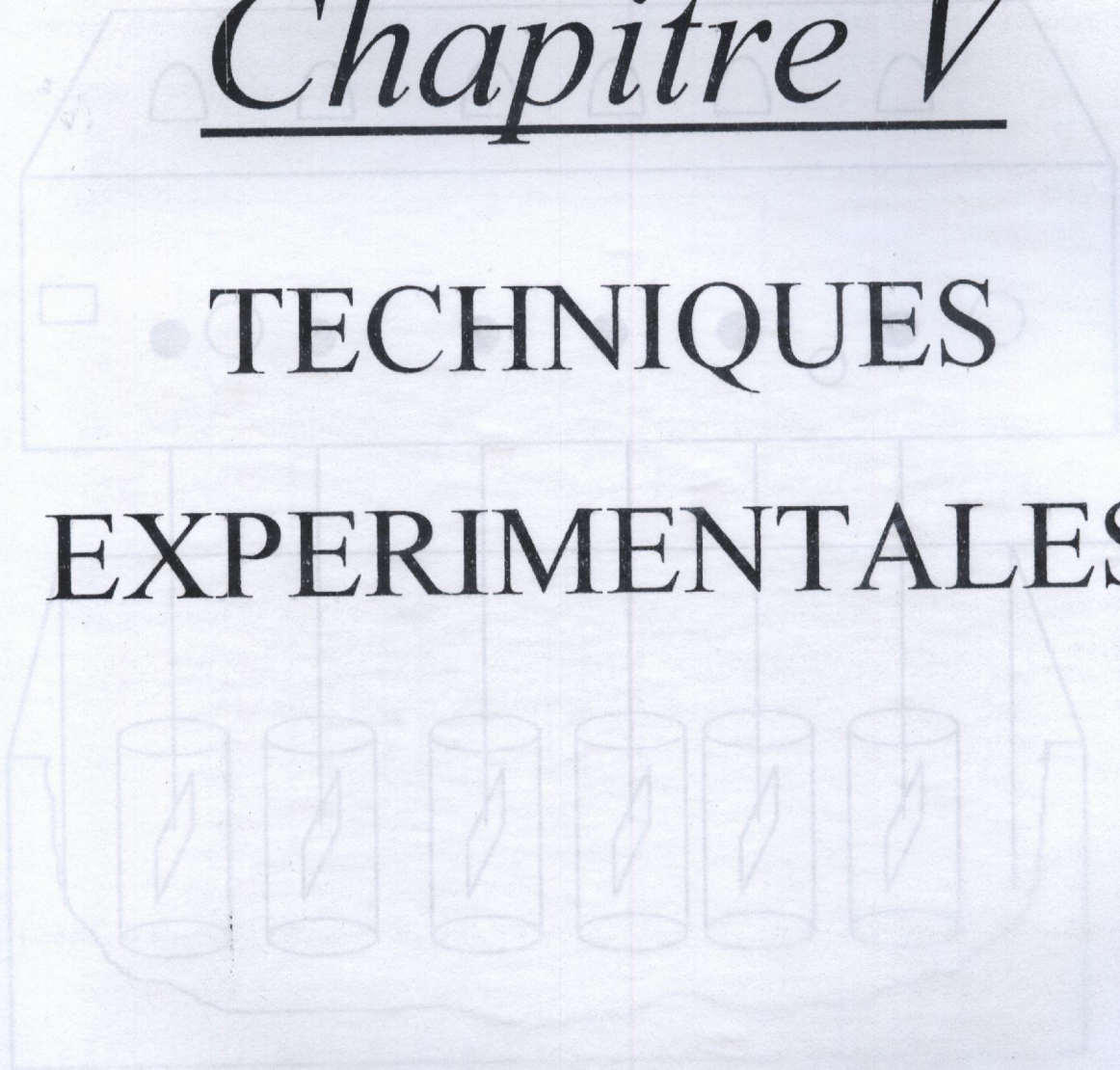


Figure V.1 - Schéma d'un jar test.

V.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Les essais de coaf ont été réalisés sur un jar test de type WRC composé d'une batterie de six bâteaux fonctionnant simultanément (Figure V.1), tandis que ceux de l'électrocoagulation ont été effectués à l'aide d'une installation montée au Laboratoire (Figure V.2).

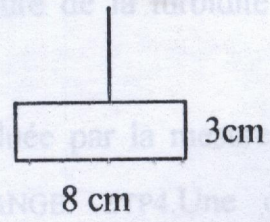
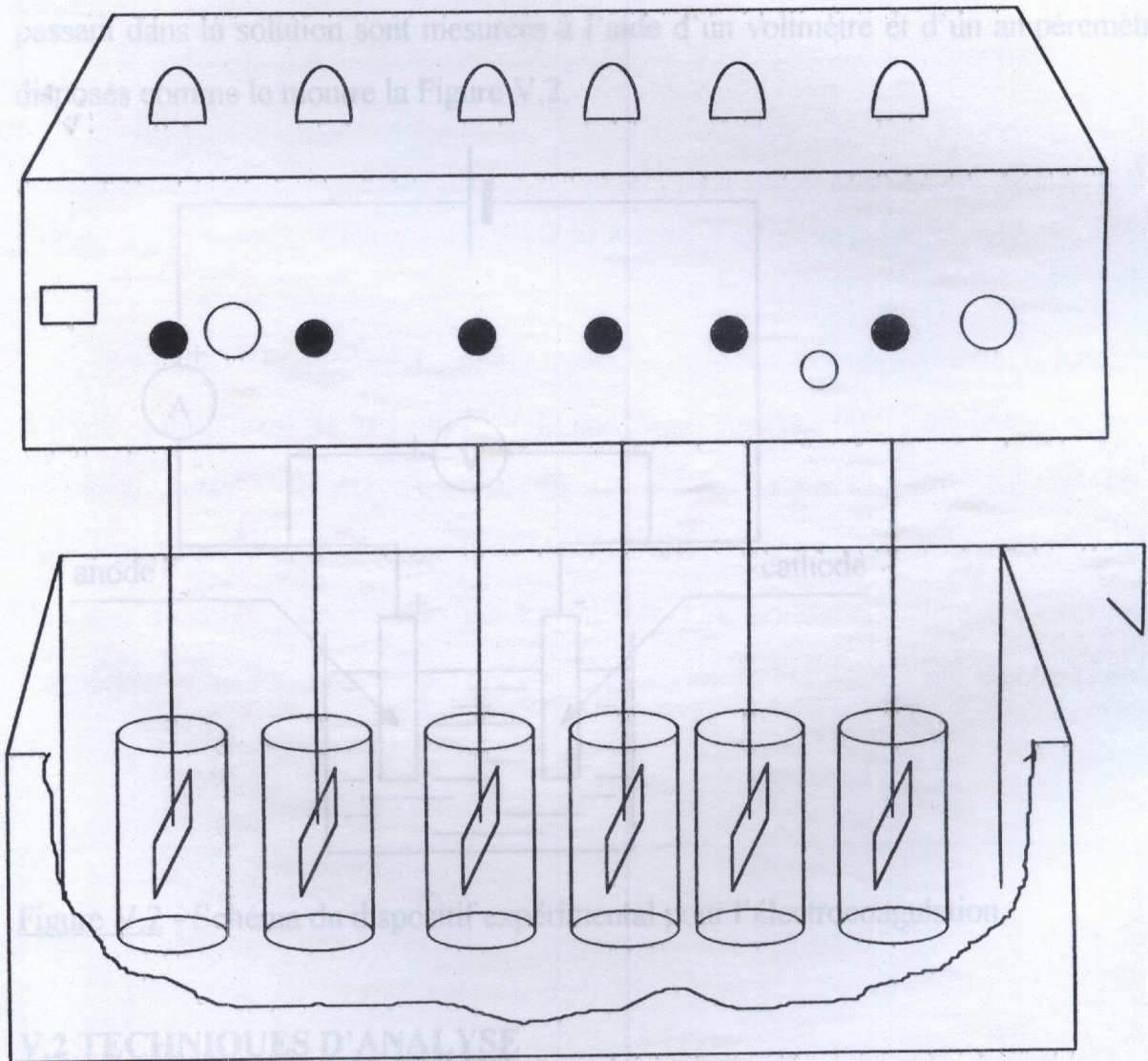


Figure V.1 - Schéma d'un jar test.

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est composé de deux électrodes, en acier ordinaire, de mêmes dimensions, plongées dans un bêcher de 100ml de volume, de surface immergée, pour chaque électrode, de 14.68 cm^2 et la distance les séparant est de 3 cm, ces deux paramètres seront maintenus constants ; les électrodes sont branchées aux bornes d'une alimentation (générateur STATRON, type 3217) de tension maximale de 30 Volts, la tension et l'intensité du courant passant dans la solution sont mesurées à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre disposés comme le montre la Figure V.2.

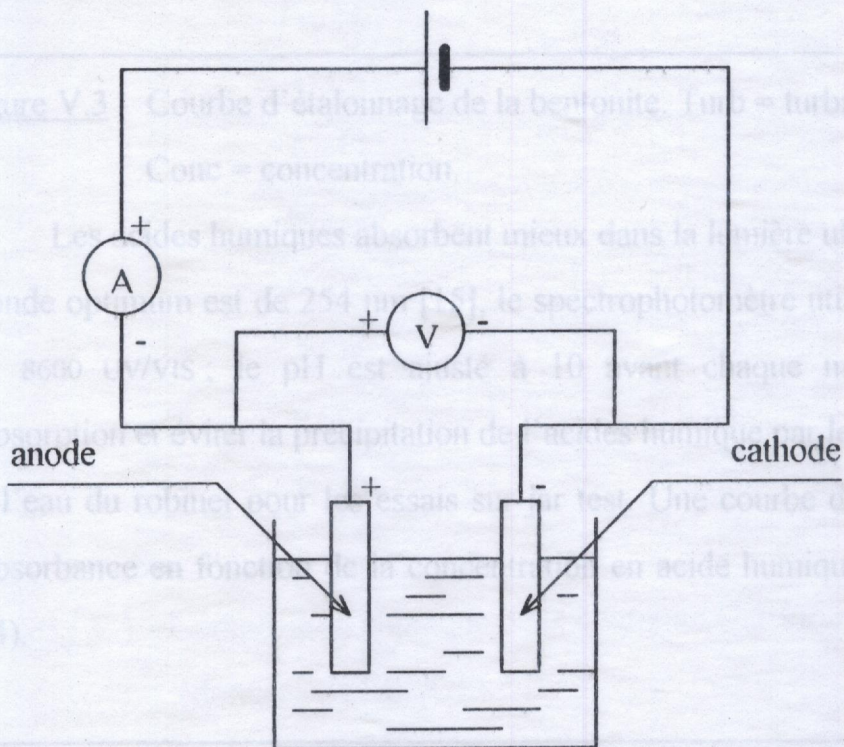


Figure V.2 - Schéma du dispositif expérimental pour l'électrocoagulation.

V.2 TECHNIQUES D'ANALYSE

Les analyses effectuées se sont portées sur la mesure de la turbidité et de l'absorbance U.V.

L'élimination des particules de bentonite a été évaluée par la mesure de la turbidité à l'aide d'un turbidimètre de type DR. LANGE. LTP4. Une courbe

d'étalonnage à pH=7 reliant la turbidité à la concentration en bentonite a été tracée (Figure V.3).

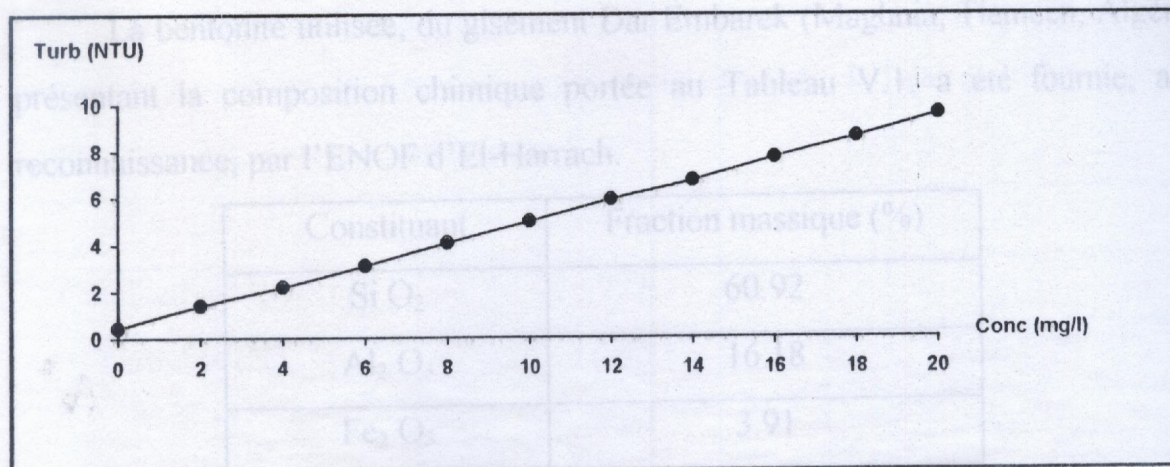


Figure V.3 - Courbe d'étalonnage de la bentonite. Turb = turbidité,
Conc = concentration.

Les acides humiques absorbent mieux dans la lumière ultraviolette, la longueur d'onde optimum est de 254 nm [15], le spectrophotomètre utilisé est le PYE UNICAM PU. 8600 UV/VIS ; le pH est ajusté à 10 avant chaque mesure pour améliorer l'absorption et éviter la précipitation de l'acides humique par les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+}) de l'eau du robinet pour les essais sur jar test. Une courbe d'étalonnage exprimant l'absorbance en fonction de la concentration en acide humique a été établie (Figure V.4).

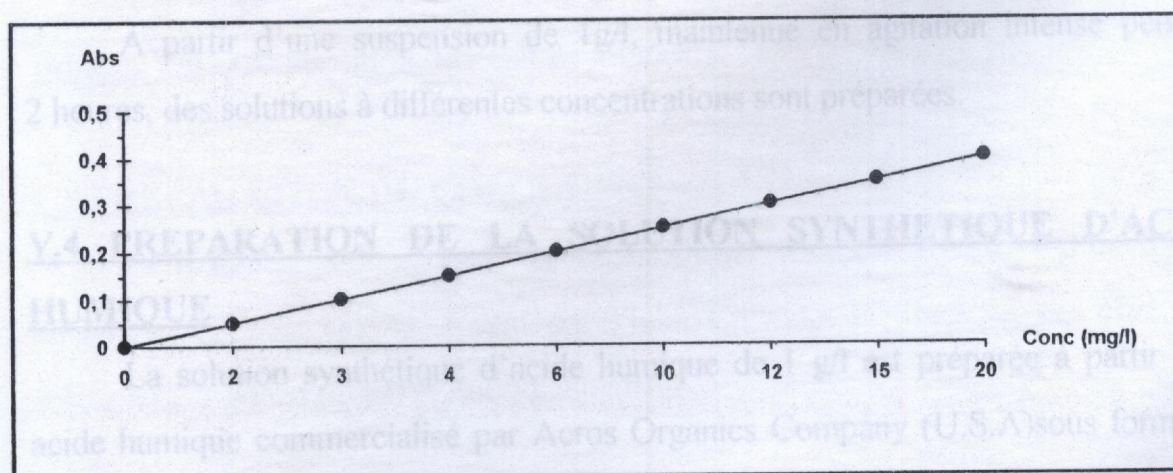


Figure V.4 - Courbe d'étalonnage de l'acide humique. Abs = absorbance.

V.3 PREPARATION DE LA SUSPENSION SYNTHETIQUE DE BENTONITE

La bentonite utilisée, du gisement Dar Embarek (Maghnia, Tlemcen, Algérie), présentant la composition chimique portée au Tableau V.1, a été fournie, avec reconnaissance, par l'ENOF d'El-Harrach.

Constituant	Fraction massique (%)
Si O ₂	60.92
Al ₂ O ₃	16.18
Fe ₂ O ₃	3.91
Ti O ₂	0.36
Ca O	1.91
Mg O	4.12
Na ₂ O	0.68
SO ₃	0.10
PAF*	9.34
K ₂ O	1.09

* : Perte au feu

Tableau V.1 - Composition chimique de la bentonite Dar Embarek (données de l'ENOF).

À partir d'une suspension de 1g/l, maintenue en agitation intense pendant 2 heures, des solutions à différentes concentrations sont préparées.

V.4 PREPARATION DE LA SOLUTION SYNTHETIQUE D'ACIDE HUMIQUE

La solution synthétique d'acide humique de 1 g/l est préparée à partir d'un acide humique commercialisé par Acros Organics Company (U.S.A) sous forme de poudre brune ; 1 gramme de cet acide est dissous dans l'eau distillée, avec l'ajout

de 62.5 ml de NaOH (2N), dans une fiole de 1000 ml laissée sous agitation pendant 48 heures à l'obscurité [15].

Les solutions d'acide humique utilisées pour les essais de jar test sont préparées à partir de dilution de la solution à 1 g/l dans de l'eau du robinet dont la composition est consignée au Tableau V.2.

pH	7.5	
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	992	
Turbidité (NTU)	0.45	
	mg/l	méq./l
Ca^{2+}	85.6	4.28
Mg^{2+}	36.4	3.03
Na^+	79.8	3.46
K^+	1.5	0.03
£ cations		10.8
Cl^-	127.3	3.59
SO_4^{2-}	100	2.08
HCO_3^-	341.6	5.60
NO_3^-	6.3	0.10
£ anions		11.37

Tableau V.2 - Composition de l'eau de robinet.

V.5 PREPARATION DU COAGULANT

Le coagulant utilisé, pour les essais du jar test, est le sulfate d'aluminium (alun) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, fourni par Fluka Chemika (Suisse); à cet effet, une solution de 1 g/l est préparée quotidiennement.

V.6 PREPARATION DES ELECTRODES

Avant tout essai, les électrodes sont préparées, afin d'éviter toute interférence, comme suit :

1- dégraissage à l'aide d'une solution composée de :

Na OH ----- 25 g

Na₂ CO₃ ----- 25 g

K₂ CO₃ ----- 25 g

eau du robinet ----- q.s.p. 1000 ml,

2- rinçage à l'eau du robinet et polissage à l'aide du papier abrasif,

3- décapage dans une solution d'acide sulfurique (H₂ SO₄ à 20%) à 40°C pendant 5 minutes,

4- rinçage à l'eau du robinet.

VI.1 INTRODUCTION

Se rapprocher des conditions naturelles, en travaillant sur une suspension de bentonite (10 NTU ou 20 mg/l), une solution d'acide humique (15 mg/l), et une suspension mélange (bentonite à 10 NTU et acide humique à 15 mg/l), au jar test, tout en déterminant les paramètres optimaux (pH, dose d'alun) et en tirant les conclusions telle est la première tranche de ce travail ; la seconde, la mise en évidence de ces conditions, sur l'électrocoagulation, en examinant des solutions et suspension eau de la solution d'acide humique, et suspension et 15 mg/l pour l'acide humique), tout en suivant, pour chacune d'elles, la concentration, le pH, la conductivité ou l'intensité (mA) du courant, et la variation de l'intensité en fonction de la tension.

La réduction de la bentonite et celle de l'acide humique seront exprimées comme suit :

$$R_{\text{Red}} = \frac{(Turb)_i - (Turb)_f}{(Turb)_i} \quad \text{et} \quad R_{\text{Abs}} = \frac{(Abs)_i - (Abs)_f}{(Abs)_i}$$

où :

$(Turb)_i$ et $(Turb)_f$ représentent la turbidité initiale (avant traitement) et la

RESULTATS & INTERPRETATIONS

et l'absorbance finale (après traitement) respectivement.

VI.2 COAG SUR JAR TEST

VI.2.1 Suspension synthétique de bentonite à 10 NTU.

L'étude de la dose optimale en coagulant, à différents pH, a montré les résultats suivants :

VI.1 INTRODUCTION

Se rapprocher des conditions naturelles, en travaillant sur une suspension de bentonite (10 NTU ou 20 mg/l), une solution d'acide humique (15 mg/l), et une suspension mélange (bentonite à 10 NTU et acide humique à 15 mg/l), au jar test, tout en déterminant les paramètres optimaux (pH, dose d'alun) et en tirant les conclusions telle est la première tranche de ce travail : la seconde, la mise en évidence de ces conclusions, sur l'électrolyseur, en examinant différentes solutions et suspensions : eau du robinet, suspension de bentonite, solution d'acide humique, et suspension mélange (bentonite + acide humique : 15 mg/l pour la bentonite et 15 mg/l pour l'acide humique), tout en suivant, pour chacune d'elles, la concentration, le pH, la conductivité ou l'intensité I(mA) du courant, et la variation de l'intensité en fonction de la tension E(V).

La réduction de la bentonite et celle de l'acide humique seront exprimées comme suit :

$$R_n = \frac{(\text{Turb})_i - (\text{Turb})_f}{(\text{Turb})_i} \quad \text{et} \quad R_\lambda = \frac{(\text{Abs})_i - (\text{Abs})_f}{(\text{Abs})_i}$$

où :

$(\text{Turb})_i$ et $(\text{Turb})_f$ représentent la turbidité initiale (avant traitement) et la turbidité finale (après traitement) respectivement,

$(\text{Abs})_i$ et $(\text{Abs})_f$ représentent l'absorbance à 254 nm initiale (avant traitement) et l'absorbance finale (après traitement) respectivement.

VI.2 COAF SUR JAR TEST

VI.2.1 Suspension synthétique de bentonite à 10 NTU.

L'étude de la dose optimale en coagulant, à différents pH, a montré les résultats suivants :

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	8	10	<u>16</u>	18	24	26
R_B (%)	42.1	60	63.2	<u>72.6</u>	68.4	54.4	50.2
pH final	4.2	3.62	3.5	<u>3.34</u>	3.18	2.78	2.65

Tableau VI.1 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 4.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	4	6	<u>8</u>	10	16	18
R_B (%)	10.5	46.8	57	<u>63.1</u>	57.9	37.3	32.3
pH final	5.11	4.8	4.76	<u>4.7</u>	4.66	4.30	4.23

Tableau VI.2 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 5.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	2	12	<u>14</u>	16	22	26
R_B (%)	55.6	64.2	83.6	<u>85.2</u>	82.8	73.4	65.4
pH final	6.2	5.82	4.52	<u>4.3</u>	4.17	3.81	3.66

Tableau VI.3 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 6.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	8	14	<u>18</u>	22	26	34
R_B (%)	31.6	83.8	92.6	<u>94.7</u>	87.6	81.2	60.9
pH final	6.97	6.18	5.46	<u>5.31</u>	5.10	5.07	4.67

Tableau VI.4 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 7.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	4	8	<u>14</u>	20	24	26
R_B (%)	52.6	89.5	92.6	<u>94.2</u>	87.8	81	77.6
pH final	8.2	7.86	7.40	<u>6.74</u>	6.15	5.6	5.45

Tableau VI.5 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 8.

Figure VI.1 - Réduction de la bentonite en fonction du pH

$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	0	2	6	<u>10</u>	12	14	18
R_B (%)	80	90	91.6	<u>93.1</u>	91.6	90.6	87.8
pH final	9.88	9.71	9.55	<u>9.39</u>	9.2	8.93	8.50

Tableau VI.6 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 10.

Les réductions optimales de la bentonite pour différentes valeurs du pH sont regroupées dans le Tableau ci-dessous :

pH initial	4	5	6	<u>7</u>	8	10
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	16	8	14	<u>18</u>	14	10
R_B (%)	72.6	63.1	85.2	<u>94.7</u>	94.2	93.1

Tableau VI.7 - Réductions optimales de la bentonite en fonction de la dose en alun pour différents pH.

La Figure VI.1 représente la réduction de la bentonite en fonction du pH.

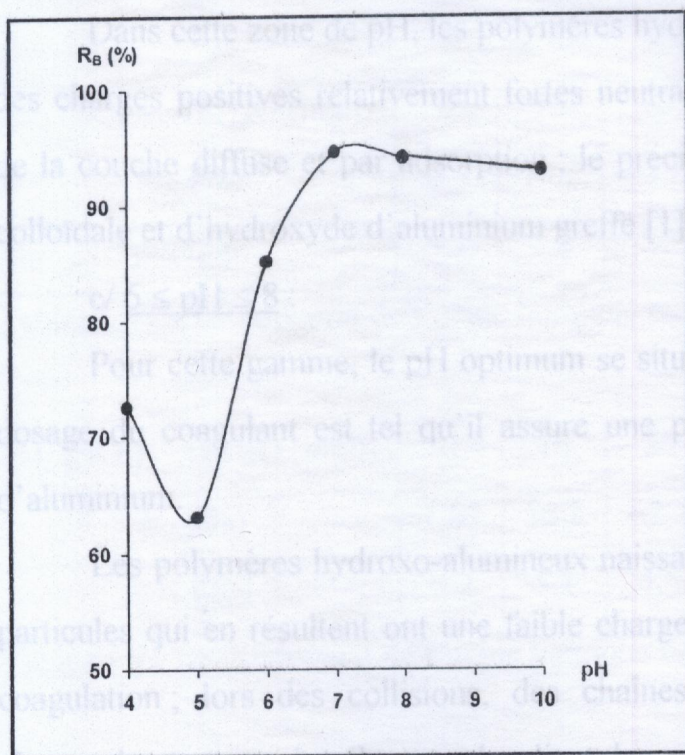


Figure VI.1 - Réduction de la bentonite en fonction du pH.

On constate que la meilleure réduction de la bentonite (94.7 %) est obtenue à $\text{pH} = 7$, pour une dose en alun de 18 mg/l ; cependant, pour un pH allant de 7 à 10, la réduction semble quasi-constante alors que la dose en alun diminue.

D'après ces résultats expérimentaux, la réduction de la bentonite est fortement influencée par le pH du milieu.

a/ $\text{pH} \leq 4$:

A ce pH , l'aluminium n'est présent que sous forme de l'ion Al^{3+} , l'action de cet ion sur le colloïde négatif est alors de le déstabiliser en neutralisant sa charge. Il faut signaler aussi qu'à de tels pH , les protons participent à la déstabilisation du colloïde ; en effet, sous la seule influence du pH (sans ajout de coagulant), la réduction de la turbidité avoisine les 42% (Tableau VI.1). Le précipité obtenu n'est essentiellement constitué que de matière colloïdale initiale [1].

b/ $4 < \text{pH} < 6$:

Dans cette zone de pH , les polymères hydroxo-alumineux $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{++}$ ayant des charges positives relativement fortes neutralisent les colloïdes par compression de la couche diffuse et par adsorption ; le précipité obtenu est constitué de matière colloïdale et d'hydroxyde d'aluminium greffé [1].

c/ $6 \leq \text{pH} \leq 8$:

Pour cette gamme, le pH optimum se situe tout près du pH isoélectrique et le dosage du coagulant est tel qu'il assure une précipitation abondante d'hydroxyde d'aluminium.

Les polymères hydroxo-alumineux naissants s'adsorbent sur les colloïdes, les particules qui en résultent ont une faible charge et sont instables : il y a amorce de coagulation ; lors des collisions, des chaînes polymériques d'alumine hydratée s'accrochent aux microflocs, les liant les uns aux autres, entraînant ainsi une floculation [1].

d/ $\text{pH} > 8$:

Dans cette zone, l'espèce prédominante est le monomère $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui s'adsorbe sur les colloïdes, les forces d'adsorption l'emportent sur les forces électrostatiques ; d'autre part, la réduction obtenue (80%) à $\text{pH} = 10$ sans ajout de coagulant (Tableau VI.6) est attribuée à la formation d'un précipité d'hydroxyde de calcium et de magnésium (dureté de l'eau).

Les réductions optimales d'acide humique, pour différents pH, sont portées

VI.2.2 Solution synthétique d'acide humique à 15 mg/l

L'étude de la dose optimale en coagulant, à différents pH, a donné les résultats suivants :

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	16	20	<u>22</u>	26	32	36
R_A (%)	1.8	39.7	54.4	<u>72.7</u>	52.1	39.7	32.4
pH final	4.1	3.7	3	<u>2.8</u>	2.4	2	1.8

Tableau VI.8 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à $\text{pH}=4$.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	15	20	26	<u>30</u>	32	34
R_A (%)	0.5	10.3	23.2	37.8	<u>70.5</u>	64.6	60.5
pH final	5.2	4.7	4.2	3.7	<u>3.2</u>	3	2.78

Tableau VI.9 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à $\text{pH}=5$.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	16	24	<u>30</u>	32	34	36
R_A (%)	1.87	36.3	62.2	<u>64</u>	55.7	49.8	43.9
pH final	6.2	5.1	4.5	<u>3.8</u>	3.5	3.01	2.89

Tableau VI.10 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à $\text{pH}=6$.

Figure VI.2 - Réduction de l'acide humique en fonction du pH.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	12	20	<u>24</u>	28	30	35
R_A (%)	1.8	43.4	54.2	<u>56.3</u>	51.0	48.0	41.8
pH final	7.25	6.8	5.9	<u>5.3</u>	5.1	4.8	4.3

Tableau VI.11 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun

à pH=7.

Les réductions optimales d'acide humique, pour différents pH, sont portées dans le Tableau VI.12.

pH final	<u>4</u>	5	6	7
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	<u>22</u>	30	30	24
R_A (%)	<u>72.7</u>	70.5	64	56.3

Tableau VI.12 - Réductions optimales de l'acide humique en fonction de la dose en alun pour différents pH.

La Figure VI.2 représente la réduction de l'acide humique en fonction du pH.

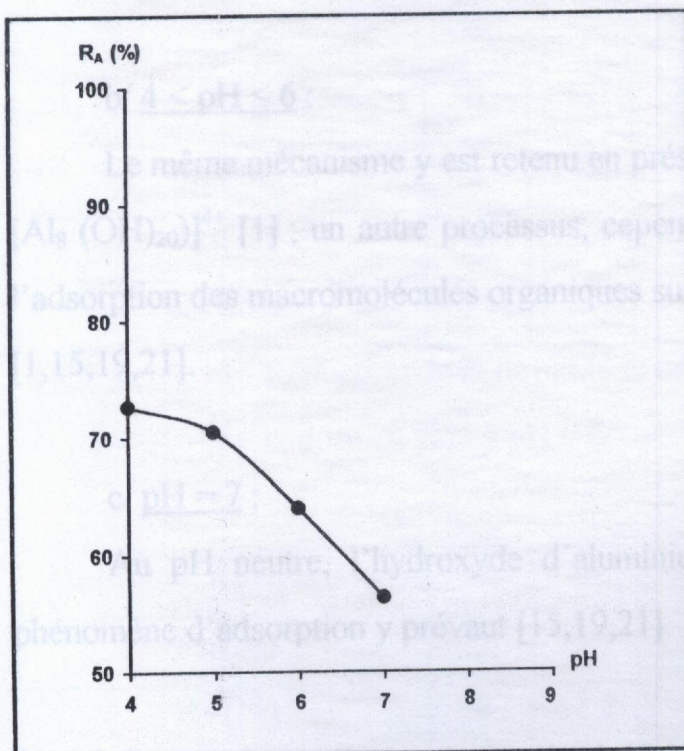


Figure VI.2 - Réduction de l'acide humique en fonction du pH.

On remarque que la meilleure réduction de l'acide humique (72.7 %) est obtenue à pH acide (pH = 4) pour une dose en alun de 22 mg/l ; d'autre part, une augmentation du pH engendre une baisse de réduction de l'acide humique et une sensible élévation de la dose en alun.

La réduction de l'acide humique est généralement dictée par le pH du milieu comme l'affiche ces résultats.

a/ pH = 4 :

Pour ce pH correspondant à l'optimum de la réduction de l'acide humique (72.7 %), l'espèce prépondérante, étant Al^{3+} , favorise le mécanisme de déstabilisation par neutralisation de charge ; cette étape est marquée par la formation de complexes humiques-métalliques, ces complexes Al-humates réagissent avec Al^{3+} , encore ce cation trivalent, pour donner lieu à une phase solide décantable (flocs) [15,19,21].

b/ $4 < pH \leq 6$:

Le même mécanisme y est retenu en présence d'une espèce cationique de type $[Al_8(OH)_{20}]^{4+}$ [1] ; un autre processus, cependant, est envisageable mettant en jeu l'adsorption des macromolécules organiques sur les polymères minéraux ainsi formés [1,15,19,21].

c/ pH = 7 :

Au pH neutre, l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ (s) est majoritaire, le phénomène d'adsorption y prévaut [15,19,21].

VI.2.3 Suspension mélange (bentonite à 10 NTU et acide humique à 15 mg/l)

Le suivi de la dose optimale en coagulant, à différents pH, a abouti aux résultats qui suivent :

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	10	20	24	<u>25</u>	28	30
R_B (%)	0	29.8	57.2	77.2	<u>84.5</u>	68.1	51.1
R_A (%)	0	11	46.9	62.4	<u>64.1</u>	32.0	18.2
pH final	4.2	3.5	2.11	1.9	<u>1.88</u>	1.45	1.3

Tableau VI.13 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 4.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	12	16	20	24	<u>26</u>	28
R_B (%)	0	20.4	44.9	57.1	81.2	<u>95.5</u>	61.2
R_A (%)	0	11.1	19.3	38.5	63.0	<u>77.8</u>	53.3
pH final	5.2	4.1	3.66	3.11	2.8	<u>2.5</u>	2.01

Tableau VI.14 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 5.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	14	20	24	<u>26</u>	28	30
R_B (%)	0	74.4	79.8	87.3	<u>93.6</u>	81.9	76.1
R_A (%)	0	51.1	73.0	80.3	<u>82.5</u>	65.7	41.6
pH final	6.1	4.7	3.41	3.05	<u>2.6</u>	2.45	2.3

Tableau VI.15 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 6.

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	0	14	<u>18</u>	20	24	26	28
R_B (%)	0	71.7	<u>80.9</u>	77.2	66.3	64.8	60.6
R_A (%)	0	61.2	<u>73</u>	68.5	61.2	58.4	42.1
pH final	6.97	6.3	<u>5.8</u>	5.5	5.01	4.86	4.52

Tableau VI.16 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 7.

Les réductions optimales de bentonite et d'acide humique pour différents pH sont portés dans le Tableau VI.17.

pH	4	5	6	7
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	25	<u>26</u>	<u>26</u>	18
R_B (%)	84.5	<u>95.5</u>	<u>93.6</u>	80.9
R_A (%)	64.1	<u>77.8</u>	<u>82.5</u>	73

Tableau VI.17 - Réductions optimales de la turbidité et de l'acide humique

en fonction de la dose en alun pour différents pH.

La Figure VI.3 représente la réduction de la bentonite et de l'acide humique en fonction du pH.

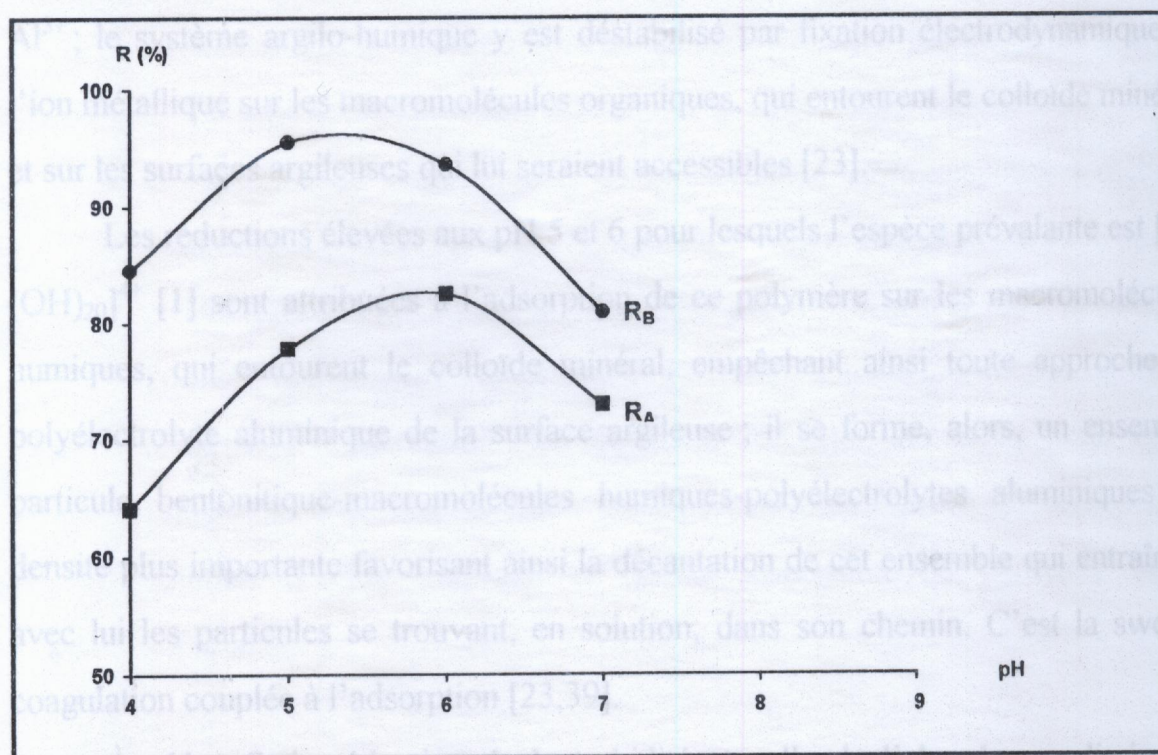


Figure VI.3 - Réduction de la turbidité et de l'adsorbance en fonction du pH.

On remarque que :

- la réduction de la turbidité et celle de l'absorbance suivent le même parcours en fonction de l'accroissement de la dose en alun (Tableaux VI.13-16) et du pH,

- la réduction en matière de turbidité est, partout, plus élevée que la réduction en matière d'absorbance,
- les meilleures réductions de turbidité et d'absorbance sont obtenues aux pH 5 et 6 ; en outre, elles restent aussi importantes aux pH 4 et 7.

La non-réduction de la turbidité et de l'absorbance aux différents pH, survenant pour les essais sans ajout de coagulant, est imputée au fait qu'il y a adsorption des macromolécules organiques sur les particules colloïdales minérales formant ainsi un système argilo-humique de forte stabilité [39].

À pH = 4, le mécanisme mis en jeu est la neutralisation de charge par le cation Al^{3+} ; le système argilo-humique y est déstabilisé par fixation électrodynamique de l'ion métallique sur les macromolécules organiques, qui entourent le colloïde minéral, et sur les surfaces argileuses qui lui seraient accessibles [23].

Les réductions élevées aux pH 5 et 6 pour lesquels l'espèce prévalante est $[Al_8(OH)_{20}]^{4+}$ [1] sont attribuées à l'adsorption de ce polymère sur les macromolécules humiques, qui entourent le colloïde minéral, empêchant ainsi toute approche du polyélectrolyte aluminique de la surface argileuse ; il se forme, alors, un ensemble particule bentonitique-macromolécules humiques-polyélectrolytes aluminiques de densité plus importante favorisant ainsi la décantation de cet ensemble qui entraînera avec lui les particules se trouvant, en solution, dans son chemin. C'est la sweep-coagulation couplée à l'adsorption [23,39].

À pH = 7, la réduction de la turbidité et celle de l'absorbance diminuent légèrement ; les hydroxydes d'aluminium $Al(OH)_3(s)$ peuvent entraîner les particules argilo-humiques, lors de leur sédimentation, ce qui semble favoriser la sweep-coagulation [57].

Pour chaque pH, l'évolution de l'intensité en fonction de la tension a été relevée (Figure VI.4). Les caractéristiques initiales et finales des solutions « électrocoagulées » sont portées dans le Tableau VI.18.

VI.2.4 Conclusion

La coaf sur jar test de la bentonite et de l'acide humique a permis de mettre en évidence ce qui suit :

- la meilleure réduction (72.7 %) de l'acide humique d'une solution synthétique, à 15 mg/l, préparée à partir de l'eau de robinet, est obtenue au pH = 4 à une dose en alun de 22 mg/l ; le mécanisme y prépondérant est celui de déstabilisation par neutralisation de charge,
- la réduction de la bentonite de la suspension synthétique, à 10 NTU, nécessite des doses en alun beaucoup plus moindres que celles pour la réduction de l'acide humique ; réellement, la réduction la plus élevée est atteinte au pH = 7, à une dose en alun de 18 mg/l, indiquant ainsi que le mécanisme le plus probable est celui de la sweep-coagulation,
- la réduction de la turbidité et de l'absorbance de la suspension mélange (bentonite à 10 NTU et acide humique à 15 mg/l) avoisinait les 94% pour la première et les 83% pour la seconde à pH = 5 et à une dose en alun de 26 mg/l, le mécanisme favorisant cette élimination est la sweep-coagulation associée à l'adsorption ; en outre, la réduction de la turbidité et de l'absorbance de la suspension mélange sont plus élevées que celles de la solution d'acide humique et de la suspension de bentonite prises séparément.

VI.3 COAF SUR ELECTROLYSEUR

VI.3.1 Essai témoin sur une eau du robinet

De l'eau du robinet acidulée, basifiée, et « neutralisée » a été utilisée, en premier lieu, comme solution témoin. Pour chaque pH, l'évolution de l'intensité en fonction de la tension a été relevée (Figure VI.4). Les caractéristiques initiales et finales des solutions « électrocoagulées » sont portées dans le Tableau VI.18.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.81
	Turbidité (NTU)	0.7	0.3
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1670	507
	Absorbance	0.0233	0.0202
neutre	pH	7	9.97
	Turbidité (NTU)	1.4	1
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1070	735
	Absorbance	0.0233	0.0221
basique	pH	12	12
	Turbidité (NTU)	1.65	3.5
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1190	811
	Absorbance	0.0233	0.0758

Tableau VI.18 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour l'eau du robinet.

On a constaté que :

- pour le pH acide, la couleur de la solution est devenue jaune,
- pour le pH neutre, un nuage noir apparaît au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, des nuages marrons sont formés et un précipité noir apparaît au fond du récipient.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

on est en présence de formation d'hydroxydes métalliques, pour lesquels le fer est de valence proche de 3 sinon égale à 3 $[\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})]$, puisque la couleur rousse, à la limite rouge - marron, est le plus souvent observée [9,70,71] ; cette formation est accentuée au fur et à mesure que le pH augmente :

- pour le pH acide, l'ion libéré par l'anode, se trouvant célibataire, se manifeste en une couleur jaune - rousse,
- pour le pH basique, l'ion libéré, par l'anode, n'est plus célibataire ; en présence intense d'hydroxydes, le fer trivalent sera entouré par ces derniers pour donner lieu à des hydroxydes métalliques apparaissant en tant que floes (turbidité et absorbance finale élevées),

Figure VI.4 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour l'eau du robinet.

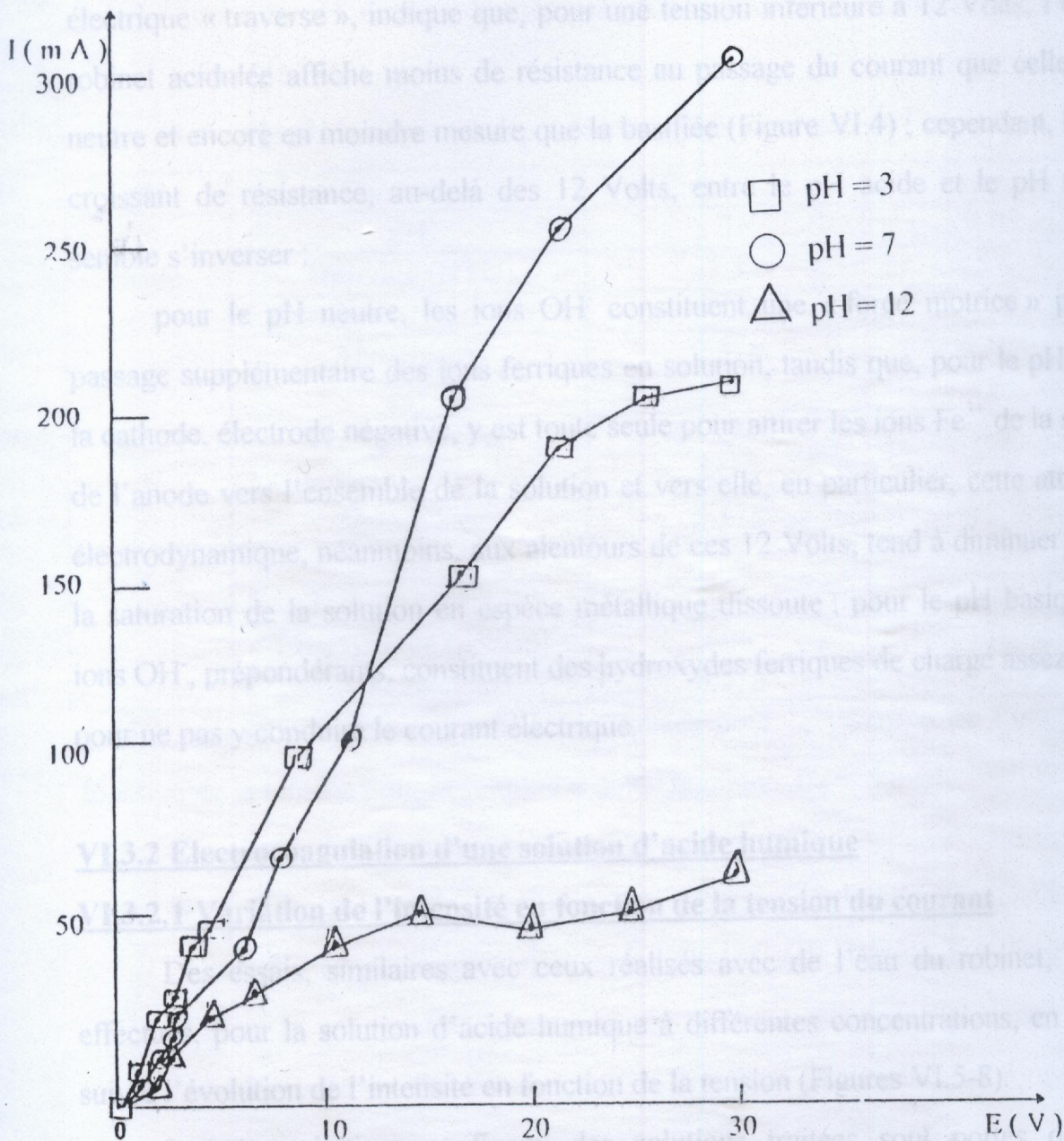


Figure VI.4 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour l'eau du robinet.

- pour le pH neutre, la formation de colloïdes (trouble) semble être inhibée par la présence d'une quantité non-suffisante d'ions OH^- .

D'autre part, la pente moyenne de la courbe, exprimant l'intensité en fonction de la tension, étant proportionnelle à la conductivité de la solution que le courant électrique « traverse », indique que, pour une tension inférieure à 12 Volts, l'eau du robinet acidulée affiche moins de résistance au passage du courant que celle à pH neutre et encore en moindre mesure que la basifiée (Figure VI.4) : cependant, l'ordre croissant de résistance, au-delà des 12 Volts, entre le pH acide et le pH neutre, semble s'inverser :

pour le pH neutre, les ions OH^- constituent une « force motrice » pour le passage supplémentaire des ions ferriques en solution, tandis que, pour le pH acide, la cathode, électrode négative, y est toute seule pour attirer les ions Fe^{3+} de la surface de l'anode vers l'ensemble de la solution et vers elle, en particulier, cette attraction électrodynamique, néanmoins, aux alentours de ces 12 Volts, tend à diminuer suite à la saturation de la solution en espèce métallique dissoute ; pour le pH basique, les ions OH^- , prépondérants, constituent des hydroxydes ferriques de charge assez neutre pour ne pas y conduire le courant électrique.

VI.3.2 Electrocoagulation d'une solution d'acide humique

VI.3.2.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant

Des essais, similaires avec ceux réalisés avec de l'eau du robinet, ont été effectués, pour la solution d'acide humique à différentes concentrations, en vue de suivre l'évolution de l'intensité en fonction de la tension (Figures VI.5-8).

Les états initiaux et finaux des solutions traitées sont portés dans les Tableaux VI.19-22.

- La concentration $C_A = 5 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour le pH acide, il n'y a ni changement de couleur, ni dépôt au niveau de l'anode, ni précipité au fond du récipient,
- pour le pH neutre, des nuages jaunes - verts se forment au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, un dépôt noir apparaît au niveau de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	4.05
	Turbidité (NTU)	2.3	5.4
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	3650	543
	Absorbance	0.378	0.198
neutre	pH	7	8.66
	Turbidité (NTU)	3.6	2.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	1530	868
	Absorbance	0.378	0.208
basique	pH	12	12.11
	Turbidité (NTU)	2.5	2.09
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	606	1060
	Absorbance	0.378	0.372

Tableau VI.19 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 5 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

- pour le pH acide, formation de complexes humiques-métalliques se manifestant par augmentation de la turbidité et diminution de l'absorbance,
- pour le pH neutre, adsorption des macromolécules organiques sur les hydroxydes de fer donnant lieu à des floccs décantables et formation de complexes humiques-métalliques,
- pour le pH basique, adsorption des macromolécules organiques sur les hydroxydes de fer.

D'autre part, l'ordre décroissant de conductivité, allant du pH acide vers le pH basique, est encore respecté (Figure VI.5), cette fois-ci pour toute la gamme de tension, avec une bonne distinction entre les trois courbes.

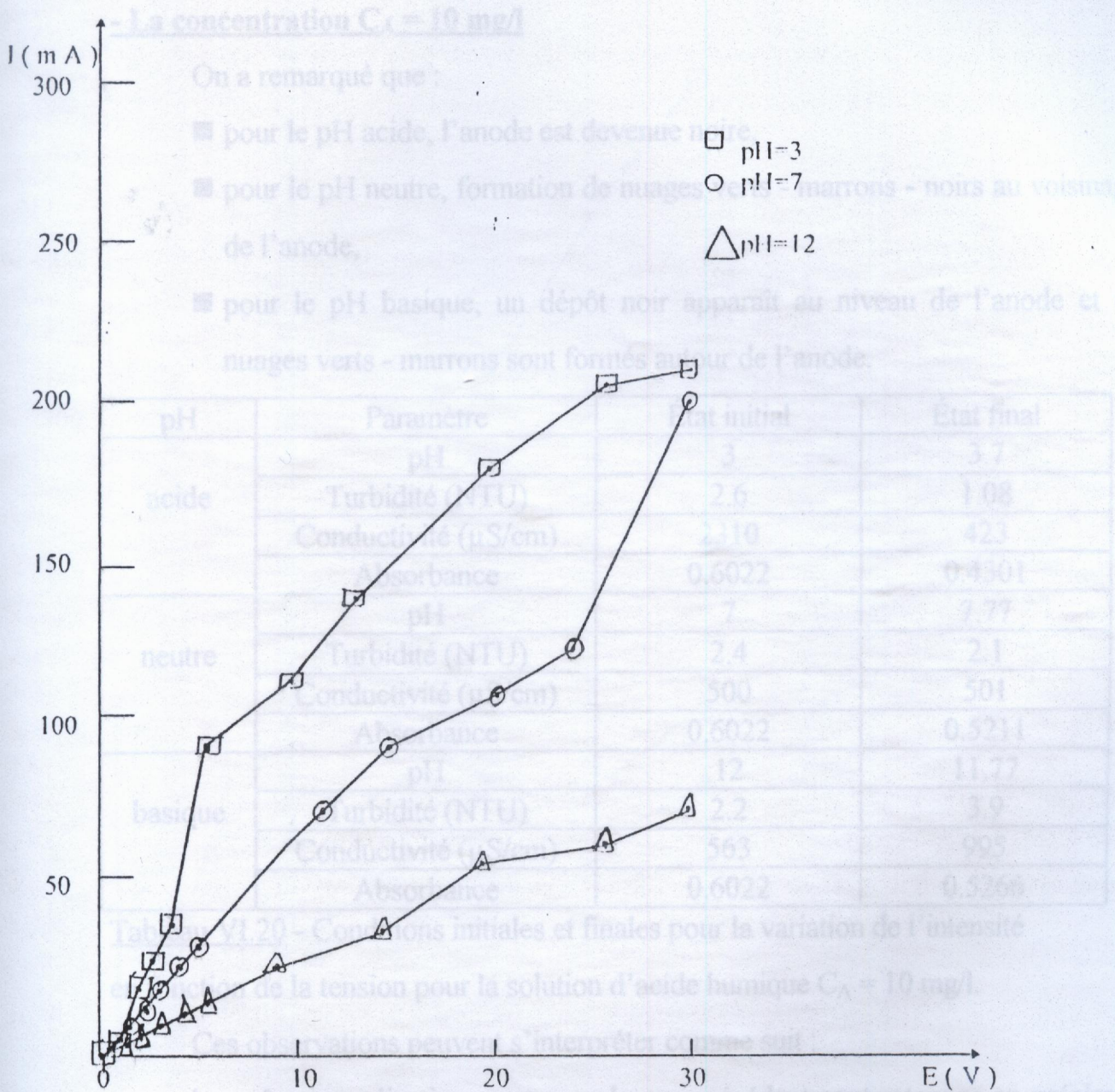


Figure VI.5 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_A = 5 \text{ mg/l}$.

D'autre part, l'ordre décroissant de conductivité, allant du pH acide vers le pH basique, est encore respecté (Figure VI.5), cette fois-ci pour toute la gamme de tension, avec une bonne distinction entre les trois courbes.

- La concentration $C_A = 10 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire,
- pour le pH neutre, formation de nuages verts - marrons - noirs au voisinage de l'anode,
- pour le pH basique, un dépôt noir apparaît au niveau de l'anode et de nuages verts - marrons sont formés autour de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.7
	Turbidité (NTU)	2.6	1.08
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2310	423
	Absorbance	0.6022	0.4301
neutre	pH	7	7.77
	Turbidité (NTU)	2.4	2.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	500	501
	Absorbance	0.6022	0.5211
basique	pH	12	11.77
	Turbidité (NTU)	2.2	3.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	563	995
	Absorbance	0.6022	0.5266

Tableau VI.20 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 10 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

les mêmes explications que pour le cas précédent sont retenues en précisant que la coloration verdâtre des nuages, observée aux pH 7 et 12, peut s'attribuer aux ions ferreux qui sont de moins en moins oxydés par l'oxygène dissous dont la réaction de génération est inhibée par la quantité de plus en plus croissante de polyélectrolytes anioniques [70,71] ; d'ailleurs, la conductivité ne chute plus, comme

D'autre part, l'ordre décroissant de conductivité, allant du pH acide vers le pH basique, est encore respecté (Figure VI.5), cette fois-ci pour toute la gamme de tension, avec une bonne distinction entre les trois courbes.

- La concentration $C_A = 10 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire,
- pour le pH neutre, formation de nuages verts - marrons - noirs au voisinage de l'anode,
- pour le pH basique, un dépôt noir apparaît au niveau de l'anode et de nuages verts - marrons sont formés autour de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.7
	Turbidité (NTU)	2.6	1.08
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2310	423
	Absorbance	0.6022	0.4301
neutre	pH	7	7.77
	Turbidité (NTU)	2.4	2.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	500	501
	Absorbance	0.6022	0.5211
basique	pH	12	11.77
	Turbidité (NTU)	2.2	3.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	563	995
	Absorbance	0.6022	0.5266

Tableau VI.20 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 10 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

les mêmes explications que pour le cas précédent sont retenues en précisant que la coloration verdâtre des nuages, observée aux pH 7 et 12, peut s'attribuer aux ions ferreux qui sont de moins en moins oxydés par l'oxygène dissous dont la réaction de génération est inhibée par la quantité de plus en plus croissante de polyélectrolytes anioniques [70,71] ; d'ailleurs, la conductivité ne chute plus, comme

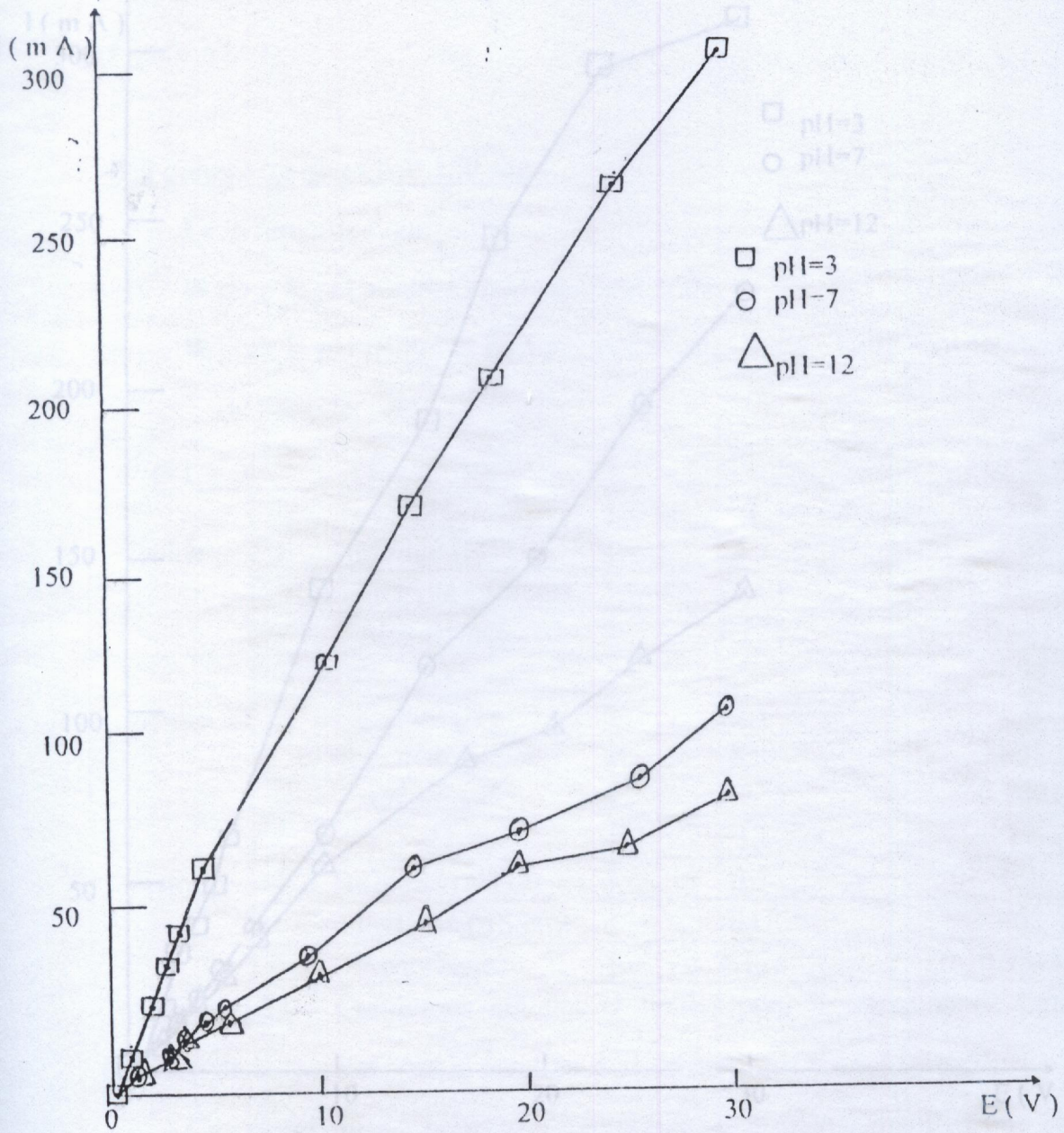


Figure VI.6 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_A = 10$ mg/l.

auparavant, au contraire elle augmente, pour le pH basique, en restant constante pour le pH neutre (Tableau VI.20).

D'autre part, l'ordre décroissant des conductivites est, une fois de plus, mis en évidence avec un grand écart entre, d'un côté, la courbe du pH acide et, de l'autre côté, la courbe du pH neutre et celle du pH basique qui sont, en outre, rapprochées

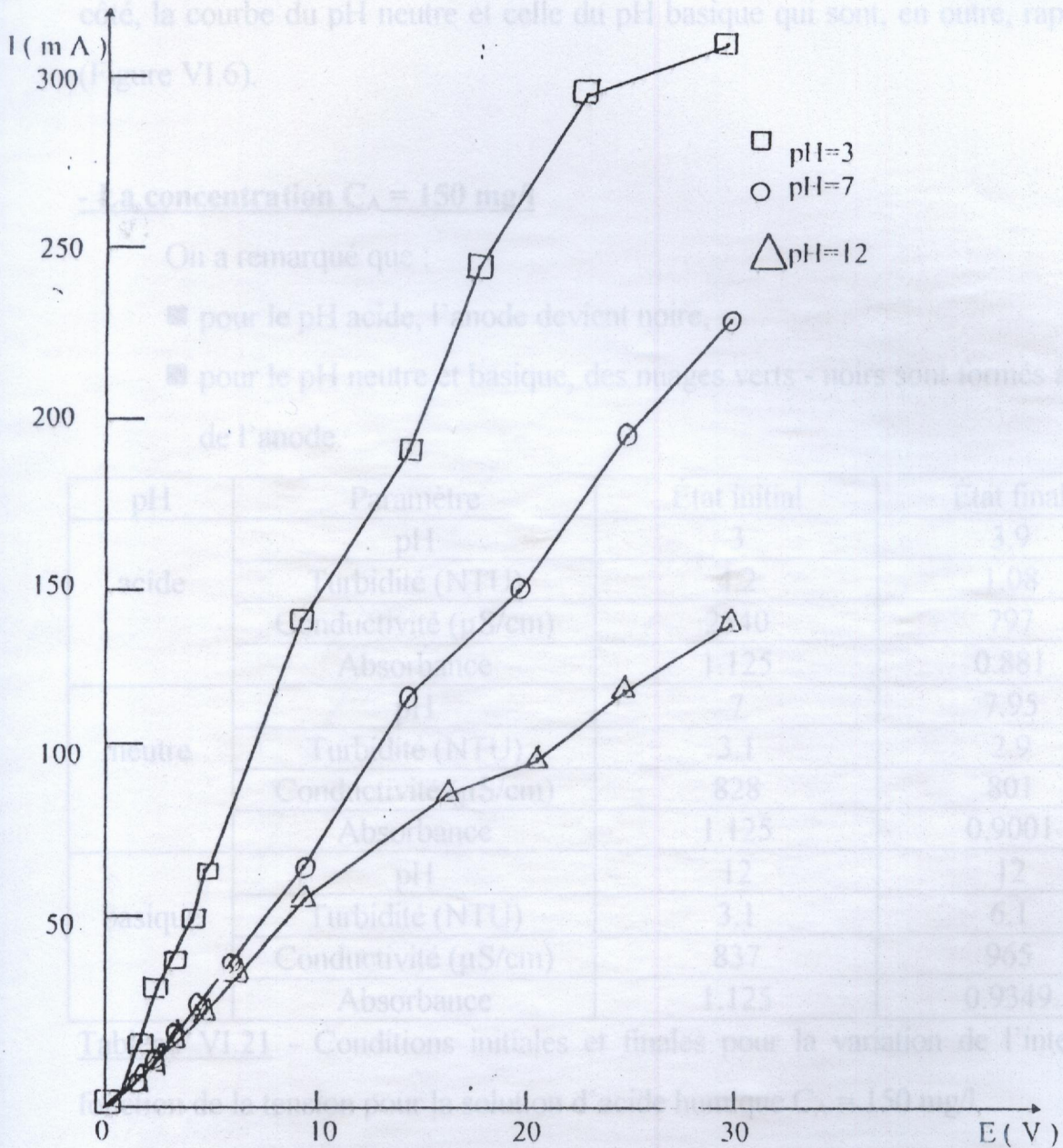


Figure VI.7 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_A = 150$ mg/l.

auparavant, au contraire elle augmente, pour le pH basique, en restant constante pour le pH neutre (Tableau VI.20).

D'autre part, l'ordre décroissant des conductivités est, une fois de plus, mis en évidence avec un grand écart entre, d'un côté, la courbe du pH acide et, de l'autre côté, la courbe du pH neutre et celle du pH basique qui sont, en outre, rapprochées (Figure VI.6).

- La concentration $C_A = 150 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour le pH acide, l'anode devient noire,
- pour le pH neutre et basique, des nuages verts - noirs sont formés au niveau de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.9
	Turbidité (NTU)	4.2	1.08
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2540	797
	Absorbance	1.125	0.881
neutre	pH	7	7.95
	Turbidité (NTU)	3.1	2.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	828	801
	Absorbance	1.125	0.9001
basique	pH	12	12
	Turbidité (NTU)	3.1	6.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	837	965
	Absorbance	1.125	0.9349

Tableau VI.21 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 150 \text{ mg/l}$.

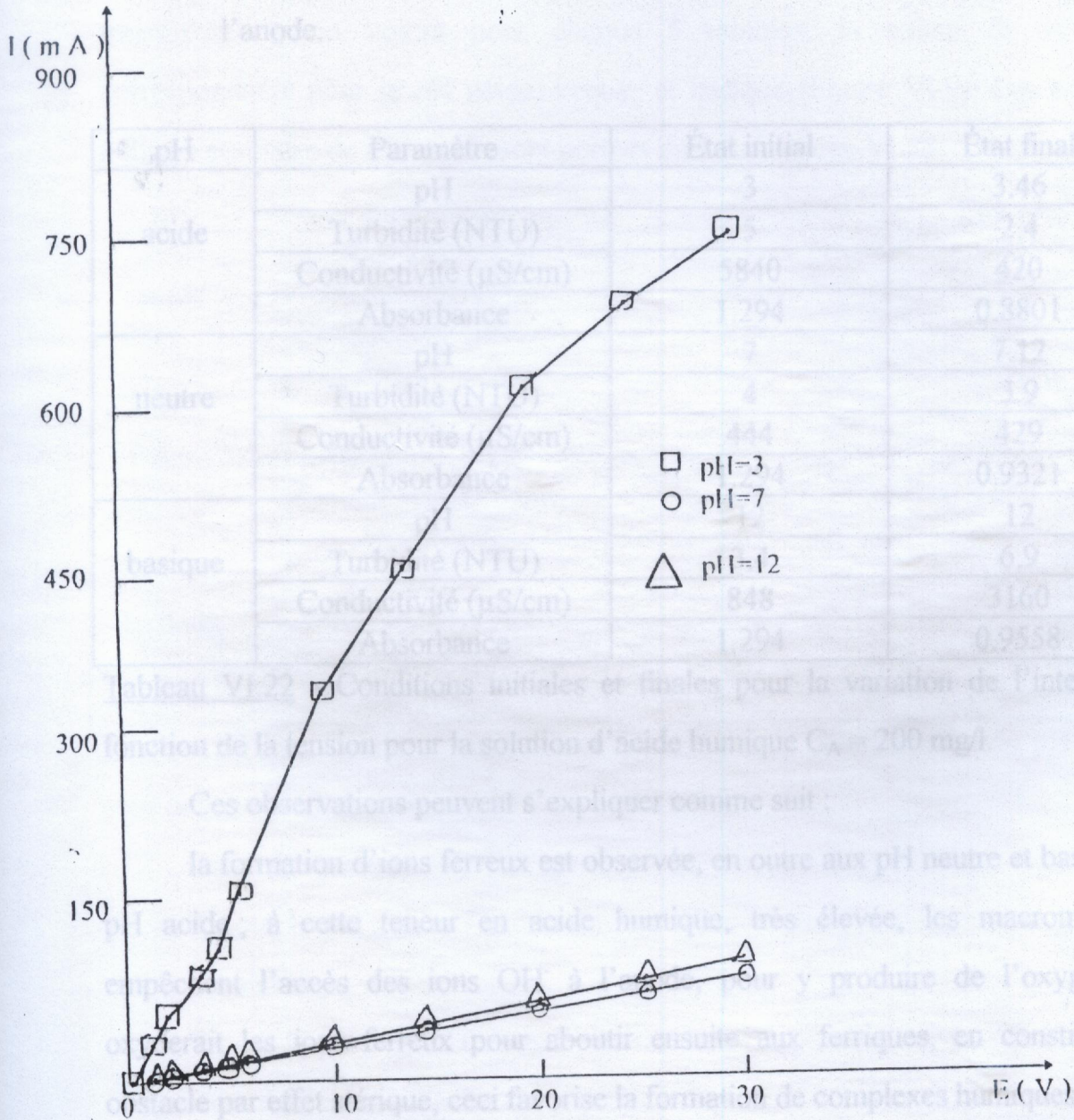
Ces observations peuvent s'interpréter de la même manière que pour le cas précédent en ajoutant que les conductivités sont, cette fois-ci, plus élevées et l'écart entre la courbe du pH acide et les deux autres courbes et la superposition de ces dernières sont encore relevés (Figure VI.7).

Figure VI.8 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_A = 200 \text{ mg/l}$.

- La concentration $C_A = 200 \text{ mg/l}$

On a constaté que :

- pour le pH acide, un nuage jaune - vert apparait au niveau de l'anode,
- pour le pH neutre, un nuage marron - vert apparait au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, des nuages marrons - verts sont formés au voisinage de l'anode.



pH	Paramètre	Etat initial	Etat final
acide	pH	3	3.46
	Turbidité (NTU)	2.4	2.4
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	5840	420
neutre	Absorbance	294	0.3801
	pH	7	7.12
	Turbidité (NTU)	4	3.9
basique	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	444	429
	Absorbance	12	0.9321
	Turbidité (NTU)	12	6.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	848	3160
	Absorbance	1.294	0.9558

Tableau VI.22 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 200 \text{ mg/l}$

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

la formation d'ions ferreux est observée, en outre aux pH neutre et basique, au pH acide, à cette teneur en acide humique, très élevée, les macromolécules empêchent l'accès des ions OH^- à l'électrode pour y produire de l'oxygène qui oxydait les ions ferreux pour aboutir ensuite aux ferriques, en constituant un complexe par effet stérique, ceci favorise la formation de complexes humiques ferreux.

En outre, la courbe relevant la variation de l'intensité en fonction de la tension pour le pH acide (Figure VI.8), semble suivre une loi relativement exponentielle en comparaison avec celles des pH neutre et basique qui sont, cette fois-ci, identiques.

Figure VI.8 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_A = 200 \text{ mg/l}$.

- La concentration $C_A = 200 \text{ mg/l}$

On a constaté que :

- pour le pH acide, un nuage jaune - vert apparaît au niveau de l'anode,
- pour le pH neutre, un nuage marron - vert apparaît au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, des nuages marrons - verts sont formés au voisinage de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.46
	Turbidité (NTU)	5	2.4
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	5840	420
	Absorbance	1.294	0.8801
neutre	pH	7	7.12
	Turbidité (NTU)	4	3.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	444	429
	Absorbance	1.294	0.9321
basique	pH	12	12
	Turbidité (NTU)	3.4	6.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	848	3160
	Absorbance	1.294	0.9558

Tableau VI.22 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la solution d'acide humique $C_A = 200 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

la formation d'ions ferreux est observée, en outre aux pH neutre et basique, au pH acide ; à cette teneur en acide humique, très élevée, les macromolécules empêchent l'accès des ions OH^- à l'anode, pour y produire de l'oxygène qui oxyderait les ions ferreux pour aboutir ensuite aux ferriques, en constituant un obstacle par effet stérique, ceci favorise la formation de complexes humiques-ferreux.

En outre, la courbe relevant la variation de l'intensité en fonction de la tension, pour le pH acide (Figure VI.8), semble suivre une loi relativement exponentielle en comparaison avec celles des pH neutre et basique qui sont, cette fois-ci, identiques.

VI.3.2.2 Détermination du pH optimal

Il s'agit, à présent, de déterminer le pH optimal pour lequel une meilleure réduction d'acide humique, en matière d'absorbance, serait atteinte ; à cet effet, l'intensité du courant est fixée à 70 mA ($i = 0.48 \text{ A/dm}^2$) pour une durée de traitement de 40 minutes et de concentration de 150 mg/l en acide humique (valeur intermédiaire), on notera pour chaque 5 minutes, la valeur de la tension correspondante pour le pH acide, neutre, et basique (Figure VI.9). Les conditions initiales et finales de ces essais sont portées dans le Tableau VI.23.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.46
	Turbidité (NTU)	4.2	1.2
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2540	232
	Absorbance	1.125	0.2036
neutre	pH	7	12.33
	Turbidité (NTU)	3.1	2.8
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	828	639
	Absorbance	1.125	0.5935
basique	pH	12	12.05
	Turbidité (NTU)	3.1	9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	837	749
	Absorbance	1.125	0.9961

Tableau VI.23 - Conditions initiales et finales pour la détermination du pH optimal pour la solution d'acide humique $C_A = 150 \text{ mg/l}$.

On a constaté que :

- pour le pH acide, l'anode devient noire et des floccs apparaissent dans la solution,
- pour le pH neutre, un nuage marron - vert apparaît au niveau de l'anode et, au fond du récipient un précipité s'y dépose,
- pour le pH basique, un dépôt noir - vert apparaît au niveau de l'anode et, des nuages de floccs décantent de la solution vers le fond du récipient.

Figure VI.9 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction du pH pour $i = 70 \text{ mA}$ et $C_A = 150 \text{ mg/l}$.

pH	R_A (%)
3	74
7	47,24
12	11,46

Tableau VI.24 - Réduction de l'absorbance de la solution de l'acide humique à $C_A = 150$ mg/l en fonction du pH.

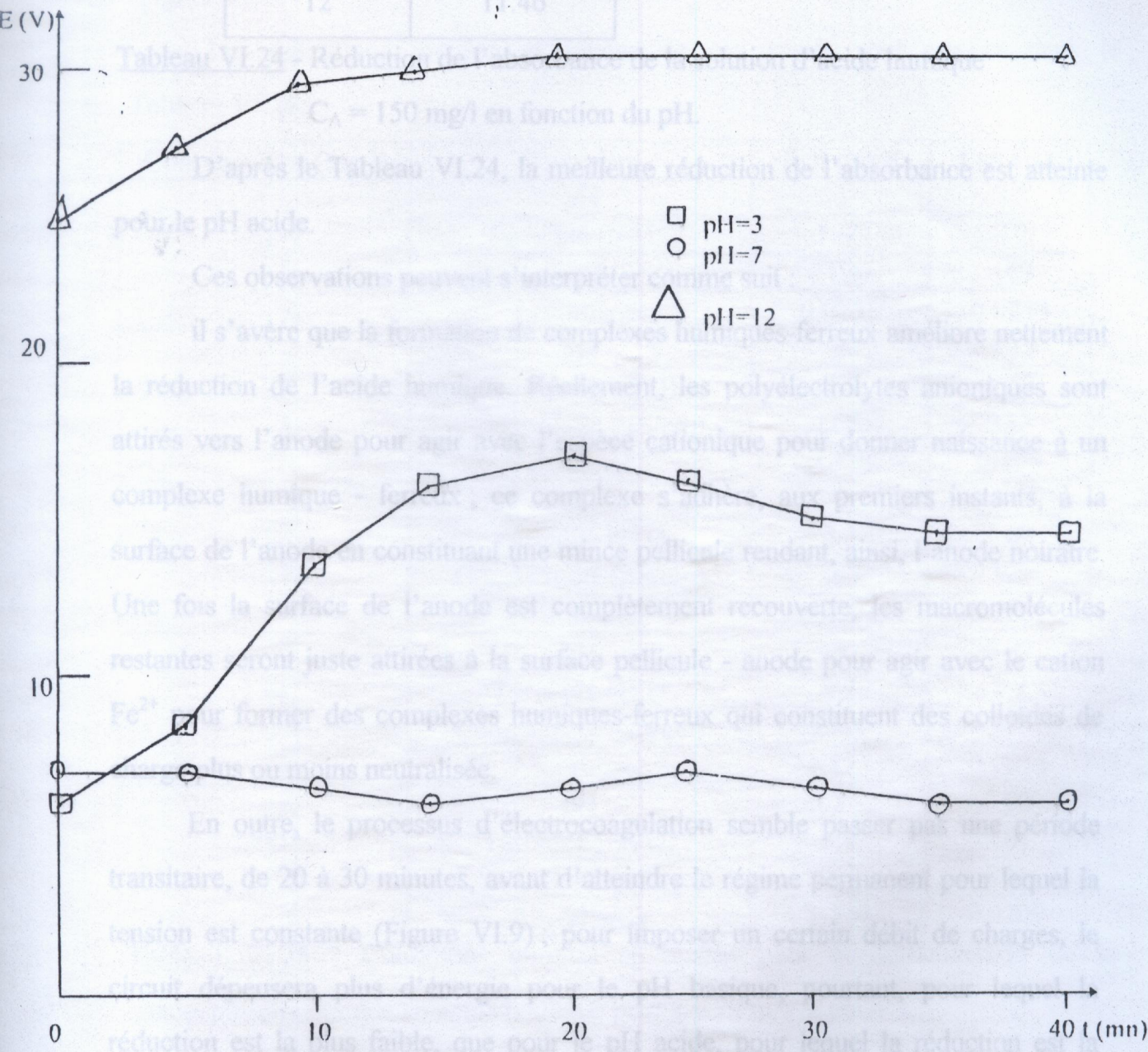
D'après le Tableau VI.24, la meilleure réduction de l'absorbance est atteinte pour le pH acide. Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

il s'avère que la formation de complexes humiques ferreux améliore nettement la réduction de l'acide humique. Effectivement, les polyelectrolytes anioniques sont attirés vers l'anode pour agir avec l'espèce cationique pour donner naissance à un complexe humique - ferreux, ce complexe se situe aux premiers instants à la surface de l'anode en constituant une mince pellicule tendant, ainsi, à être neutre. Une fois la surface de l'anode est complètement recouverte, les macromolécules restantes sont juste attirées à la surface pellicule - anode pour agir avec le cation Fe^{2+} pour former des complexes humiques-ferreux qui constituent des colloïdes de plus ou moins neutralisés.

En outre, le processus d'électrocoagulation semble passer par une période transitaire, de 20 à 30 minutes, avant d'atteindre le régime permanent pour lequel la tension est constante (Figure VI.9) ; pour imposer en certain débit de charges, le circuit électrique des électrodes est alimenté par un générateur à courant continu.

VI.3.2.3 Détermination de la concentration optimale en acide humique

Figure VI.9 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction du pH pour $I = 70$ mA et $C_A = 150$ mg/l.



pH	R_A (%)
3	74
7	47.24
12	11.46

Tableau VI.24 - Réduction de l'absorbance de la solution d'acide humique

$C_A = 150$ mg/l en fonction du pH.

D'après le Tableau VI.24, la meilleure réduction de l'absorbance est atteinte pour le pH acide.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

il s'avère que la formation de complexes humiques-ferreux améliore nettement la réduction de l'acide humique. Réellement, les polyélectrolytes anioniques sont attirés vers l'anode pour agir avec l'espèce cationique pour donner naissance à un complexe humique - ferreux ; ce complexe s'adhère, aux premiers instants, à la surface de l'anode en constituant une mince pellicule rendant, ainsi, l'anode noirâtre. Une fois la surface de l'anode est complètement recouverte, les macromolécules restantes seront juste attirées à la surface pellicule - anode pour agir avec le cation Fe^{2+} pour former des complexes humiques-ferreux qui constituent des colloïdes de charge plus ou moins neutralisée.

En outre, le processus d'électrocoagulation semble passer par une période transitaire, de 20 à 30 minutes, avant d'atteindre le régime permanent pour lequel la tension est constante (Figure VI.9) ; pour imposer un certain débit de charges, le circuit dépensera plus d'énergie pour le pH basique, pourtant, pour lequel la réduction est la plus faible, que pour le pH acide, pour lequel la réduction est la meilleure, et pour le pH neutre caractérisé par une réduction moyenne.

VI.3.2.3 Détermination de la concentration optimale en acide humique

La question, à laquelle on doit répondre, dans ce paragraphe, est pour quelle concentration en acide humique le procédé réagit le mieux ? Pour cela, l'intensité du

courant est fixée à 70 mA ($i = 0.48 \text{ A/dm}^2$) pour une durée de traitement de 40 minutes et un pH (optimal) égal à 3 ; on notera, à 5 minutes d'intervalle, la valeur de la tension correspondante pour les concentrations 0, 5, 10, 150 et 200 mg/l (Figure VI.10).

Les conditions initiales et finales de ces essais sont portées dans le Tableau VI.25.

Concentration (mg/l)	Paramètre	État initial	État final
0	pH	3	3.3
	Turbidité (NTU)	1.65	0.2
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	1190	449
	Absorbance	0.0233	0.0213
5	pH	3	3.12
	Turbidité (NTU)	2.5	1.19
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	606	332
	Absorbance	0.378	0.199
10	pH	3	3.9
	Turbidité NTU	2.2	1.03
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	563	398
	Absorbance	0.6022	0.2005
150	pH	3	6.27
	Turbidité NTU	4.2	1.2
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	2540	232
	Absorbance	1.125	0.2936
200	pH	3	3.03
	Turbidité (NTU)	3.4	2.01
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	848	394
	Absorbance	1.294	0.0209

Tableau VI.25 - Conditions initiales et finales pour la détermination de la concentration optimale en acide humique pour $I = 70 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

On a constaté que :

- pour l'eau du robinet acidulée, l'anode devient noire et, des nuages de colloïdes de coloration noirâtre - verdâtre apparaissent dans la solution,
- pour la solution de concentration 5 mg/l, le même phénomène se manifeste,

Figure VI.10 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction de la concentration en acide humique pour $I = 70 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

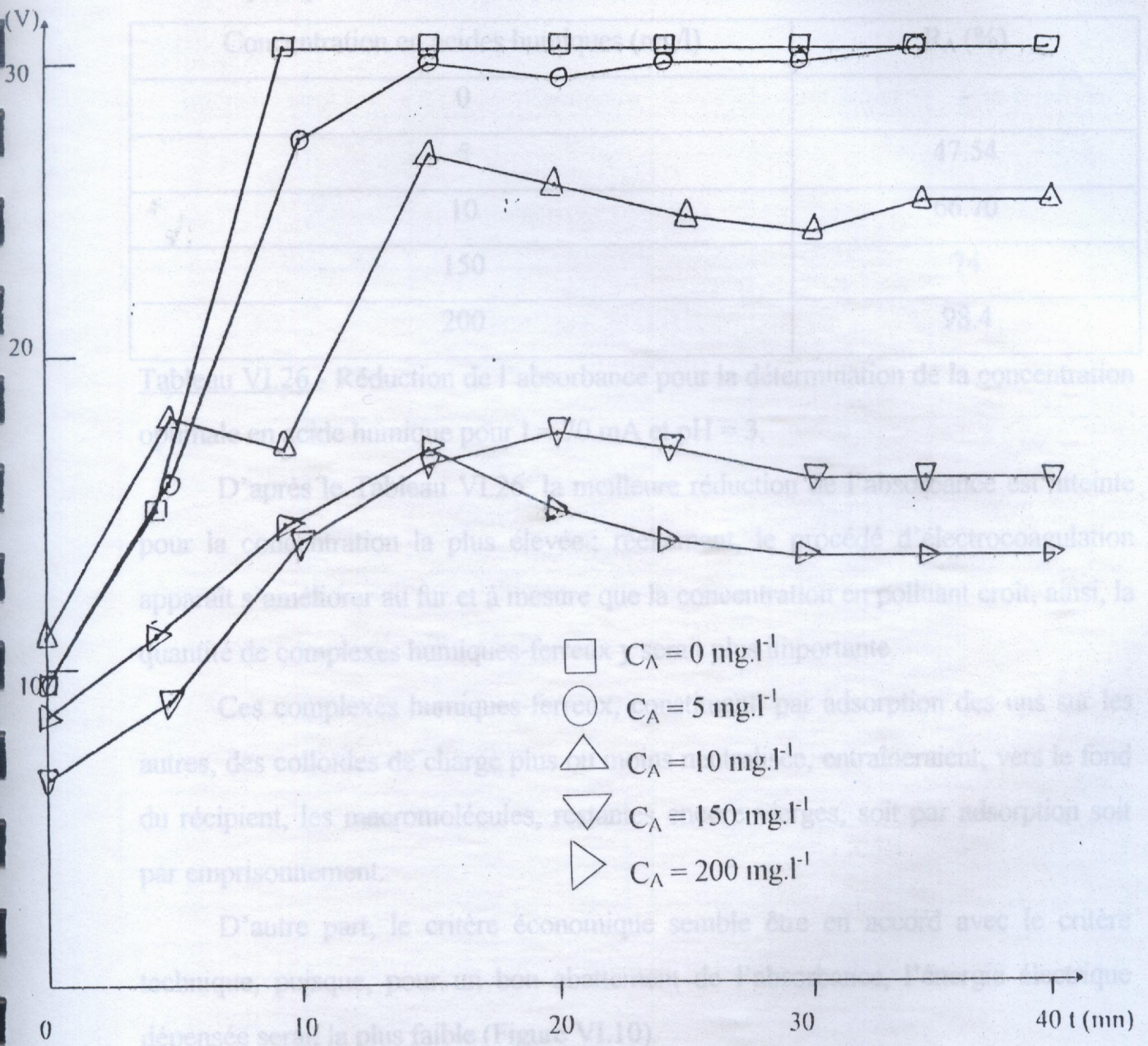


Figure VI.10 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction de la concentration en acide humique pour I = 70 mA et pH = 3.

- pour les concentrations 10 et 150 mg/l, une pellicule noire apparaît sur l'anode,
- pour la concentration 200 mg/l, un dépôt noir sur l'anode et même un précipité au fond du récipient sont relevés.

Concentration en acides humiques (mg/l)	R_A (%)
0	-
5	47.54
10	66.70
150	74
200	98.4

Tableau VI.26 - Réduction de l'absorbance pour la détermination de la concentration optimale en acide humique pour $I = 70$ mA et $pH = 3$.

D'après le Tableau VI.26, la meilleure réduction de l'absorbance est atteinte pour la concentration la plus élevée ; réellement, le procédé d'électrocoagulation apparaît s'améliorer au fur et à mesure que la concentration en polluant croît, ainsi, la quantité de complexes humiques-ferreux y serait plus importante.

Ces complexes humiques-ferreux, constituant, par adsorption des uns sur les autres, des colloïdes de charge plus ou moins neutralisée, entraîneraient, vers le fond du récipient, les macromolécules, restantes encore vierges, soit par adsorption soit par emprisonnement.

D'autre part, le critère économique semble être en accord avec le critère technique, puisque, pour un bon abattement de l'absorbance, l'énergie électrique dépensée serait la plus faible (Figure VI.10).

VI.3.2.4 Détermination de l'intensité du courant optimale

Il s'agit, pour l'instant, de répondre à la question : pour quel débit de charges la réduction de l'absorbance serait meilleure ? Deux valeurs d'intensité, à cet effet, l'une supérieure et l'autre inférieure à 70 mA, ont été choisies : 30 et 100 mA (0.2 et 0.68 A/dm² respectivement). Les paramètres suivants, pour ces deux essais, ont été

retenus : concentration en acide humique 150 mg/l, pH ajusté à 3 pour une durée de 40 minutes.

Pour chaque intensité, l'évolution de la tension durant le traitement a été relevée (Figure VI.11); les conditions initiales et finales des solutions électrocoagulées sont portées dans le Tableau VI.27.

Intensité (mA)	Paramètre	État initial	État final
30	pH	3	3.22
	Turbidité (NTU)	4.2	1.6
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2540	1200
	Absorbance	1.125	0.404
70	pH	3	6.27
	Turbidité (NTU)	4.2	1.2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2540	232
	Absorbance	1.115	0.2036
100	pH	3	3.671
	Turbidité NTU	4.2	0.9
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2540	738
	Absorbance	1.125	0.0903

Tableau VI.27 - Conditions initiales et finales pour la détermination de l'intensité optimale pour la solution d'acide humique 150 mg/l et pH = 3.

On a constaté que, pour les trois valeurs d'intensité, l'anode est devenue noire et, la solution est devenue limpide.

Intensité (mA)	R_A (%)
30	64.1
70	74
100	92

Tableau VI.28 - Réduction de l'absorbance de la solution d'acide humique 150 mg/l en fonction de l'intensité.

La meilleure réduction de l'absorbance, d'après le Tableau VI.28, est obtenue avec la valeur d'intensité la plus élevée ; réellement, augmenter l'intensité du courant, ou le débit de charges, ou bien la densité du courant, ou le flux de charges, est, donc, accroître le transfert de charges, en conséquence, élever le nombre de macromolécules neutralisées.

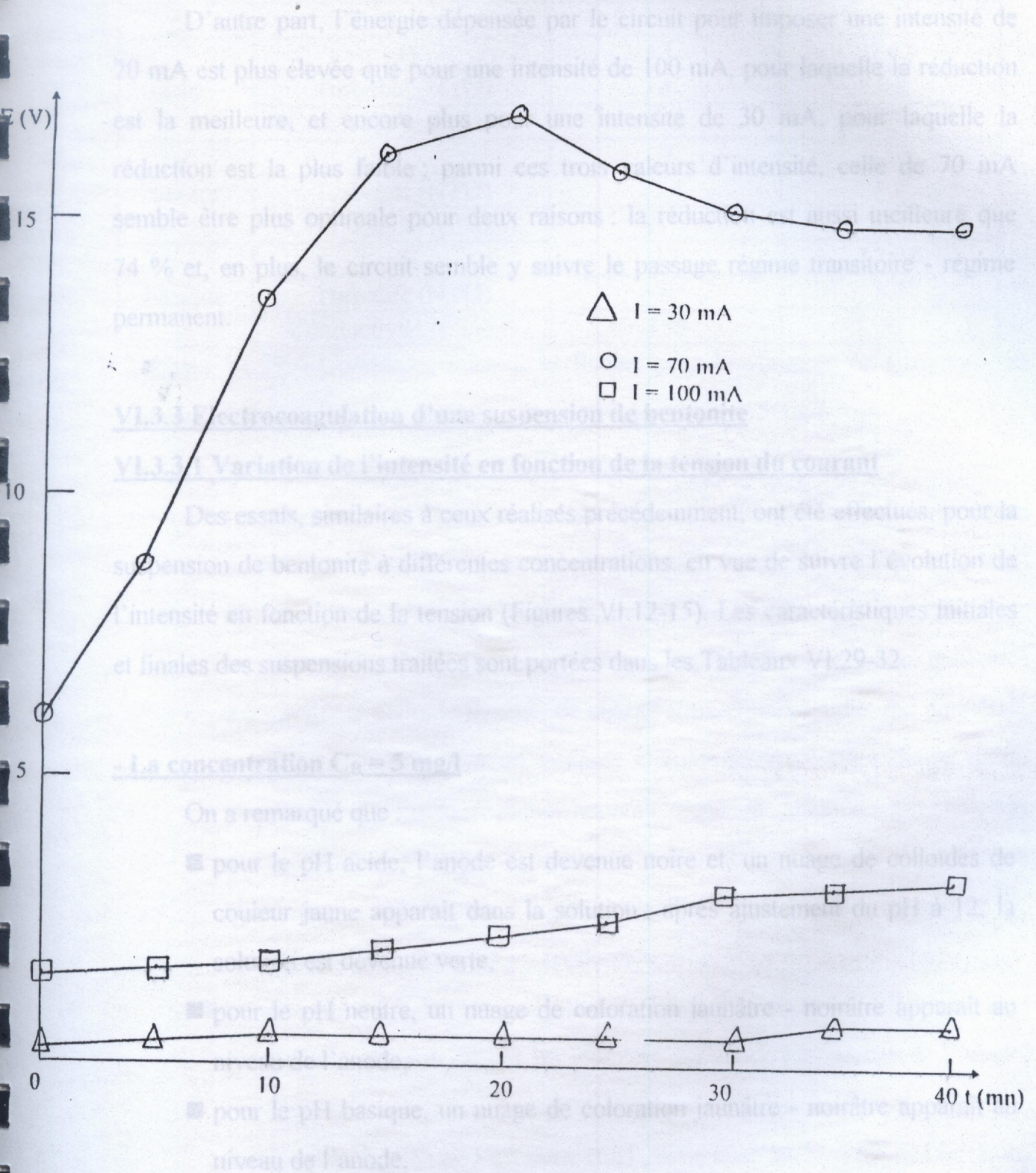


Figure VI.11 - Variation de la tension au cours du traitement en fonction de l'intensité du courant appliqué pour la solution d'acide humique 150 mg/l et pH = 3.

D'autre part, l'énergie dépensée par le circuit pour imposer une intensité de 70 mA est plus élevée que pour une intensité de 100 mA, pour laquelle la réduction est la meilleure, et encore plus pour une intensité de 30 mA, pour laquelle la réduction est la plus faible ; parmi ces trois valeurs d'intensité, celle de 70 mA semble être plus optimale pour deux raisons : la réduction est aussi meilleure que 74 % et, en plus, le circuit semble y suivre le passage régime transitoire - régime permanent.

Tableau VI.29 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en

VI.3.3 Electrocoagulation d'une suspension de bentonite

VI.3.3.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant

Des essais, similaires à ceux réalisés précédemment, ont été effectués, pour la suspension de bentonite à différentes concentrations, en vue de suivre l'évolution de l'intensité en fonction de la tension (Figures VI.12-15). Les caractéristiques initiales et finales des suspensions traitées sont portées dans les Tableaux VI.29-32.

- La concentration $C_B = 5 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire et, un nuage de colloïdes de couleur jaune apparaît dans la solution ; après ajustement du pH à 12, la solution est devenue verte,
- pour le pH neutre, un nuage de coloration jaunâtre - noirâtre apparaît au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, un nuage de coloration jaunâtre - noirâtre apparaît au niveau de l'anode,

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.43
	Turbidité (NTU)	4	1.8
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5.8	3.07
neutre	pH	7	7.68
	Turbidité (NTU)	7.4	4.2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	81.5	24.8
basique	pH	12	12.04
	Turbidité (NTU)	6	3.2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	156	36

Tableau VI.29 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension de bentonite $C_B = 5 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

- pour le pH acide, les particules de bentonite, chargées négativement, sont attirées vers l'anode ; au niveau de celle-ci, les colloïdes minéraux agissent avec l'espèce métallique bivalente, puisque la solution aura une coloration verdâtre après décantation et ajustement du pH à 12, pour donner naissance à un système colloïde-ferreux, de charge apparemment nulle, qui donnerait, à son tour, naissance à un système colloïde-ferrique, étant donné qu'un nuage fin de couleur jaune apparaît dans la solution, par réaction d'oxydation de Fe^{2+} par l'oxygène constituant les sommets des couches tétraédriques externes de l'édifice cristallin, c'est donc le mécanisme de neutralisation de charge qui y prédomine,
- pour le pH basique, les particules de bentonite, de taille colloïdale, sont précédées, cette fois-ci, par les ions OH^- à l'anode ; au niveau de l'anode, les colloïdes minéraux auront à interagir avec les hydroxydes ferreux, formés par réaction de Fe^{2+} avec 2OH^- , et/ou avec les hydroxydes ferriques formés par réaction de Fe^{3+} , issu de l'oxydation de Fe^{2+} par l'oxygène produit au niveau de l'anode également, avec 3OH^- , cette interaction avec les colloïdes minéraux et les cations métalliques entourés par des

groupements hydroxyles est soit par adsorption, par ponts hydrogène, soit par sweep-coagulation,

- pour le pH neutre, la neutralisation de charge et l'adsorption coexistent ; le cation bivalent avec les ions OH^- , en nombre relativement moyen, interagissent pour constituer un hydroxyde métallique, soit de type $\text{Fe}(\text{OH})^+$ qui peut être attiré directement vers la surface du colloïde pour donner naissance au système colloïde-ferrique soit, de type $\text{Fe}(\text{OH})_3$ qui peut être facilement adsorbé sur la surface, assez oxygénée, du colloïde par ponts hydrogène.

D'autre part, la pente moyenne de la courbe, exprimant l'intensité en fonction de la tension, étant proportionnelle à la conductivité de la suspension, indique que la solution acidulée affiche moins de résistance au passage du courant que celle à pH basique et encore en moindre mesure que la neutralisée (Figure VI.12).

- La concentration $C_B = 10 \text{ mg/l}$

On a constaté que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire,
- pour les pH neutre et basique, un nuage jaune - noir apparaît au niveau de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3
	Turbidité NTU	9.4	4.5
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	13.4	12.6
neutre	pH	7	7.7
	Turbidité (NTU)	16	9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	160	66.2
basique	pH	12	12
	Turbidité (NTU)	15.5	8
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	144	81.8

Tableau VI.30 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension de bentonite $C_B = 10 \text{ mg/l}$.

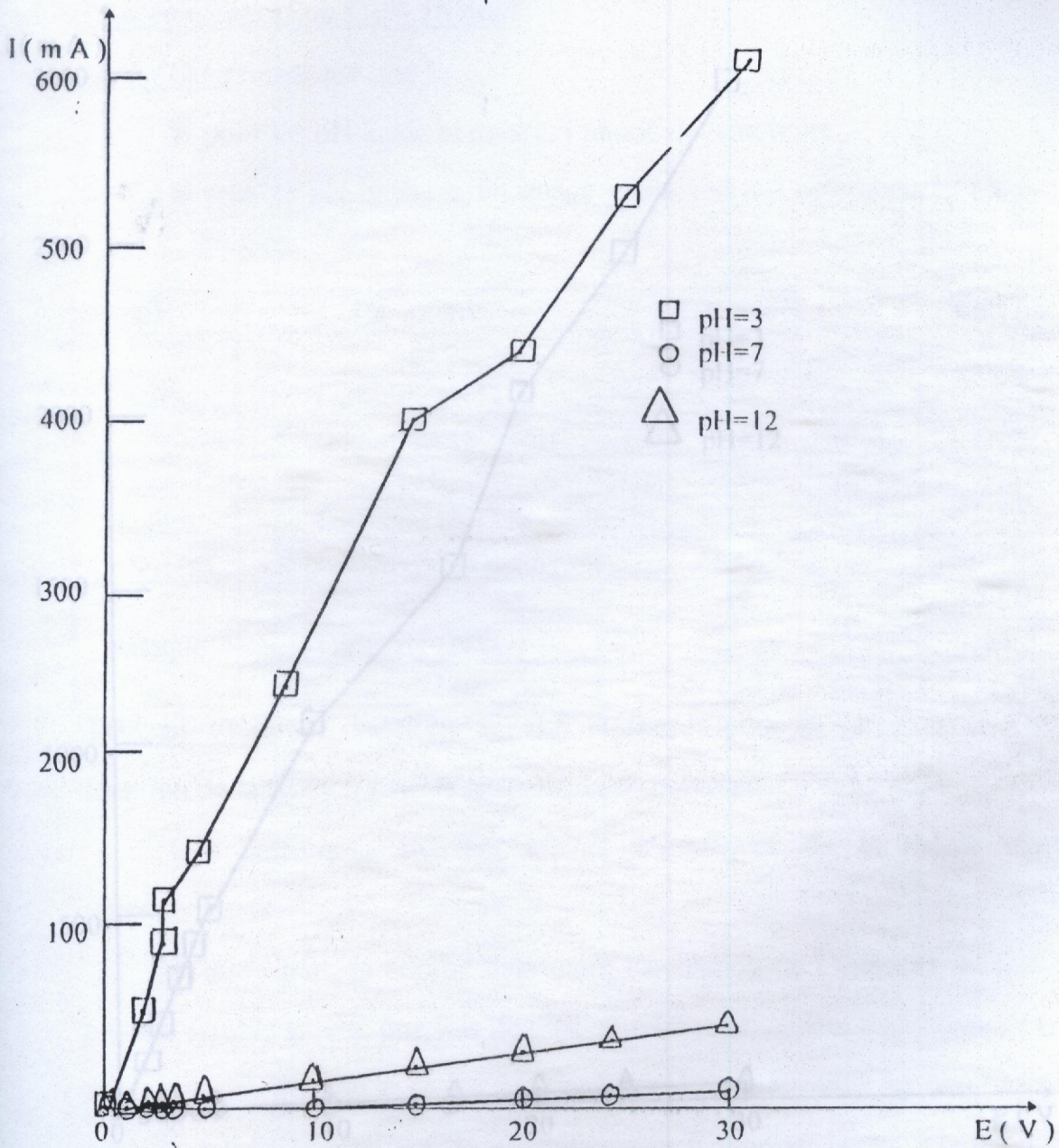


Figure VI.12 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_B = 5 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'expliquer de la même manière que précédemment. D'autre part, la variation de l'intensité en fonction de la tension affiche une nette distinction, entre le pH acide et les pH neutre et basique, en matière de transmission de la tension appliquée (Figure VI.13).

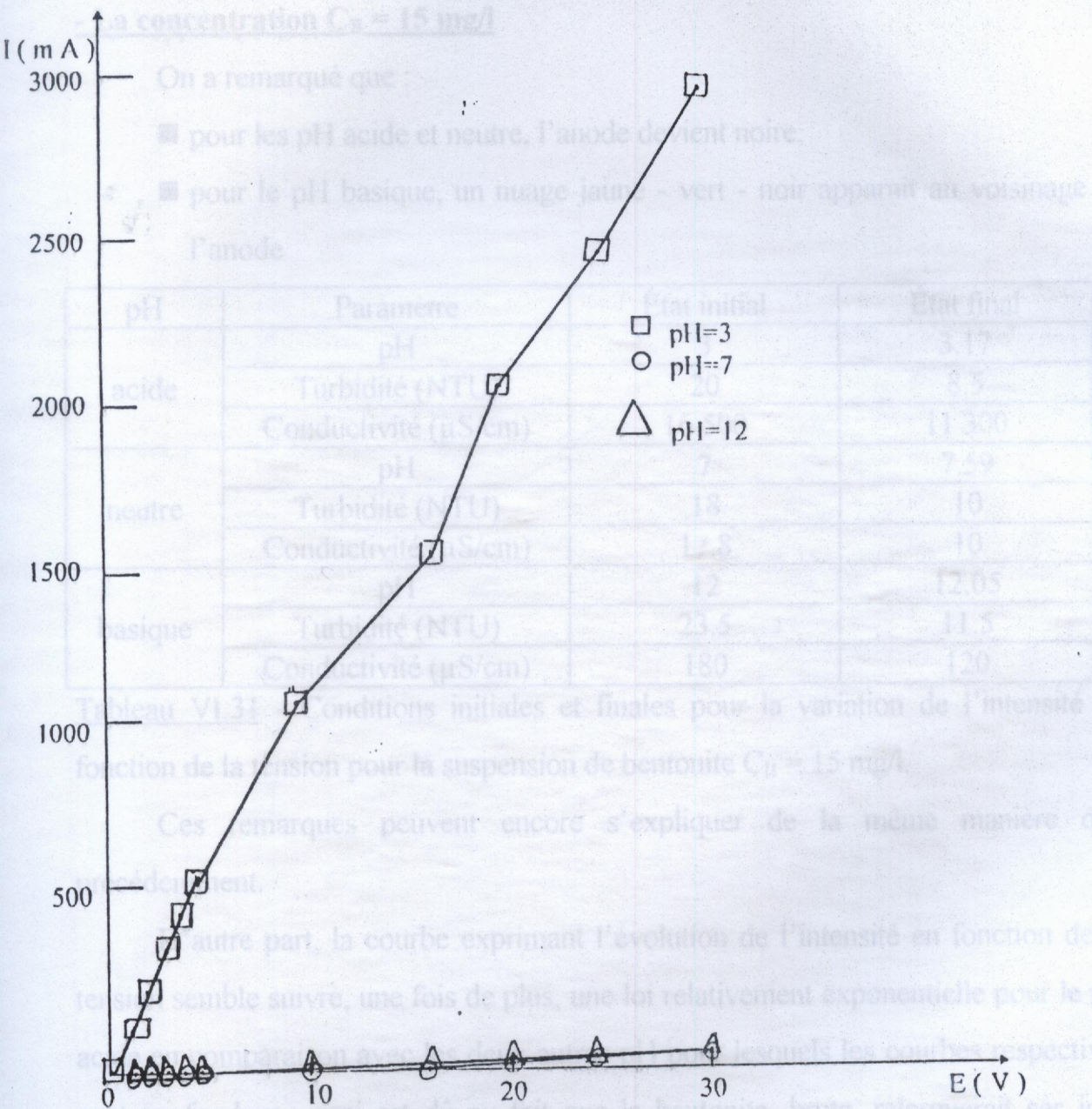


Tableau VI.31 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension de bentonite $C_B = 15 \text{ mg/l}$.

Ces remarques peuvent encore s'expliquer de la même manière que précédemment. D'autre part, la courbe exprimant l'évolution de l'intensité en fonction de la tension semble suivre, une fois de plus, une loi relativement exponentielle pour le pH acide, tandis que pour les pH neutre et basique, les courbes respectives sont confondues; ceci est dû au fait que la bentonite, bruite, relarguerait ses ions impuretés (Ca^{2+} ; Na^+), augmentant ainsi la conductivité de la solution à pH acide, d'une façon plus prononcée, et tenterait de les garder dans les autres cas. En conséquence, aciduler le pH de la suspension, électrocoagulée, de bentonite pourrait

Figure VI.13 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_B = 10 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'expliquer de la même manière que précédemment.

D'autre part, la variation de l'intensité en fonction de la tension affiche une nette distinction, entre le pH acide et les pH neutre et basique, en matière de transmission de la tension appliquée (Figure VI.13).

- La concentration $C_B = 15 \text{ mg/l}$

On a remarqué que :

- pour les pH acide et neutre, l'anode devient noire,
- pour le pH basique, un nuage jaune - vert - noir apparaît au voisinage de l'anode

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.17
	Turbidité (NTU)	20	8.5
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	16 500	11 300
neutre	pH	7	7.59
	Turbidité (NTU)	18	10
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	17.8	10
basique	pH	12	12.05
	Turbidité (NTU)	23.5	11.5
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	180	120

Tableau VI.31 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension de bentonite $C_B = 15 \text{ mg/l}$.

Ces remarques peuvent encore s'expliquer de la même manière que précédemment.

D'autre part, la courbe exprimant l'évolution de l'intensité en fonction de la tension semble suivre, une fois de plus, une loi relativement exponentielle pour le pH acide en comparaison avec les deux autres pH pour lesquels les courbes respectives sont confondues ; ceci est dû au fait que la bentonite, brute, relarguerait ses ions impuretés (Ca^{2+} , Na^+), augmentant ainsi la conductivité de la solution à pH acide, d'une façon plus prononcée, et tenterait de les garder dans les autres cas. En conséquence, aciduler le pH de la suspension, électrocoagulée, de bentonite pourrait constituer une méthode de purification assez prometteuse (Figure VI.14).

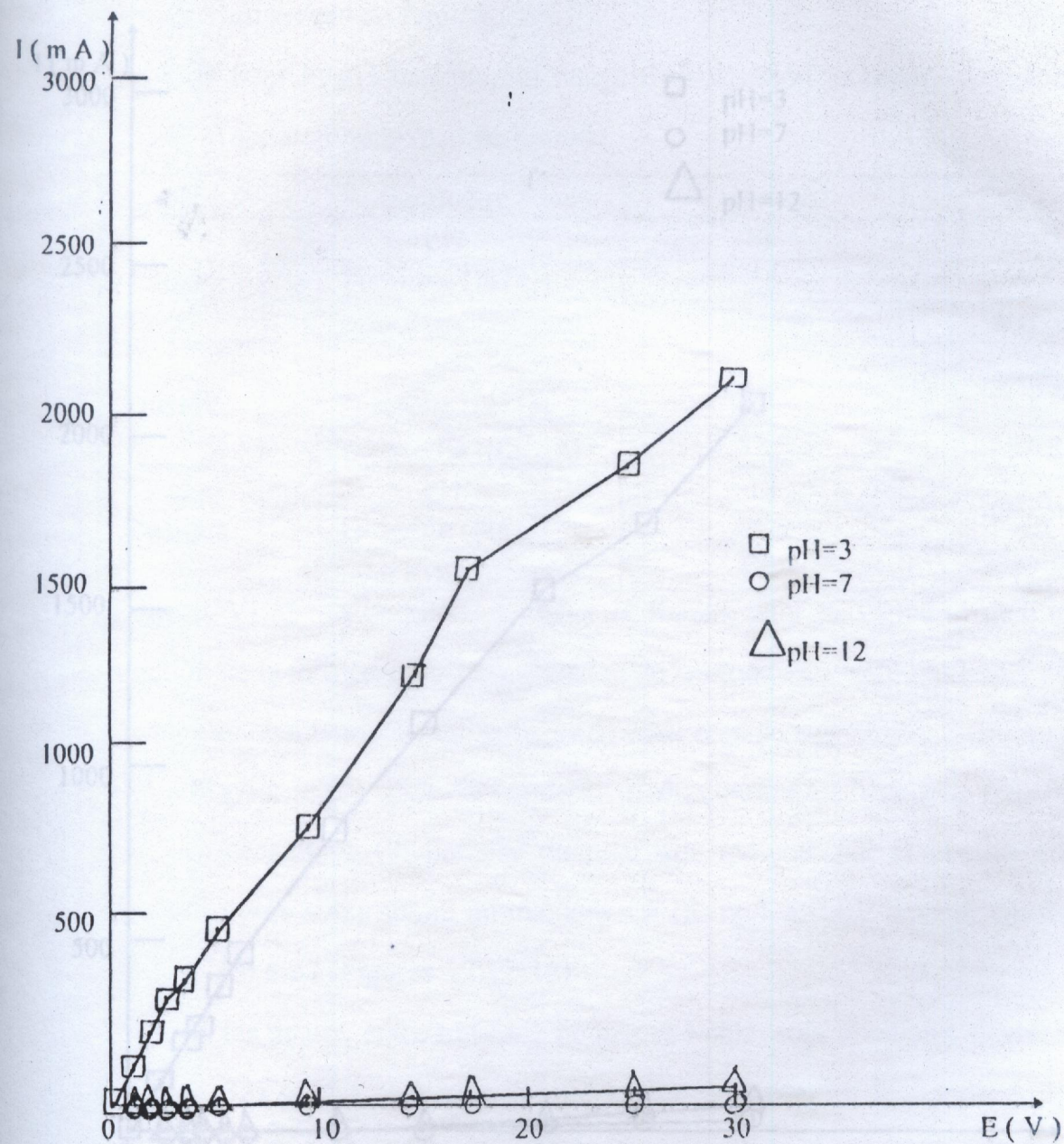


Figure VI.14 - Variation de l'intensité en fonction de la tension pour $C_B = 15$ mg/l.

- La concentration $C_B = 20 \text{ mg/l}$

On a constaté que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire,
- pour le pH neutre, un nuage, peu énorme, de couleur jaune - verte, apparaît au niveau de l'anode,
- pour le pH basique, un nuage de coloration jaunâtre - verdâtre - noirâtre apparaît au niveau de l'anode.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.03
	Turbidité (NTU)	55	6.5
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	15 000	9 880
neutre	pH	7	7.92
	Turbidité (NTU)	24	7
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	57.3	52.8
basique	pH	12	11.92
	Turbidité (NTU)	65.5	19
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	175	127

Tableau VI.32 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension de bentonite $C_B = 20 \text{ mg/l}$.

Ces observations peuvent s'interpréter comme suit :

- pour le pH acide, la conductivité du courant est beaucoup plus importante ; ceci étaye l'hypothèse du relargage ionique, par la bentonite brute, qui, après avoir atteint un maximum à 10 mg/l , semble devenir constant à 15 et 20 mg/l (Figures VI.12-15),
- les écarts, entre turbidité initiale et finale, sont améliorés (Tableaux VI.29-32) au fur et à mesure que la concentration en bentonite croît ; ceci est attribué à la mise en appel du phénomène de sweep-coagulation.

Tableau VI.34 - Réduction de la turbidité de la suspension de bentonite $C_B = 15 \text{ mg/l}$ en fonction du pH.

VI.3.3.2 Détermination du pH optimal

Il est question, à présent, de déterminer le pH optimal pour lequel une meilleure réduction de bentonite, en matière de turbidité, serait atteinte ; à cet effet, l'intensité du courant est fixée à 6 mA ($i = 0.04 \text{ A/dm}^2$), pour une durée de traitement de 40 minutes et une concentration de 15 mg/l en bentonite (valeur intermédiaire). On notera, pour chaque 5 minutes, la valeur de la tension correspondante pour le pH acide, neutre, et basique (Figure VI.16) ; les conditions initiales et finales de ces essais sont portées dans le Tableau VI.33.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	4.58
	Turbidité (NTU)	20	3.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	16 500	764
neutre	pH	7	5.27
	Turbidité (NTU)	18	10
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	17.8	684
basique	pH	12	5.71
	Turbidité (NTU)	23.5	4.6
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	180	331

Tableau VI.33 - Conditions initiales et finales pour la détermination du pH optimal pour la suspension de bentonite $C_B = 15 \text{ mg/l}$.

On remarque que :

- pour tous les pH, un nuage de couleur jaune apparaît au niveau de l'anode ; la solution est devenue claire, pour le pH neutre, et jaune pour le pH basique.

pH	R_B (%)
3	84.5
7	44.44
12	80.42

Tableau VI.34 - Réduction de la turbidité de la suspension de bentonite $C_B = 15 \text{ mg/l}$ en fonction du pH.

D'après le Tableau VI.34, la meilleure réduction de la turbidité est atteinte pour le pH acide.

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

l'élimination maximale se manifeste pour le pH acide et pour le pH basique ; cette distinction en terme d'efficacité, entre les extrémités et le milieu de la rangée du pH, met en évidence la préférence de l'existence séparée d'un tel ou tel phénomène :

neutralisation de charge et adsorption pour les bornes inférieure et supérieure, respectivement, de l'intervalle du pH.

D'autre part, le processus d'électrocoagulation semble passer par une période transitoire, de 20 minutes, notamment pour le pH basique, avant d'atteindre le régime permanent pour lequel la tension est constante (Figure VI.16) ; pour imposer un certain débit de charges, le circuit dépensera plus d'énergie pour le pH acide, pour lequel la réduction est la meilleure, que pour le pH neutre, pour lequel la réduction est assez moyenne, et pour le pH basique caractérisé par une aussi bonne réduction.

VI.3.3.3 Détermination de la concentration optimale en bentonite

La question, qui se pose dans ce qui suit, est pour quelle concentration en bentonite le procédé réagit le mieux ? Pour cela, l'intensité du courant est fixée à 6 mA ($i = 0.04 \text{ A/dm}^2$) pour une durée de traitement de 40 minutes et un pH égal à 3 (optimal). On notera, à 5 minutes d'intervalle, la valeur de la tension correspondante pour les concentrations 0, 5, 10, 15 et 20 mg/l (Figure VI.17) ; les conditions initiales et finales de ces résultats sont portées dans le Tableau VI.35.

0	11.07
10	67.1
15	81.5
20	90.84

Tableau VI.36 - Réduction de la turbidité pour la détermination de la concentration optimale pour $i = 6 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

Concentration (mg/l)	Paramètre	État initial	État final
0	pH	3	3.10
	Turbidité NTU	1.4	2.3
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	1 070	149
5	pH	3	3.97
	Turbidité (NTU)	6	5.3
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	156	110
10	pH	3	3.61
	Turbidité NTU	15.5	5.1
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	144	110
15	pH	3	4.58
	Turbidité NTU	20	527
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	16 500	764
20	pH	3	3.72
	Turbidité (NTU)	65.5	6
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	175	97.5

Tableau VI.35 - Conditions initiales et finales pour la détermination de la concentration optimale en bentonite pour $I = 6 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

On a constaté que :

- pour l'eau du robinet acidulée, un précipité noir apparaît au fond du récipient et la solution est de coloration légèrement jaunâtre,
- pour la solution de concentration 5 mg/l, un nuage de couleur verte - jaune - marron - noire apparaît dans la solution,
- pour les concentrations 10, 15 et 20 mg/l, la solution est de coloration jaunâtre et un précipité noir apparaît au fond du récipient.

Concentration en bentonite (mg/l)	R_B (%)
0	-
5	11.67
10	67.1
15	84.5
20	90.84

Tableau VI.36 - Réduction de la turbidité pour la détermination de la concentration optimale pour $I = 6 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

Figure VI.16 - Variation de la tension du courant au cours du franchissement en fonction du pH pour l'intensité $I = 6 \text{ mA}$ et $C_{B0} = 15 \text{ mg/l}$

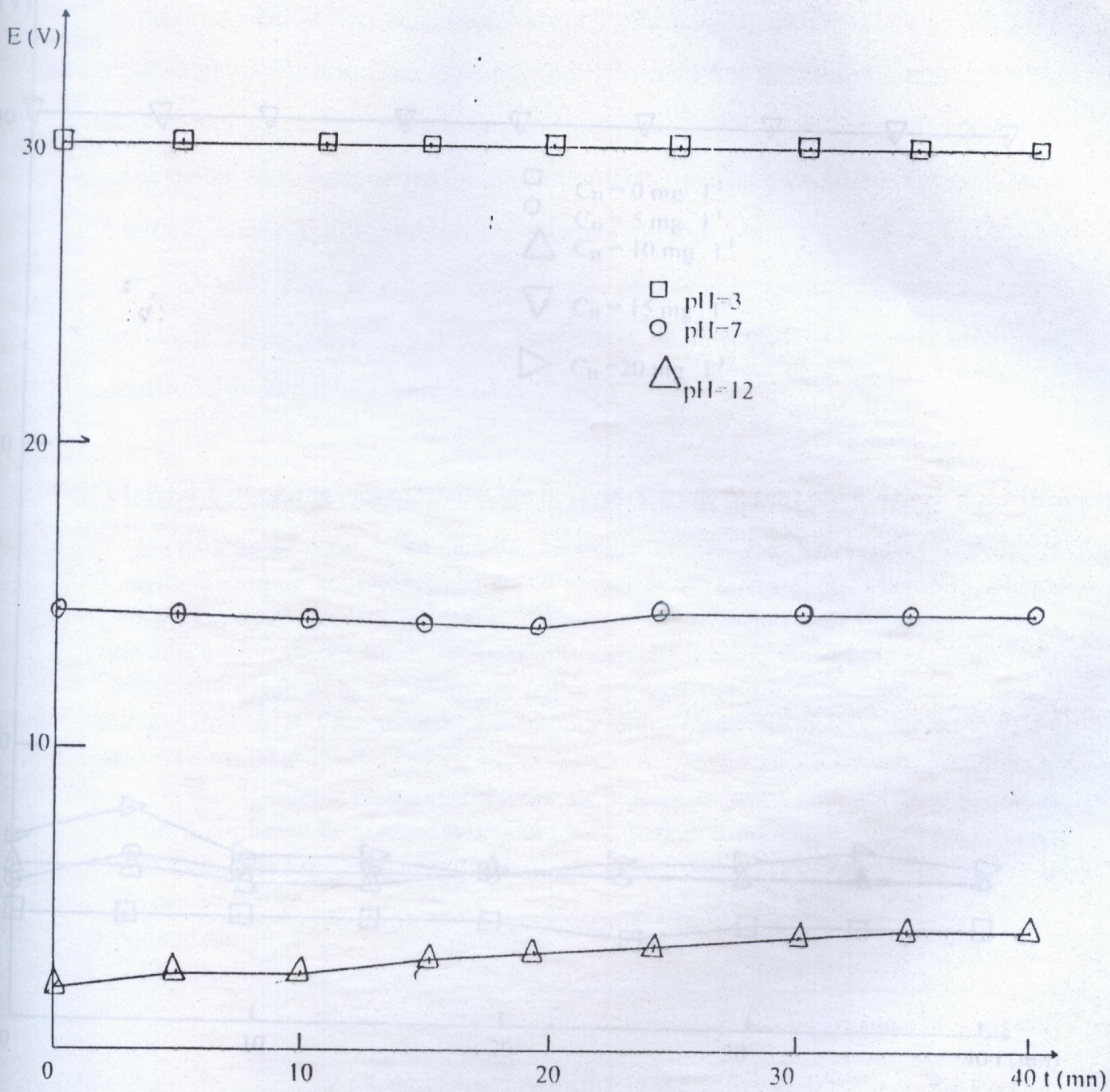
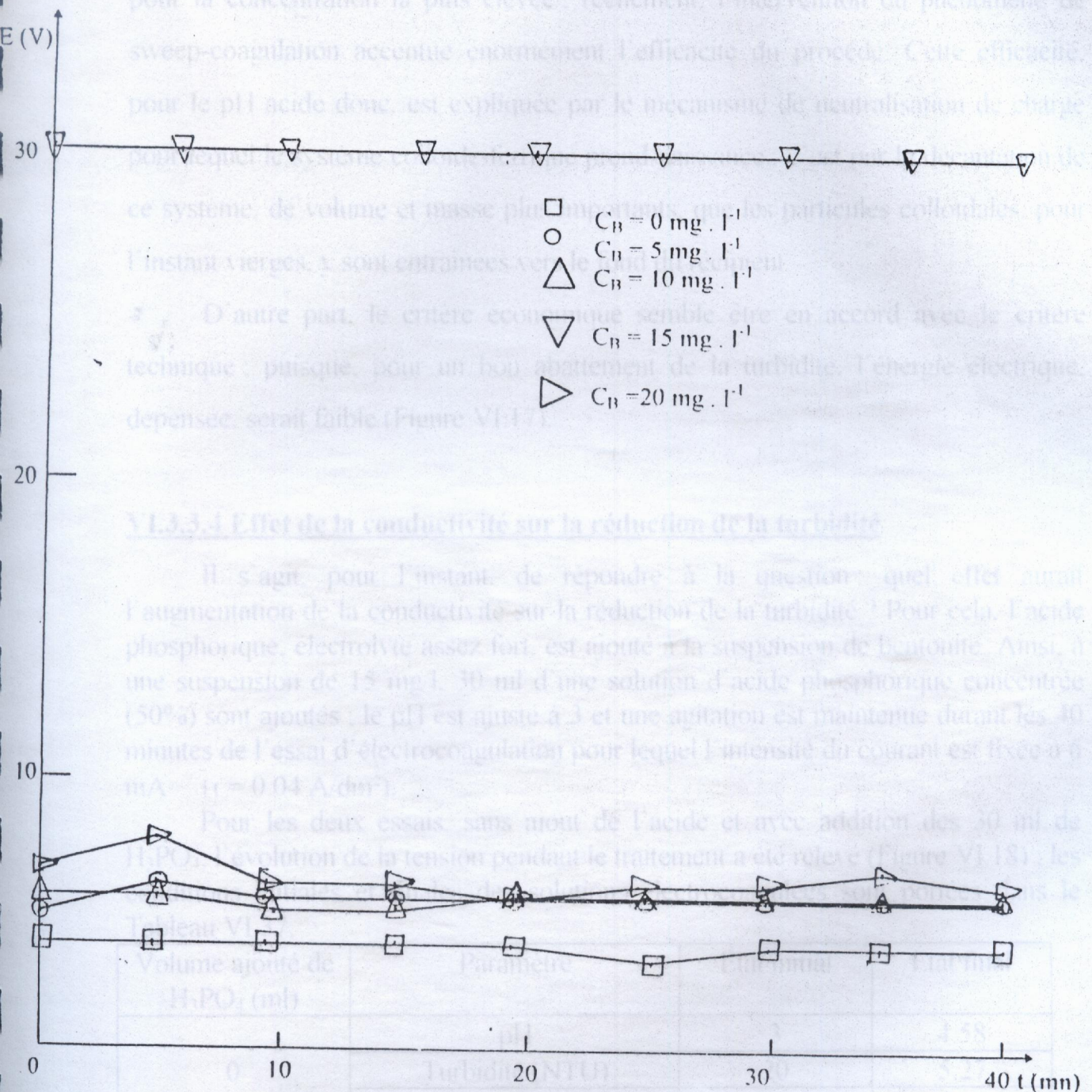


Figure VI.16 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction pH pour l'intensité $I = 6$ mA et $C_B = 15$ mg/l.



VI.3.3.4 Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité

Il s'agit pour l'instant de répondre à la question : quel effet aura l'augmentation de la conductivité sur la réduction de la turbidité ? Pour cela, l'acide phosphorique, électrolyte assez fort, est ajouté à la suspension de bentonite. Ainsi, à une suspension de 15 mg.l⁻¹, 30 ml d'une solution d'acide phosphorique concentrée (50%) sont ajoutés, le pH est ajusté à 3 et une agitation est maintenue durant les 40 minutes de l'essai d'électrocoagulation pour lequel l'intensité du courant est fixée à 6 mA ($i_c = 0.04 \text{ A} \cdot \text{dm}^2$).

Pour les deux essais sans ajout de l'acide et avec addition des 30 ml de H₃PO₄, l'évolution de la tension pendant le traitement a été relevée (Figure VI.18) ; les

Volume ajouté de H ₃ PO ₄ (ml)	Paramètre	Initial	Final
30	Turbidité (NTU)	50	45
	Conductivité (μS/cm)	45 000	30 600
	pH	3	3,96
	Conductivité (μS/cm)	16 200	764

Tableau VI.37 - Conditions initiales et finales pour l'influence de la conductivité

Figure VI.17 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction de la concentration en bentonite pour $I = 6 \text{ mA}$ et $\text{pH} = 3$.

D'après le Tableau VI.36, la meilleure réduction de la turbidité est atteinte pour la concentration la plus élevée : réellement, l'intervention du phénomène de sweep-coagulation accentue énormément l'efficacité du procédé. Cette efficacité, pour le pH acide donc, est expliquée par le mécanisme de neutralisation de charge pour lequel le système colloïde-ferrique prend naissance : c'est par la décantation de ce système, de volume et masse plus importants, que les particules colloïdales, pour l'instant vierges, y sont entraînées vers le fond du récipient.

D'autre part, le critère économique semble être en accord avec le critère technique : puisque, pour un bon abattement de la turbidité, l'énergie électrique, dépensée, serait faible (Figure VI.17).

VI.3.3.4 Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité

Il s'agit, pour l'instant, de répondre à la question : quel effet aurait l'augmentation de la conductivité sur la réduction de la turbidité ? Pour cela, l'acide phosphorique, électrolyte assez fort, est ajouté à la suspension de bentonite. Ainsi, à une suspension de 15 mg/l, 30 ml d'une solution d'acide phosphorique concentrée (50%) sont ajoutés : le pH est ajusté à 3 et une agitation est maintenue durant les 40 minutes de l'essai d'électrocoagulation pour lequel l'intensité du courant est fixée à 6 mA ($i = 0.04 \text{ A/dm}^2$).

Pour les deux essais, sans ajout de l'acide et avec addition des 30 ml de H_3PO_4 , l'évolution de la tension pendant le traitement a été relevé (Figure VI.18) : les conditions initiales et finales des solutions électrocoagulées sont portées dans le Tableau VI.37.

Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)	Paramètre	État initial	État final
0	pH	3	4.58
	Turbidité (NTU)	20	5.27
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	16 500	764
30	pH	3	3.96
	Turbidité (NTU)	59	4.5
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	46 000	39 600

Tableau VI.37 - Conditions initiales et finales pour l'influence de la conductivité

Figure VI.18 - de la solution pour la concentration $C_B = 15 \text{ mg/l}$ et $\text{pH} = 3$.
conductivité de la solution pour la concentration $C_B = 15 \text{ mg/l}$ et $\text{pH} = 3$.

D'après le Tableau VI.38, une meilleure réduction de la turbidité est obtenue avec l'ajout de 30 ml d'acide phosphorique ; réellement, la présence d'espèces plus ou moins chargées négativement : $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , et PO_4^{3-} , semble épauler l'hypothèse de la formation, au niveau de l'anode, d'un floc, à base de phosphate et de densité plus importante en comparaison avec l'hydroxyde métallique (fer seul). Cette sweep-coagulation y est à coupler avec une adsorption, qui reste envisageable entre floc et colloïde par ponts hydrogène, ainsi avec la neutralisation de charge.

Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)	η_{sp}/C (%)
0	84,5
30	92,37

Tableau VI.38 - Réduction de la turbidité pour l'effet de la conductivité de la solution pour $C_{H_3PO_4} = 15 \text{ mg/l}$ et $\text{pH} = 3$.

D'autre part, l'énergie dépensée par le circuit pour imposer une intensité de 6 mA est plus élevée sans ajout de polyélectrolyte (Figure VI.18) ; tout met en évidence, une fois de plus, l'influence de la conductivité sur la transmission électrique dans la solution.

VI.3.4 Electrocovagulation d'une suspension mélangée de bentonite et d'acide humique

VI.3.4.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant

Des essais similaires à ceux réalisés précédemment, ont été effectués pour la suspension mélangée de 15 mg/l en bentonite et 15 mg/l en acide humique, en vue de suivre l'évolution de l'intensité en fonction de la tension (Figure VI.19). Les résultats initiaux et finaux des solutions traitées sont portés dans le Tableau VI.39.

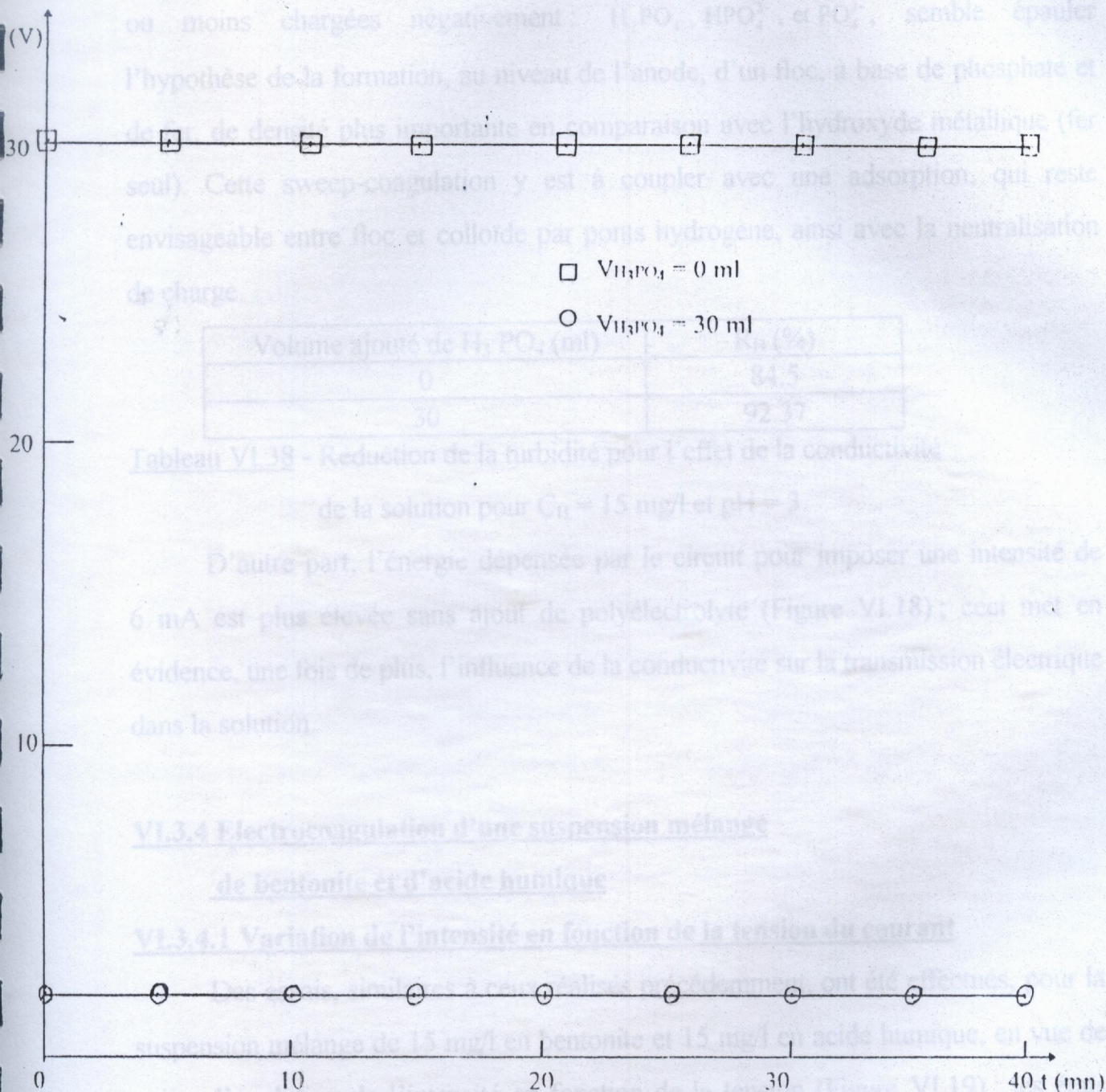


Figure VI.18 - Variation de la tension au cours du traitement par l'influence de la conductivité de la solution pour la concentration 15 mg/l et $\text{pH} = 3$.

D'après le Tableau VI.38, une meilleure réduction de la turbidité est obtenue avec l'ajout de 30 ml d'acide phosphorique ; réellement, la présence d'espèces plus ou moins chargées négativement : $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , et PO_4^{3-} , semble épauler l'hypothèse de la formation, au niveau de l'anode, d'un floc, à base de phosphate et de fer, de densité plus importante en comparaison avec l'hydroxyde métallique (fer seul). Cette sweep-coagulation y est à coupler avec une adsorption, qui reste envisageable entre floc et colloïde par ponts hydrogène, ainsi avec la neutralisation de charge.

Volume ajouté de $H_3 PO_4$ (ml)	R_B (%)
0	84.5
30	92.37

Tableau VI.38 - Réduction de la turbidité pour l'effet de la conductivité de la solution pour $C_B = 15$ mg/l et $pH = 3$.

D'autre part, l'énergie dépensée par le circuit pour imposer une intensité de 6 mA est plus élevée sans ajout de polyélectrolyte (Figure VI.18) ; ceci met en évidence, une fois de plus, l'influence de la conductivité sur la transmission électrique dans la solution.

VI.3.4 Electrocoagulation d'une suspension mélange de bentonite et d'acide humique

VI.3.4.1 Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant

Des essais, similaires à ceux réalisés précédemment, ont été effectués, pour la suspension mélange de 15 mg/l en bentonite et 15 mg/l en acide humique, en vue de suivre l'évolution de l'intensité en fonction de la tension (Figure VI.19) ; les états initiaux et finaux des solutions traitées sont portés dans le Tableau VI.39.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.14
	Turbidité (NTU)	43	2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	26 900	7 200
neutre	pH	7	9
	Turbidité (NTU)	15.5	3
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 330	1 330
basique	pH	12	11.76
	Turbidité (NTU)	11.5	6
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 100	908

Tableau VI.39 - Conditions initiales et finales pour la variation de l'intensité en fonction de la tension pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

On a remarqué que :

- pour le pH acide, l'anode est devenue noire et, la solution reste toujours marron,
- pour les autres pH, un nuage noir apparaît au niveau de l'anode.

Ces paramètres peuvent s'expliquer comme suit :

le nouveau système minéral - organique, constitué d'une particule colloïdale sur laquelle des macromolécules sont greffées, conduit aussi bien le courant électrique, en solution aqueuse, notamment à pH acide, que les systèmes minéral ou organique séparément (Tableau VI.39).

D'autre part, la variation de l'intensité en fonction de la tension du courant suit la même allure que celle de la suspension de bentonite (Figure VI.19) ; ceci indique que le système minéral - organique garderait les mêmes propriétés, physico-chimiques, que le colloïde seul.

VI.3.4.2 Détermination du pH optimal

Il est question, à présent, de déterminer le pH optimal pour lequel une meilleure réduction de turbidité serait atteinte ; à cet effet, l'intensité du courant est fixée à 200 mA ($i = 1.36 \text{ A}/\text{dm}^2$) pour une durée d'opération de 40 minutes.

suspension mélange de bentonite et d'acide humique

On notera, pour chaque 5 minutes, la valeur de la tension correspondante à chaque pH (Figure VI.20) ; les conditions initiales et finales de ces essais sont portées dans le Tableau VI.40.

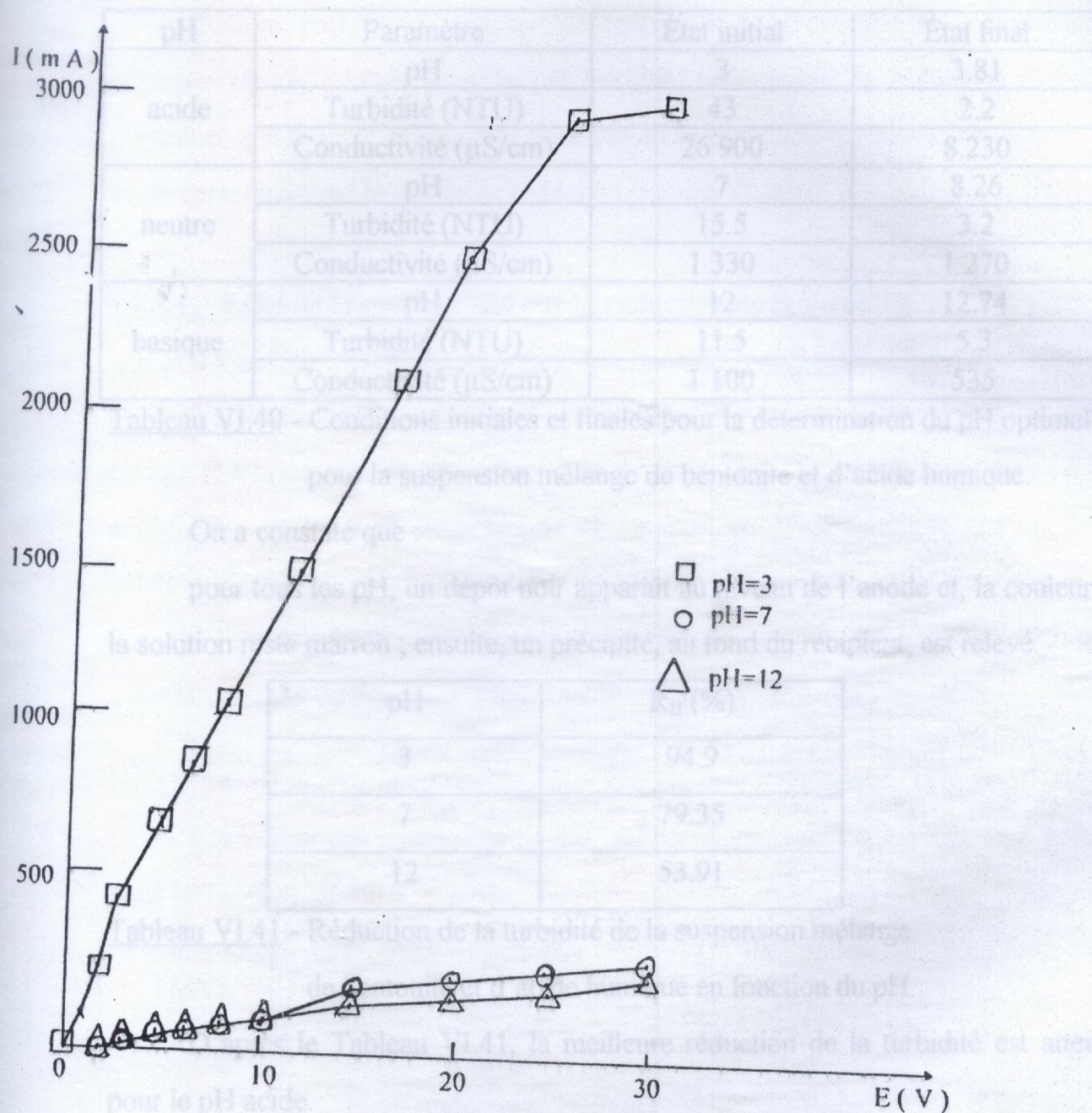


Figure VI.19 - Variation de l'intensité en fonction de la tension du courant pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

On notera, pour chaque 5 minutes, la valeur de la tension correspondante pour chaque pH (Figure VI.20); les conditions initiales et finales de ces essais sont portées dans le Tableau VI.40.

pH	Paramètre	État initial	État final
acide	pH	3	3.81
	Turbidité (NTU)	43	2.2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	26 900	8 230
neutre	pH	7	8.26
	Turbidité (NTU)	15.5	3.2
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 330	1 270
basique	pH	12	12.74
	Turbidité (NTU)	11.5	5.3
	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 100	535

Tableau VI.40 - Conditions initiales et finales pour la détermination du pH optimal pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

On a constaté que :

pour tous les pH, un dépôt noir apparaît au niveau de l'anode et, la couleur de la solution reste marron ; ensuite, un précipité, au fond du récipient, est relevé.

pH	R_B (%)
3	94.9
7	79.35
12	53.91

Tableau VI.41 - Réduction de la turbidité de la suspension mélange de bentonite et d'acide humique en fonction du pH.

D'après le Tableau VI.41, la meilleure réduction de la turbidité est atteinte pour le pH acide.

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

l'élimination de la turbidité est quasi-totale pour le pH acide, cette facilité de réduction est due au fait que le système minéral - organique, avec sa large gamme de composants : cations multivalents, groupements hydroxyles, groupements carboxyliques et phénoliques, présente la possibilité d'action du mécanisme cité

précédemment, à savoir : neutralisation de charge pour le pH acide ; la taille et la surface du système, enrobé de macromolécules organiques, étayant, en outre, la coexistence de la sweep-coagulation avec la neutralisation de charge.

D'autre part, pour imposer un certain flux de charges, le circuit aura à dépenser plus d'énergie pour le pH basique, pour lequel la réduction est assez moyenne, que pour le pH neutre, pour lequel la réduction est bonne, et pour le pH acide caractérisé par la meilleure réduction (Figure VI.20).

VI.3.4.3 Effet de la conductivité sur la réduction de la turbidité

Il s'agit, à présent, de répondre à la question : quel effet aurait l'augmentation de la conductivité sur la réduction de la turbidité ? Pour cela, de l'acide phosphorique est ajouté à la suspension de bentonite en mélange avec l'acide humique. Ainsi, à une suspension de 15 mg/l en bentonite et 15 mg/l en acide humique, 30 ml d'une solution d'acide phosphorique concentrée (50 %) sont ajoutés ; le pH est ajusté à 3 et une agitation est maintenue durant les 40 minutes de l'essai d'électrocoagulation pour lequel l'intensité du courant est fixée à 200 mA ($i = 1.36 \text{ A/dm}^2$).

Pour les deux essais, sans ajout de l'acide et avec addition des 30 ml de H_3PO_4 , l'évolution de la tension pendant le traitement a été relevée (Figure VI.21).

Les conditions initiales et finales des solutions électrocoagulées sont portées dans le Tableau VI.42.

Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)	Paramètre	État initial	État final
0	pH	3	3.81
	Turbidité (NTU)	43	2.2
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	26 900	8 230
30	pH	3	3.48
	Turbidité (NTU)	41	1.9
	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	23 700	117

Tableau VI.42 - Conditions initiales et finales pour l'influence de la conductivité

de la solution pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

D'après le Tableau VI-43, une meilleure réduction de la turbidité est atteinte avec l'ajout de 30 ml d'acide phosphorique.

Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)	R_{11} (%)
0	94,9
30	95,37

Tableau VI-43 - Réduction de la turbidité pour l'effet de l'ajout de l'acide phosphorique pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique. Ces observations peuvent expliquer comme suit :

En fait, l'ajout, voulu, de la conductivité ne se détecte pas à travers la mesure de la conductivité (Tableau VI-42) initiale à cause de la formation de sels de calcium et de sodium générée par les cations Ca^{2+} et Na^+ relargués par les feuillets montmorillonitiques et les amions PO_4^{3-} introduits en solution ; la turbidité due, en l'occurrence, au système minéral - organique ainsi formé et aux colloïdes restants, même en moindre quantité, est à réduire simultanément par :

- sweep-coagulation, largement appuyée par la formation de floes à base de fer et de phosphate.
- adsorption, cette fois-ci, très variée : système minéral - organique - floc, système minéral - organique - colloïde, et colloïde - floc.
- adsorption de charge avec naissance du système colloïde - ferrique.

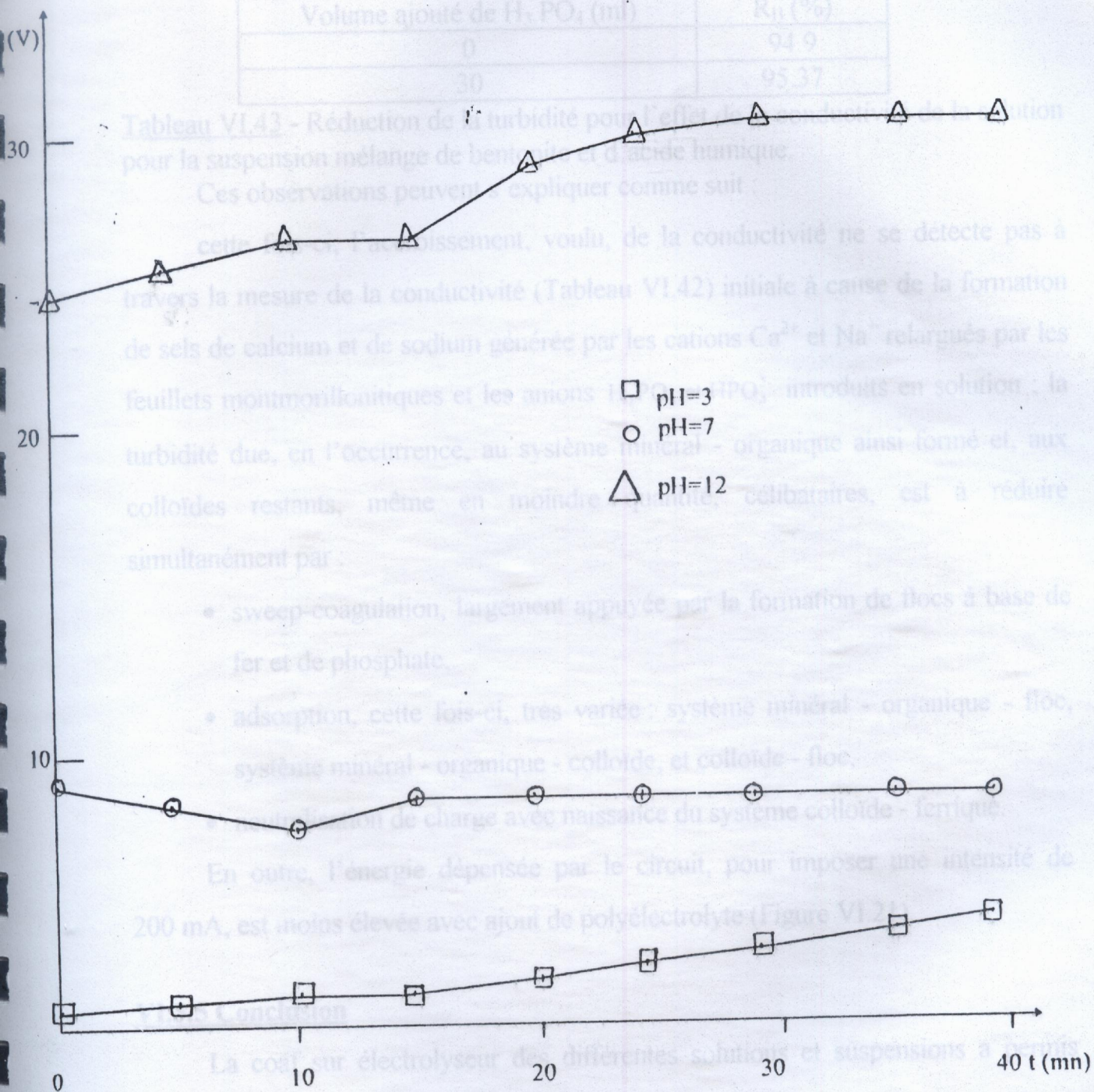
En outre, l'énergie dépensée par le circuit, pour imposer une intensité de 200 mA, est trois fois élevée avec ajout de polyélectrolyte (Figure VI-20).

La conclusion est que sur électrolyseur de différentes solutions et suspensions a

d'aboutir à un certain nombre de conclusions

- pour l'eau du robinet, le cation libéré par l'anode, trivalent et bivalent en moindre mesure, se trouve, célibataire au pH acide et lié aux hydroxydes

Figure VI.20 - Variation de la tension du courant au cours du traitement en fonction du pH pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.



D'après le Tableau VI.43, une meilleure réduction de la turbidité est atteinte avec l'ajout de 30 ml d'acide phosphorique.

Volume ajouté de $H_3 PO_4$ (ml)	R_B (%)
0	94.9
30	95.37

Tableau VI.43 - Réduction de la turbidité pour l'effet de la conductivité de la solution pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

Ces observations peuvent s'expliquer comme suit :

cette fois-ci, l'accroissement, voulu, de la conductivité ne se détecte pas à travers la mesure de la conductivité (Tableau VI.42) initiale à cause de la formation de sels de calcium et de sodium générée par les cations Ca^{2+} et Na^+ relargués par les feuillets montmorillonitiques et les anions $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} introduits en solution ; la turbidité due, en l'occurrence, au système minéral - organique ainsi formé et, aux colloïdes restants, même en moindre quantité, célibataires, est à réduire simultanément par :

- sweep-coagulation, largement appuyée par la formation de floccs à base de fer et de phosphate,
- adsorption, cette fois-ci, très variée : système minéral - organique - flocc, système minéral - organique - colloïde, et colloïde - flocc,
- neutralisation de charge avec naissance du système colloïde - ferrique.

En outre, l'énergie dépensée par le circuit, pour imposer une intensité de 200 mA, est moins élevée avec ajout de polyélectrolyte (Figure VI.21).

VI.3.5 Conclusion

La coaf sur électrolyseur des différentes solutions et suspensions a permis d'aboutir à un certain nombre de conclusions :

- pour l'eau du robinet, le cation libéré par l'anode, trivalent et, bivalent en moindre mesure, se trouve, célibataire au pH acide et, lié aux hydroxyles quand le pH ne l'est pas, rendant l'eau du robinet une solution colorée (jaunâtre) pour le premier cas et une suspension pour le second,

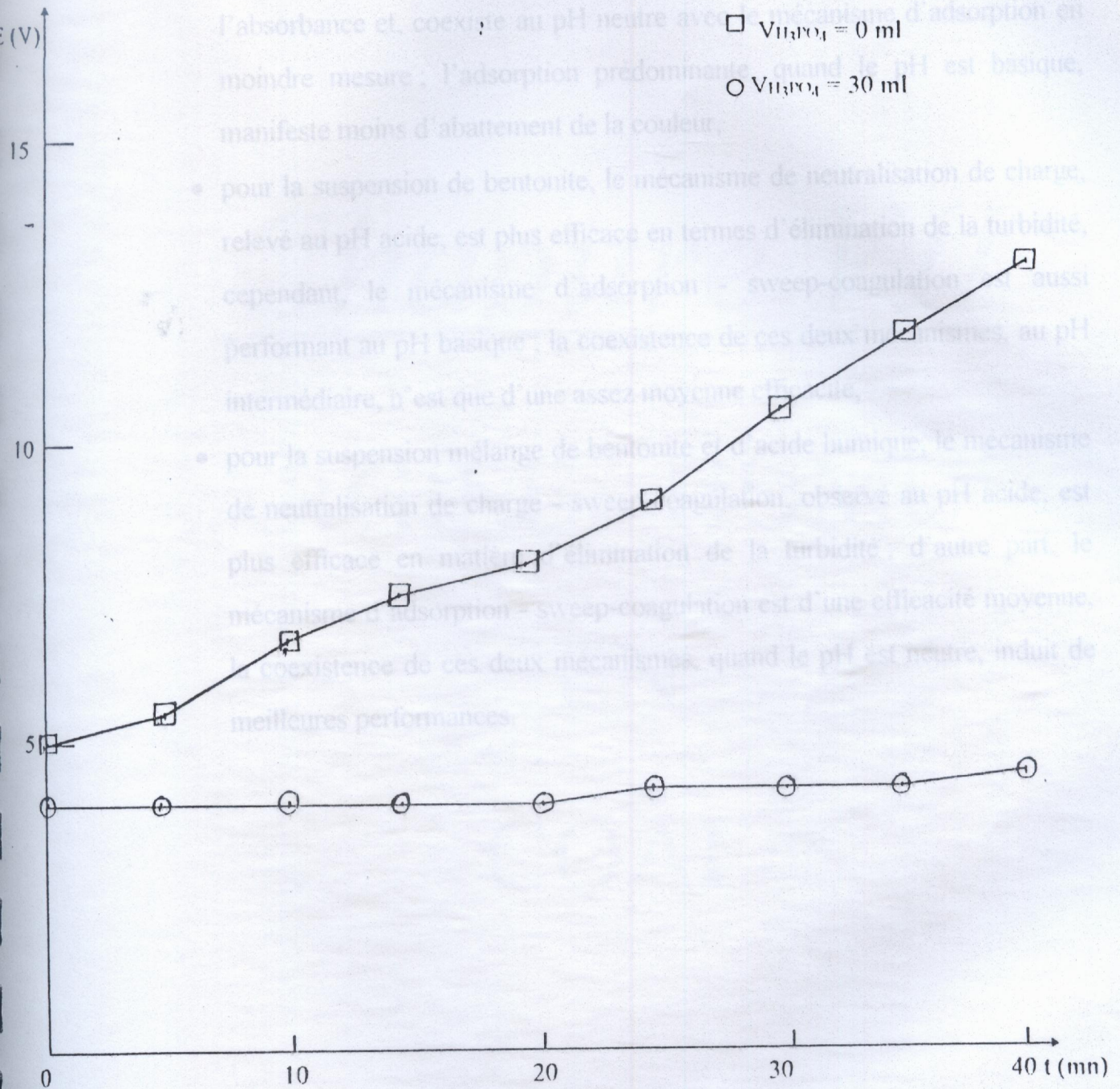


Figure VI.21 - Variation de la tension au cours du traitement pour l'influence de la conductivité de la suspension mélange de bentonite et d'acide humique.

- pour la solution d'acide humique, le mécanisme de neutralisation de charge, relevé au pH acide, est plus efficace en matière d'élimination de l'absorbance et, coexiste au pH neutre avec le mécanisme d'adsorption en moindre mesure ; l'adsorption prédominante, quand le pH est basique, manifeste moins d'abattement de la couleur,
- pour la suspension de bentonite, le mécanisme de neutralisation de charge, relevé au pH acide, est plus efficace en termes d'élimination de la turbidité, cependant, le mécanisme d'adsorption - sweep-coagulation est aussi performant au pH basique ; la coexistence de ces deux mécanismes, au pH intermédiaire, n'est que d'une assez moyenne efficacité,
- pour la suspension mélange de bentonite et d'acide humique, le mécanisme de neutralisation de charge - sweep-coagulation, observé au pH acide, est plus efficace en matière d'élimination de la turbidité ; d'autre part, le mécanisme d'adsorption - sweep-coagulation est d'une efficacité moyenne, la coexistence de ces deux mécanismes, quand le pH est neutre, induit de meilleures performances.

VIII INTRODUCTION

Pour aller davantage au fond de l'argile, de l'humus, et de l'argile-humus, à la lumière des résultats obtenus, en insistant sur un certain nombre de points clés, est l'objectif de cette analyse.

VIII.2 CHARGE À NEUTRALISER

Chapitre VII

ARGILE - HUMUS

EN

COAF

VII.1 INTRODUCTION

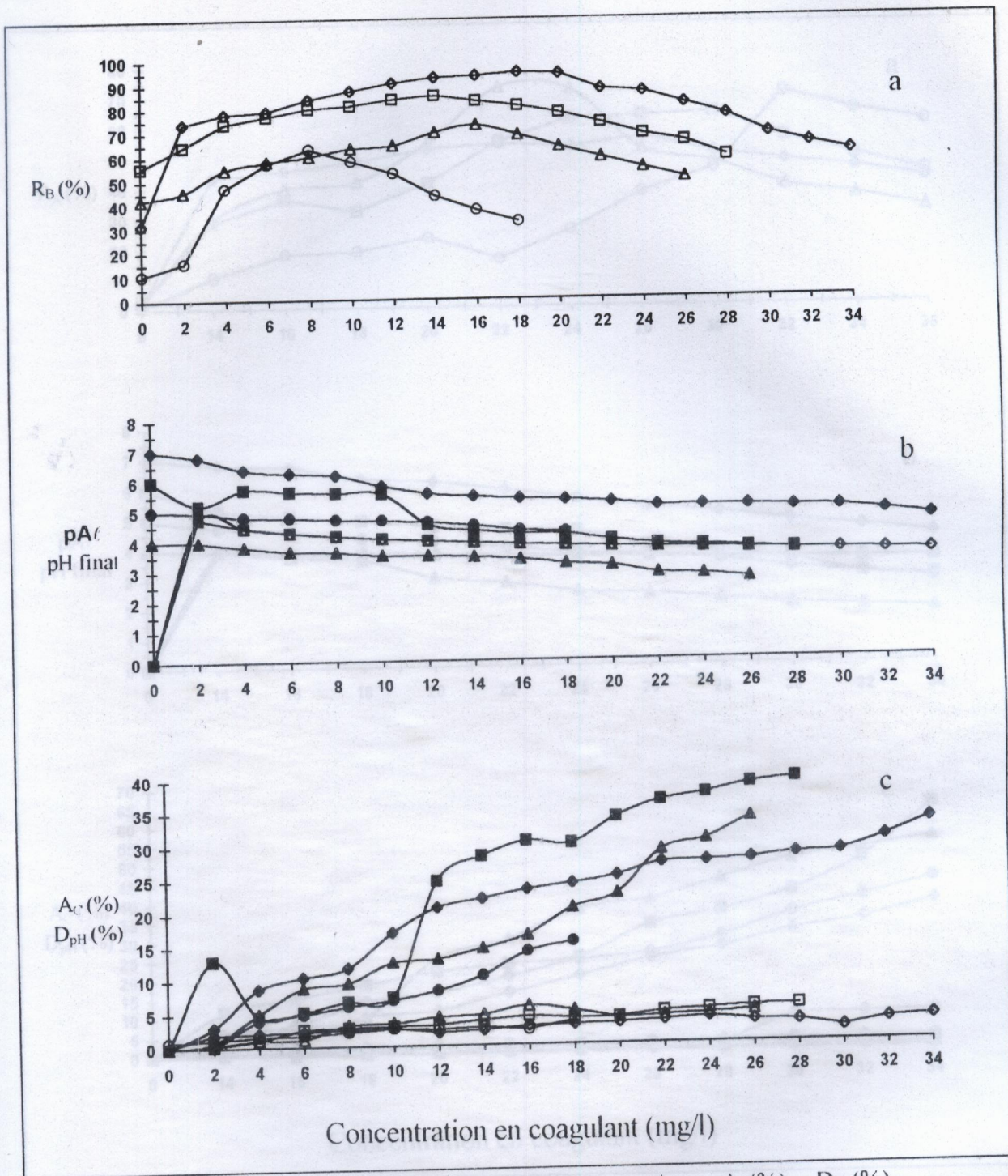
Eclairer davantage la coaf de l'argile, de l'humus, et de l'argile - humus, à la lumière des résultats obtenus. en insistant sur un certain nombre de points clés, est l'objectif de cette analyse.

VII.2 CHARGE A NEUTRALISER

Déstabiliser des particules colloïdales, cas de la bentonite, coaguler des macromolécules subcolloïdales, cas de l'acide humique, et coafér le système colloïde - polyélectrolytes, cas de l'argile - humus, revenait, ainsi donc, en premier lieu, à neutraliser la charge, en fonction du pH, du colloïde, d'une certaine manière, et du subfloc, d'une toute autre ; pour cette raison, parler en matière de charge, pour le système à traiter et pour le réactif, plutôt qu'en termes de concentrations, pour le premier et pour le second, semble plus approprié. Réellement, nos résultats de la coaf sur jar test (Annexe), épaulés par ceux de l'électrolyseur, ont confirmé l'équivalence charge à neutraliser - charge neutralisante :

cette charge neutralisante, composée de protons, H^+ , et de cations métalliques trivalents, Al^{3+} , injectés en solution en tant que réactifs, présente les particularités suivantes :

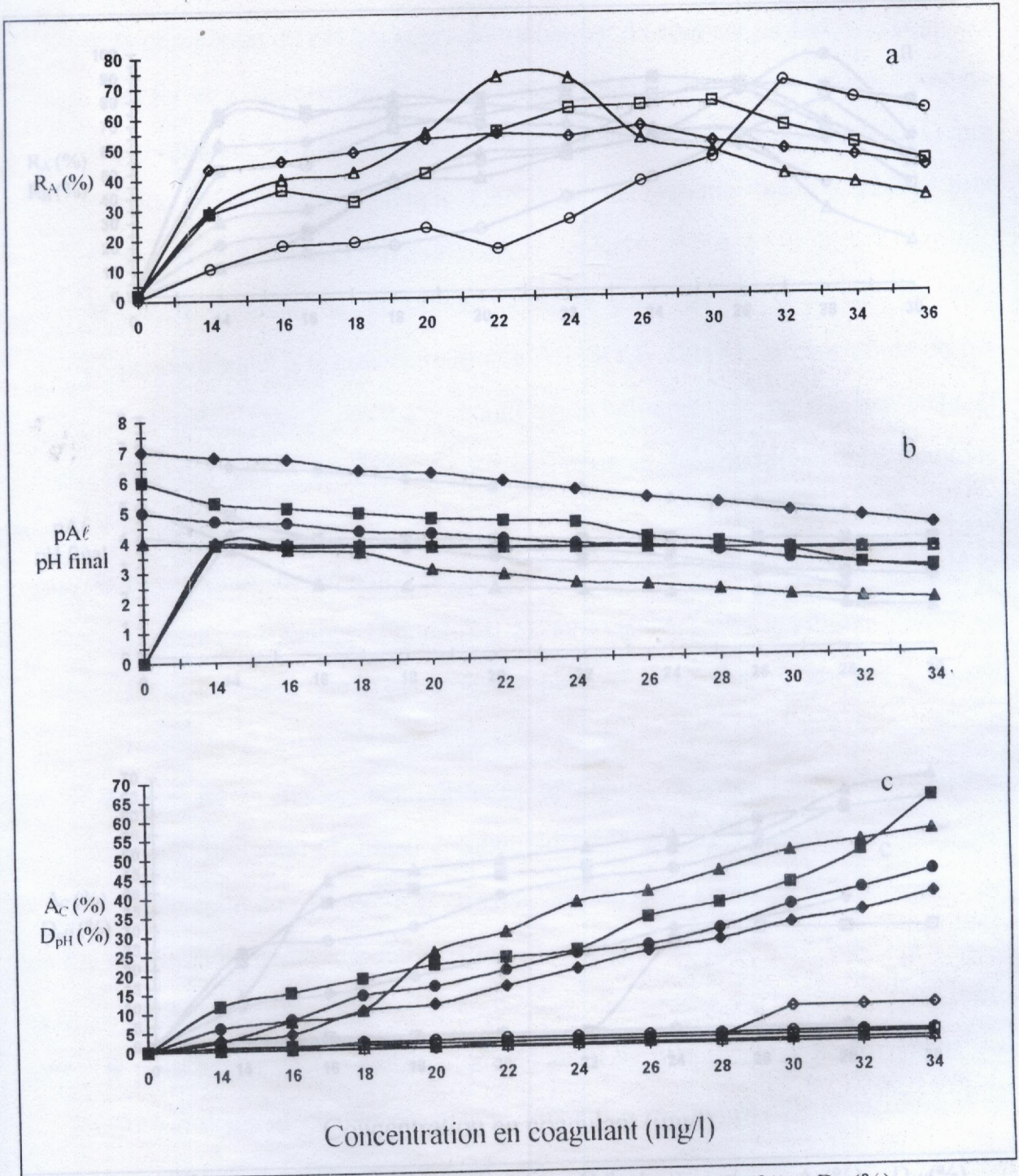
- les protons et les cations, au voisinage de l'optimum, semblent avoir la même contribution, en termes d'équivalents - grammes (pH final et pA/), à la neutralisation (Figures VII.1-3) des colloïdes minéraux, l'écart entre pH final et pA/ y est inférieur ou égal à 0.6, des macromolécules organiques, l'écart n'excède pas 0.9, et des colloïdes-macromolécules, l'écart ne dépasse pas 1.8, au pH acide : au pH neutre, par contre, l'écart entre pH final et pA/ se creuse pour atteindre 1.52, cas de la bentonite, 1.64, pour l'acide humique, et 2 pour le système argilo-humique,



Clé :

a/	R_B (%)	b/	pAl	pH final	c/	A_c (%)	D_{pH} (%)
$pH = 4$	△	$pH = 4$	△	▲	$pH = 4$	△	▲
$pH = 5$	○	$pH = 5$	○	●	$pH = 5$	○	●
$pH = 6$	□	$pH = 6$	□	■	$pH = 6$	□	■
$pH = 7$	◇	$pH = 7$	◇	◆	$pH = 7$	◇	◆

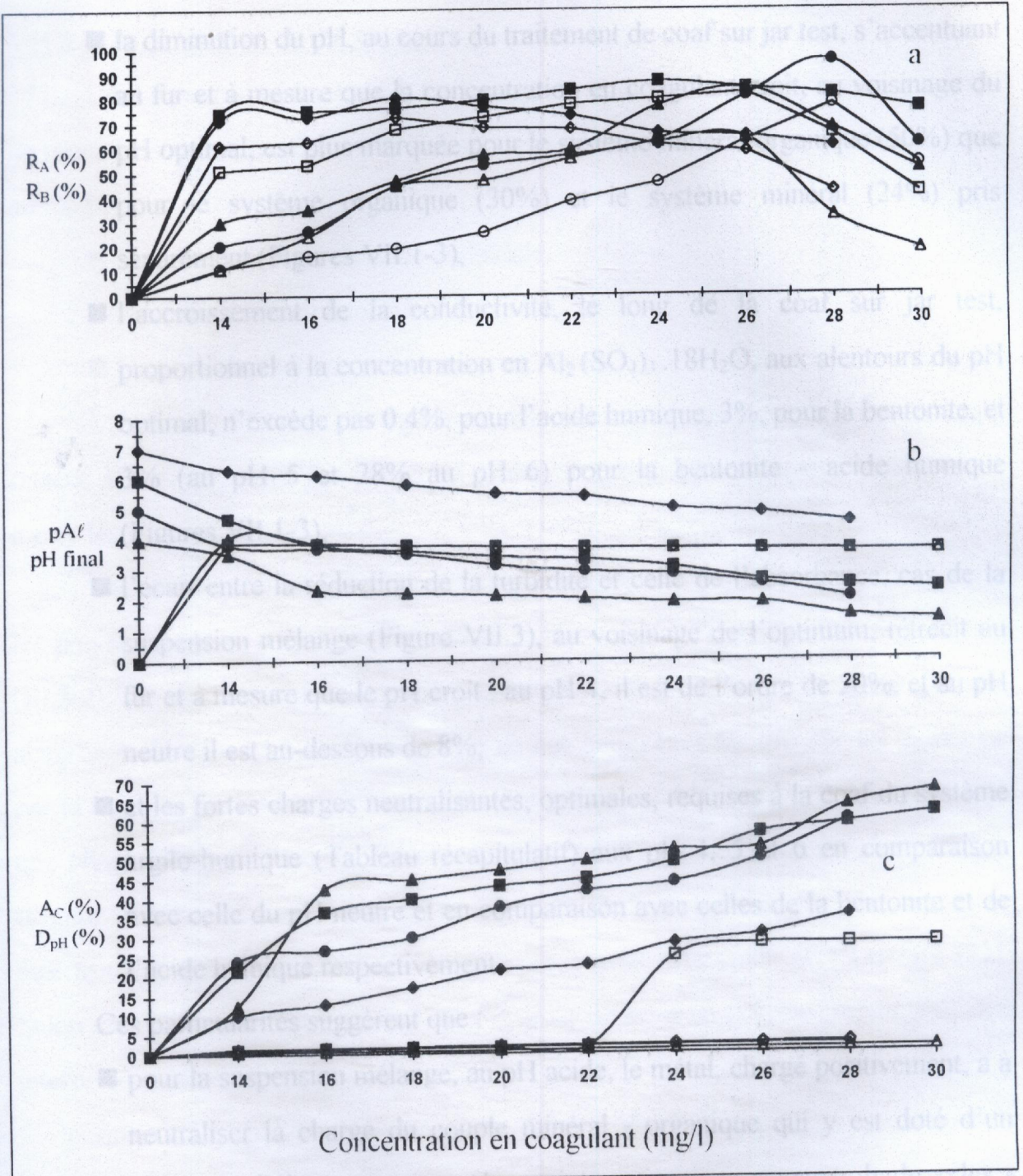
Figure VII.1- Evolution en fonction de la concentration en $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ et en fonction du pH, pour la suspension de bentonite sur jar test, de : R_B (%) (a), pAl et pH final (b), et A_c (%) et D_{pH} (%) (c).



Clé :

a/ R_A (%)	b/ pAl	pH final	c/ A_C (%)	D_{pH} (%)
pH = 4 \triangle	pH = 4 \triangle	\blacktriangle	pH = 4 \triangle	\blacktriangle
pH = 5 \circ	pH = 5 \circ	\bullet	pH = 5 \circ	\bullet
pH = 6 \square	pH = 6 \square	\blacksquare	pH = 6 \square	\blacksquare
pH = 7 \diamond	pH = 7 \diamond	\blacklozenge	pH = 7 \diamond	\blacklozenge

Figure VII.2- Evolution en fonction de la concentration en $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ et en fonction du pH, pour la solution d'acide humique sur jar test, de : R_A (%) (a), pAl et pH final (b), et A_C (%) et D_{pH} (%) (c).



Clé :

a/	R_A (%)	R_B (%)	b/	pAl	pH final	c/	A_C (%)	D_{pH} (%)
pH = 4	△	▲	pH = 4	△	▲	pH = 4	△	▲
pH = 5	○	●	pH = 5	○	●	pH = 5	○	●
pH = 6	□	■	pH = 6	□	■	pH = 6	□	■
pH = 7	◇	◆	pH = 7	◇	◆	pH = 7	◇	◆

Figure VII.3- Evolution en fonction de la concentration en $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ et en fonction du pH, pour la suspension mélange sur jar test, de : R_A (%) et R_B (%) (a), pAl et pH final (b), et A_C (%) et D_{pH} (%) (c).

VII.3 ■ la diminution du pH, au cours du traitement de coaf sur jar test, s'accroissant au fur et à mesure que la concentration en coagulant croît, au voisinage du pH optimal, est plus marquée pour le système minéral-organique (50%) que pour le système organique (30%) et le système minéral (24%) pris séparément (Figures VII.1-3),

■ l'accroissement de la conductivité, le long de la coaf sur jar test, proportionnel à la concentration en $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, aux alentours du pH optimal, n'excède pas 0.4%, pour l'acide humique, 3%, pour la bentonite, et 3% (au pH 5 et 28% au pH 6) pour la bentonite - acide humique (Figures VII.1-3),

■ l'écart entre la réduction de la turbidité et celle de l'absorbance, cas de la suspension mélange (Figure VII.3), au voisinage de l'optimum, rétrécit au fur et à mesure que le pH croît : au pH 4, il est de l'ordre de 20%, et au pH neutre il est au-dessous de 8%,

■ et les fortes charges neutralisantes, optimales, requises à la coaf du système argilo-humique (Tableau récapitulatif) aux pH 4, 5 et 6 en comparaison avec celle du pH neutre et en comparaison avec celles de la bentonite et de l'acide humique respectivement.

Ces particularités suggèrent que :

■ pour la suspension mélange, au pH acide, le métal, chargé positivement, a à neutraliser la charge du couple minéral - organique qui y est doté d'un « surplus d'électrons » imputé aux interactions groupements hydroxyles - groupements carboxyliques et phénoliques ; au pH neutre, le métal, cependant, sous forme d'hydroxyde métallique solide, fait décanter, lors de sa sédimentation, plusieurs particules colloïdales entourées de polyélectrolytes humiques, et n'a pas à s'adresser aux groupements, un par un au cas extrême, pour les neutraliser.

VII.3 MECANISME A RETENIR

Quel mécanisme à retenir ? La théorie de la double couche électrique a tenté de répondre à cette question en se basant, pour commencer, sur des hypothèses entre autres [41] :

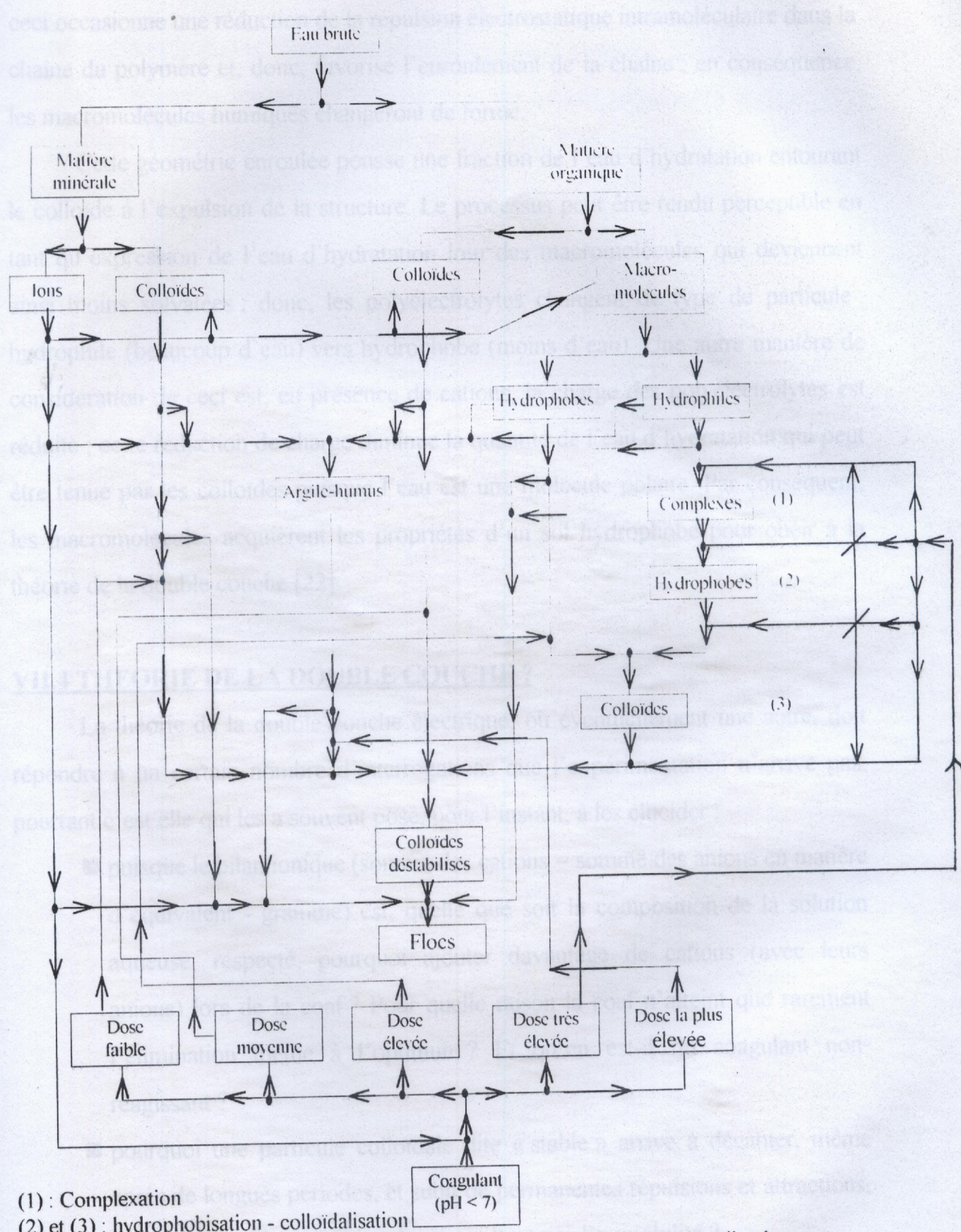
- les particules sont de taille colloïdale,
- les colloïdes sont hydrophobes,
- les colloïdes sont de même nature [22,41].

Même si la théorie de la double couche électrique a proposé des réponses, qui restent à discuter, pour les particules colloïdales hydrophobes, reste incapable de traiter les hydrophiles.

Une autre question concerne le passage hydrophile - hydrophobe emprunté par les polyélectrolytes, puisque la formation de floccs en a été observée ; précédemment (III.5.2), la formation de complexes humiques - métalliques, espèces à pouvoir absorbant élevé, suivie par l'adsorption de ces complexes les uns sur les autres ou par la réaction de ces complexes métal - humates avec Al^{3+} (ou Fe^{3+}) pour aboutir à une phase solide (colloïdes), a été présentée comme un lien entre les deux bornes (Figure VII.4). Une explication, plus pénétrante, de cette transmission de phase peut être trouvée dans la théorie développée par **FUOSS**, **STRAUSS**, et **CATHERS** [22]. Selon cette théorie (effet Fuoss), l'effet d'ajout de sel à un polyélectrolyte peut être interprété comme suit :

quand les polyélectrolytes sont dissous dans l'eau, leurs groupements fonctionnels, carboxyliques et hydroxyliques, deviennent plus ou moins dissociés ; comme une conséquence de ceci, une répulsion mutuelle des groupements fonctionnels négatifs a lieu et le polyélectrolyte prendra une configuration prolongée. Par addition de coagulant, ce comportement est radicalement modifié :

les cations seront attirés vers les groupes négatifs, la fixation des cations sur les groupes ionisés peut être électrodynamique - statique ou par réaction chimique,



(1) : Complexation
 (2) et (3) : hydrophobisation - colloïdalisations

Figure VII.4 - Circuit ionique de la coaf de l'argile, de l'humus, et de l'argile - humus (présenté en organigramme simplifié par EDZWALD [15]).

ceci occasionne une réduction de la répulsion électrostatique intramoléculaire dans la chaîne du polymère et, donc, favorise l'enroulement de la chaîne ; en conséquence, les macromolécules humiques changeront de forme.

Cette géométrie enroulée pousse une fraction de l'eau d'hydratation entourant le colloïde à l'expulsion de la structure. Le processus peut être rendu perceptible en tant qu'expression de l'eau d'hydratation loin des macromolécules qui deviennent ainsi moins solvatées ; donc, les polyélectrolytes changent de type de particule : hydrophile (beaucoup d'eau) vers hydrophobe (moins d'eau). Une autre manière de considération de ceci est, en présence de cations, la charge des polyélectrolytes est réduite ; cette réduction de charge diminue la quantité de l'eau d'hydratation qui peut être tenue par les colloïdes puisque l'eau est une molécule polaire. Par conséquent, les macromolécules acquièrent les propriétés d'un sol hydrophobe pour obéir à la théorie de la double couche [22].

VII.4 THEORIE DE LA DOUBLE COUCHE ?

La théorie de la double couche électrique, ou éventuellement une autre, doit répondre à un certain nombre d'interrogations que l'expérimentation n'arrive pas, pourtant c'est elle qui les a souvent posé, pour l'instant, à les élucider :

- puisque le bilan ionique (somme des cations = somme des anions en matière d'équivalent - gramme) est, quelle que soit la composition de la solution aqueuse, respecté, pourquoi ajouter davantage de cations (avec leurs anions) lors de la coaf ? Pour quelle raison la coaf n'atteint que rarement l'élimination même à l'optimum ? Et qu'en est-il du coagulant non-réagissant ?
- pourquoi une particule colloïdale dite « stable » arrive à décanter, même après de longues périodes, et subit de permanentes répulsions et attractions, à cause de sa charge, qui ne lui permettent pas l'immobilité ?

- pourquoi la couche fixe, contenant des charges positives, n'attire pas pour elle les anions injectés en solution avec les cations métalliques et autorise d'autres charges positives, malgré la répulsion, à se diriger vers les charges négatives portées par le colloïde [14] ?

Tableau

Récapitulatif

Solution d'acide benzoïque à 15 mg/l	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	22	30	30	24
	R_0 (%)	72,7	70,8	64	56,3
Suspension de benzoate à 20 mg/l (IPNTL)	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	16	8	14	18
	R_0 (%)	72,6	65,1	83,2	72,7
Suspension mixte benzoate à 40 mg/l acide benzoïque à 15 mg/l	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	15	26	26	18
	R_0 (%)	92,5	91,9	82,3	79
Solution d'acide benzoïque à 150 mg/l $I = 70 mA$ $t = 40$ minutes	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	22	22	22	20
	R_0 (%)	72,7	72,7	72,7	70
Suspension de benzoate à 10 mg/l	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	16	16	16	16
	R_0 (%)	72,6	72,6	72,6	72,6
Solution d'acide benzoïque à 15 mg/l $I = 30 mA$ $t = 40$ minutes	pH	4	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	22	22	22	22
	R_0 (%)	72,7	72,7	72,7	72,7
Solution d'acide benzoïque $I = 70 mA$ $t = 40$ minutes	C_0 (mg/l)	5	10	150	200
	R_0 (%)	17,54	66,7	24	28,3
Solution d'acide benzoïque $C_0 = 150$ mg/l, pH = 4 $I = 40$ minutes	I (mA)	30	30	100	100
	R_0 (%)	61,1	74	82,3	82,3
Suspension de benzoate $I = 60 mA$, $t = 40$ minutes pH = 5	C_0 (mg/l)	5	10	15	20
	R_0 (%)	11,67	67,1	81,5	90,84
Suspension de benzoate $C_0 = 15$ mg/l, pH = 3 $I = 6 mA$	Volume ajouté de H_2PO_4 (ml)	0	0	0	30
	R_0 (%)	—	—	84,5	92,17
Suspension mixte benzoate-acide benzoïque $C_0 = C_0' = 15$ mg/l, pH = 3, $I = 30 mA$	Volume ajouté de H_2PO_4 (ml)	0	0	0	20
	R_0 (%)	—	—	91,9	95,37

Tableau récapitulatif des résultats optimaux.

Solution d'acide humique à 15 mg/l	pH	<u>4</u>	5	6	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	<u>22</u>	30	30	24
	R_A (%)	<u>72.7</u>	70.5	64	56.3
Suspension de bentonite à 20 mg/l (10NTU)	pH	4	5	6	<u>7</u>
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	16	8	14	<u>18</u>
	R_B (%)	72.6	63.1	85.2	<u>94.7</u>
Suspension mélange (bentonite à 10NTU et acide humique à 15 mg/l)	pH	4	<u>5</u>	<u>6</u>	7
	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (mg/l)	25	<u>26</u>	<u>26</u>	18
	R_B (%)	84.5	<u>95.5</u>	<u>93.6</u>	90.9
	R_A (%)	64.1	<u>77.8</u>	<u>82.5</u>	73
Solution d'acide humique à 150 mg/l : I = 70 mA t = 40 minutes	pH	<u>3</u>	7	12	
	R_A (%)	<u>74</u>	47.24	11.46	
Suspension de bentonite à 15 mg/l : I = 6 mA t = 40 minutes	pH	<u>3</u>	7	12	
	R_B (%)	<u>84.5</u>	44.4	8.42	
Suspension mélange (bentonite à 15 mg/l et acide humique à 15 mg/l) : I = 200 mA t = 40 minutes	pH	<u>3</u>	7	12	
	R_B (%)	<u>94.9</u>	79.35	53.91	
Solution d'acide humique : I = 70 mA t = 40 minutes	C_A (mg/l)	5	10	150	<u>200</u>
	R_A (%)	47.54	66.7	74	<u>98.4</u>
Solution d'acide humique : $C_A = 150$ mg/l, pH = 3 t = 40 minutes	I (mA)	30	70		<u>100</u>
	R_A (%)	64.1	74		<u>92</u>
Suspension de bentonite : I = 6 mA, t = 40 minutes, pH = 3	C_B (mg/l)	5	10	15	<u>20</u>
	R_B (%)	11.67	67.1	84.5	<u>90.84</u>
Suspension de bentonite : $C_B = 15$ mg/l, pH = 3, I = 6 mA	Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)			0	<u>30</u>
	R_B (%)			84.5	<u>92.37</u>
Suspension mélange bentonite acide humique : $C_A = C_B = 15$ mg/l, pH = 3, I = 200 mA	Volume ajouté de H_3PO_4 (ml)			0	<u>30</u>
	R_B (%)			94.9	<u>95.37</u>

Tableau récapitulatif des résultats optimaux.

CONCLUSION

L'étude de la coat sur jar test et sur électrolyseur, des différentes solutions et suspensions, organiques et minérales, a permis de mettre en évidence ce qui suit :

- le mécanisme de neutralisation de charge a été montré, au pH acide, le plus performant dans la réduction de l'acide humique sur jar test et sur électrolyseur, et de la bentonite sur électrolyseur.
- le mécanisme de sweep-coagulation a été affiché le plus efficace dans la réduction de la bentonite, sur jar test, au pH neutre. Il l'est également, lors de la réduction de la turbidité et de l'absorbance de la suspension minérale bentonite - acide humique, en coexistence, au pH acide, sur électrolyseur.

CONCLUSION

charge, tandis que la bentonite - acide humique l'était par neutralisation de charge - sweep-coagulation sur électrolyseur, et par sweep-coagulation sur jar test.

- au pH acide, la bentonite sur jar test agit dans une moindre mesure relative par sweep-coagulation.
- au pH basique, la bentonite - acide humique sur électrolyseur, est mieux réduite par sweep-coagulation - adsorption.
- il est primordial que la charge soit neutralisée avant cet ordre décroissant de priorité : acide humique - bentonite - bentonite - acide humique.
- le pH par ses volets, acide et basique, a rassemblé l'ensemble des tâches à accomplir :
- participer avec les caucats, métalliques, à la neutralisation de charge au pH < 4,
- concourir en même temps que les autres à l'hydroxylation du métal qui donnerait naissance à...

CONCLUSION

L'étude de la coaf, sur jar test et sur électrolyseur, des différentes solutions et suspensions, organiques et minérales, a permis de mettre en évidence ce qui suit :

- le mécanisme de neutralisation de charge a été montré, au pH acide, le plus performant dans la réduction de l'acide humique, sur jar test et sur électrolyseur, et de la bentonite sur électrolyseur,
- le mécanisme de sweep-coagulation a été affiché le plus efficace dans la réduction de la bentonite, sur jar test, au pH neutre, il l'est également, lors de la réduction de la turbidité et de l'absorbance de la suspension mélange bentonite - acide humique, en coexistence, au pH acide, avec l'adsorption, sur jar test, et avec la neutralisation sur électrolyseur,
- au pH acide, l'acide humique, sur jar test et sur électrolyseur, et la bentonite, sur électrolyseur, étaient mieux réduits, par neutralisation de charge, tandis que la bentonite - acide humique l'était, par neutralisation de charge - sweep-coagulation, sur électrolyseur, et par sweep-coagulation - adsorption sur jar test,
- au pH neutre, la bentonite, sur jar test, était d'une manière meilleure réduite par sweep-coagulation,
- au pH basique, la bentonite - acide humique, sur électrolyseur, était mieux réduite par sweep-coagulation - adsorption,
- il est primordial que la charge soit neutralisée suivant cet ordre décroissant de priorité : acide humique, bentonite, bentonite - acide humique,
- le pH par ses volets, acide et basique, a essentiellement deux tâches à accomplir :
 - participer avec les cations, métalliques, à la neutralisation de charge, au $\text{pH} \leq 4$,
 - concourir en même temps que les anions à l'hydroxylation du métal qui donnerait naissance à :

- la neutralisation de charge suivie d'adsorption ou sweep-coagulation, au pH compris entre 4 et 7,
- la neutralisation de charge en compétition avec l'adsorption ou sweep-coagulation, au pH neutre,
- l'adsorption ou sweep-coagulation au pH basique ; la diminution du pH lors de la coaf est attribuée, a posteriori, à des réactions de substitutions ou échange ionique, entre métal trivalent et protons du système à déstabiliser au $\text{pH} \leq 4$, et à l'hydroxylation aux autres pH,
- le système colloïde - macromolécules est plus difficile à coafer, sur jar test, au pH acide qu'au pH neutre,
- l'eau du robinet, la solution d'acide humique, la suspension de bentonite, et la suspension mélange bentonite - acide humique acidulées affichent moins de résistance au passage du courant que celles à pH neutre et encore en moindre mesure que les basifiées respectivement,
- augmenter le flux de charges est accroître le transfert de charges, par suite, élever le nombre de macromolécules neutralisées,
- et l'électrolyse, employant des électrodes inertes, de la suspension de bentonite, au pH acide, est une technique de purification assez prometteuse,

En perspective, suite à cette étude électrophysico-chimique de solutions et suspensions synthétiques, des échantillons d'eau brute contenant argile et matière humique apporteront plus de connaissances sur les processus apparentés à la coaf, suite également à des essais préliminaires d'électroflottation des solutions et suspensions examinées, une recherche plus poussée devrait y être lancée.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale (µS/cm)	Res (%)
0	4,2	754	42,1
2	3,97	757	45,3
4	3,80	752	51,1
6	3,65	763	52,1
8	3,62	778	53,0
10	3,5	780	53,2
12	3,48	786	54,2
14	3,42	781	53,6
16	3,34	779	53,5
18	3,18	792	54,3
20	3,10	784	53,5
22	2,94	785	53,6
24	2,78	787	53,4
26	2,65	790	50,2

Tableau A.1 - Réduction de la turbidité en fonction de la dose de coagulant (complément du Tableau VI.2)
Paramètres initiaux: Turb = 0,5 NTU, Cond = 710 µS/cm

ANNEXE

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale (µS/cm)	Res (%)
0	5,11	716	10,5
2	4,95	718	11,3
4	4,8	721	12,6
6	4,76	722	13,2
8	4,72	723	13,7
10	4,66	726	14,0
12	4,57	727	14,5
14	4,48	729	14,9
16	4,40	730	15,4
18	4,23	735	15,9

Tableau A.2 - Réduction de la beatonicité en fonction de la dose de coagulant (complément du Tableau VI.2)
Paramètres initiaux: Turb = 0,5 NTU, Cond = 710 µS/cm

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_B (%)
0	4.2	754	42.1
2	3.97	757	45.3
4	3.80	762	54.7
6	3.65	763	57.9
8	3.62	778	60
10	3.5	780	63.2
12	3.48	786	64.2
14	3.42	781	69.6
16	3.34	798	72.6
18	3.18	792	68.4
20	3.10	784	63.5
22	2.84	785	58.9
24	2.78	787	54.4
26	2.65	790	50.2

Tableau A.1 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 4 (complément du Tableau VI.1).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU , Cond = 754 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_B (%)
0	5.11	716	10.5
2	4.98	718	15.8
4	4.8	721	46.8
6	4.76	722	57
8	4.70	725	63.1
10	4.66	728	57.9
12	4.59	727	52.6
14	4.48	729	43.3
16	4.30	726	37.3
18	4.23	735	32.3

Tableau A.2 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 5 (complément du Tableau VI.2).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU , Cond = 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_B (%)
0	6.2	611	55.6
2	5.22	613	64.2
4	5.73	618	73.7
6	5.69	628	76.8
8	5.60	629	80
10	5.56	630	81
12	4.52	631	83.6
<u>14</u>	<u>4.30</u>	<u>635</u>	<u>85.2</u>
16	4.17	638	82.8
18	4.19	636	80.7
20	3.96	630	77.6
22	3.81	641	73.4
24	3.75	643	68.4
26	3.66	645	65.4
28	3.62	646	58.9

Tableau A.3 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 6
(complément du Tableau VI.3).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU , Cond = 612 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_B (%)
0	6.97	611	31.6
2	6.79	622	73.7
4	6.39	623	77.8
6	6.27	624	78.9
8	6.18	625	83.8
10	5.81	626	87.4
12	5.55	622	90.5
14	5.46	624	92.6
16	5.37	627	93.4
<u>18</u>	<u>5.31</u>	<u>628</u>	<u>94.7</u>
20	5.23	629	93.9
22	5.10	631	87.6
24	5.09	633	86.3
26	5.07	630	81.2
28	5.02	629	76.4
30	5	623	68.4
32	4.86	630	64.2
34	4.67	632	60.9

Tableau A.4 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 7 (complément du Tableau VI.4).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU . Cond = 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	8.2	595	52.6
2	7.79	597	84.2
4	7.86	598	89.5
6	7.55	601	90.9
8	7.40	603	92.6
10	7.21	604	93.6
12	6.89	605	93.2
<u>14</u>	<u>6.74</u>	<u>607</u>	<u>94.2</u>
16	6.51	610	92.7
18	6.39	613	90.8
20	6.15	614	87.8
22	5.87	616	84.4
24	5.6	617	81
26	5.45	619	77.6

Tableau A.5 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 8 (complément du Tableau VI.5).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU , Cond = 610 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	9.88	557	80
2	9.71	558	90
4	9.64	559	90.6
6	9.55	561	91.6
8	9.42	562	92.3
<u>10</u>	<u>9.39</u>	<u>564</u>	<u>93.1</u>
12	9.20	565	91.6
14	8.93	555	90.6
16	8.75	569	90.4
18	8.50	572	87.8

Tableau A.6 - Réduction de la bentonite en fonction de la dose en alun à pH = 10 (complément du Tableau VI.6).

Paramètres initiaux : Turb = 9.5 NTU , Cond = 558 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	4.1	1250	1.8
14	3.9	1251	29.4
16	3.7	1252	39.7
18	3.6	1253	41.8
20	3	1253	54.5
22	2.8	1255	72.7
24	2.5	1257	72.1
26	2.4	1258	52.1
30	2.2	1257	47.6
32	2	1260	39.7
34	1.9	1261	36.4
36	1.8	1260	32.4

Tableau A.7 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à pH = 4 (complément du Tableau VI.8).

Paramètres initiaux : Abs = 0.330 , Cond = 1250 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	5.2	1275	0.5
15	4.7	1277	10.3
17	4.6	1279	17.8
18	4.3	1300	18.6
20	4.2	1301	23.2
22	4	1304	15.8
24	3.8	1305	25.5
26	3.7	1306	37.8
28	3.5	1307	45.5
30	3.2	1309	70.5
32	3	1309	64.6
34	2.78	1310	60.5

Tableau A.8 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à pH = 5 (complément du Tableau VI.9).

Paramètres initiaux : Abs = 0.349 , Cond = 1275 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	6.2	1202	1.87
14	5.3	1210	28.6
16	5.1	1212	36.3
18	4.9	1214	32.1
20	4.7	1215	41.3
22	4.6	1216	54.9
24	4.5	1218	62.2
26	4.0	1219	63.2
30	3.8	1221	64
32	3.5	1223	55.7
34	3.01	1225	49.8
36	2.89	1226	43.9

Tableau A.9 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à pH = 6 (complément du Tableau VI.10).

Paramètres initiaux : Abs = 0.39 , Cond = 1200 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R_B (%)
0	7.25	1099	1.8
12	6.8	1110	43.4
14	6.7	1112	45.8
16	6.3	1113	48.5
18	6.2	1100	52.7
20	5.9	1114	54.2
22	5.6	1117	53.0
24	5.3	1118	56.3
28	5.1	1119	51.0
30	4.8	1201	48.0
34	4.6	1203	45.6
35	4.3	1204	41.8

Tableau A.10 - Réduction de l'acide humique en fonction de la dose en alun à pH = 7 (complément du Tableau VI.11).

Paramètres initiaux : Abs = 0.332 , Cond = 1100 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_A (%)	R_B (%)
0	4.2	2050	0	0
10	3.5	2062	11	29.8
15	2.3	2063	24.3	35.1
18	2.2	2065	44.7	46.8
20	2.1	2068	46.9	57.2
22	2.01	2070	55.8	59.6
24	1.9	2071	62.4	77.2
25	1.88	2073	64.1	84.5
28	1.45	2075	32.0	68.1
30	1.3	2078	18.2	51.1

Tableau A.11 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 4 (complément du Tableau VI.13).

Paramètres initiaux : Turb = 4.7 NTU , Abs = 0.181 , Cond = 2050 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	R_A (%)	R_B (%)
0	5.2	1250	0	0
12	4.1	1260	11.1	20.4
14	3.8	1262	16.3	26.5
16	3.66	1265	19.3	44.9
18	3.5	1268	25.9	53.1
20	3.11	1271	28.5	75.1
22	2.9	1274	45.9	63.3
24	2.8	1275	63.0	81.2
26	2.5	1277	77.8	85.5
28	2.01	1279	53.3	61.2

Tableau A.12 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 5 (complément du Tableau VI.14).

Paramètres initiaux : Turb = 4.9 NTU , Abs = 0.135 , Cond = 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R _A (%)	R _B (%)
0	6.1	1600	0	0
14	4.7	1620	51.1	74.4
16	3.8	1624	53.3	75.5
18	3.6	1626	67.9	76.7
20	3.41	1627	73.0	79.8
22	3.30	1629	78.1	83.8
24	3.05	2000	80.3	87.3
26	2.6	2050	82.5	93.6
28	2.45	2051	65.7	81.9
30	2.3	2052	41.6	76.1

Tableau A.13 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 6 (complément du Tableau VI.15).

Paramètres initiaux : Turb = 5.2 NTU , Abs = 0.137 , Cond = 1600 $\mu\text{S/cm}$.

Dose du coagulant (mg/l)	pH final	Conductivité finale ($\mu\text{S/cm}$)	R _A (%)	R _B (%)
0	6.97	1401	0	0
14	6.3	1421	61.2	71.7
16	6.1	1422	62.9	72.8
18	5.8	1425	73	80.9
20	5.5	1428	68.5	77.2
22	5.4	1431	68.0	73.5
24	5.01	1432	61.2	66.3
26	4.86	1435	58.4	64.8
28	4.52	1438	42.1	60.6

Tableau A.14 - Réduction de la turbidité et de l'absorbance en fonction de la dose en alun à pH = 7 (complément du Tableau VI.16).

Paramètres initiaux : Turb = 4.6 NTU , Abs = 0.178 , Cond = 1400 $\mu\text{S/cm}$.

- [1] BEAUDRY, J-P. (1984)
« Traitement des eaux », Edition Le Griffon d'argile, Québec.
- [2] FIESSINGER, F. (1976)
« La coagulation : croissements anciens et connaissances nouvelles »,
T.S.M. L'EAU, Avril, 147-161.
- [3] AOUABED, A. (1991)
« Réduction de la turbidité d'une eau de surface, application à l'eau de barrage de Keddara », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de HOUARI BOUMEDDIENE, Alger.
- [4] EDDOUAOUDA, K. (1995)
« Étude comparative de l'influence de la floculation sur la performance de la filtration directe », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [5] IVES, K.J. (1984)
« Experiments in orthokinetic flocculation », chap. 15, Solid-Liquid Separation, Editor GREGORY, J. Published for the Soc. of Chem. Industry London Limited Publishers by ELLIS H., Chichester.
- [6] IVES, K.J. & AL. DIBOUNE, M. (1979)
« Orthokinetic flocculation », Eng. Science, V. 34, No. 1, 1-10.
- [7] GHERRA, M. (1991)
« Floculation des acides humiques par floculation en lit fluidisé », Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [8] CAMP, E.R., STEIN, P.C. (1943)
« The flocculation of water », Jour. Am. Water Works Association, V. 35, N. 1, 1-10.
- [9] « The coagulating behaviors of Fe (III) polymeric species - I. Formed polymers by base addition », Wat. Res., V. 21, N.1, 115-121.
- [10] AMIRVHARAJAN, A.; MILLS, K.M. (1982)
« Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation », Jour. Am. Water Works Association, V. 74, N. 4, 210-216.
- [11] DENTEL, S.K. (1987)
« Optimizing coagulant additions from laboratory and field test methods », Proceed. AWWA Seminar « Influence of coagulation on the selection, operation and performance of water treatment facilities », June.
- [12] FIESSINGER, F.; BERSILION, J.L. (1977)
« Précipitation de l'hydroxyde d'aluminium pour la coagulation des eaux », CEBEDEAU-BECEWA, N.399, Feb, 52-67.
- [13] VAN BENSCHOTEN, J.L.; EDZWALD, J.N. (1990)
« Chemical aspects of coagulation using aluminum salts - I. Hydrolytic reactions of alum and polyaluminum chloride », Wat. Res., V. 24, N.12, 1519-1526.
- [14] DENTEL, S.K. (1988)
« Application of the precipitation-charge neutralization model of coagulation », Env. Sci. and Tech., V. 22, N. 7, 825-832.
- [15] EDZWALD, J.N. (1992)
« Coagulation in drinking water treatment - particles, organics, and coagulants », Paper presented at the IAWQ - IWSA Joint Specialist Conference on Chem., Phys., Filtr., and Sedi., Geneva, Switzerland, 1-3 Sept., 4-15, for publication in Wat. Sci. Tech., V. 27, N. 11, 21-35, 1993.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BEAUDRY, J-P. (1984)**
« Traitement des eaux », Edition Le Griffon d'argile. Québec.
- [2] **FIESSINGER, F. (1976)**
« La coagulation : errements anciens et connaissances nouvelles »,
T.S.M. L'EAU, Avril, 147-161
- [3] **AOUABED, A. (1991)**
« Réduction de la turbidité d'une eau de surface, application à l'eau de barrage de Keddara », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de HOUARI BOUMEDDIENE, Alger.
- [4] **EDDOUAOUDA, K. (1995)**
« Etude comparative de l'influence de la floculation sur la performance de la filtration directe », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [5] **IVES, K.J. (1984)**
« Experiments in orthokinetic flocculation » ; chapt. 15 ; Solid-Liquid Separation, Editor GREGORY, J. ; Published for the Soc. of Chem. Industry ; London Limited Publishers by ELLIS, H. ; Clichester.
- [6] **IVES, K.J. ; AL DIBOUNI, M. (1979)**
« Orthokinetic flocculation of latex microspheres », Chemical Eng. Science, V. 34, 983-991.
- [7] **GHERNAOUT, D. (1993)**
« Elimination des acides humiques par floculation en lit fluidisé », Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [8] **CAMP, T.R. ; STEIN, P.C. (1943)**
« Velocity gradients and internal work in fluid motion », Jour. of the Boston Soc. of Civil Eng., V. XXX, N. 4, Oct., 219-237.
- [9] **TANG, H.X. ; STUMM, W. (1987)**
« The coagulating behaviors of Fe (III) polymeric species - I. Performed polymers by base addition », Wat. Res., V.21, N.1, 115-121.
- [10] **AMIRTHARAJAH, A. ; MILLS, K.M. (1982)**
« Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation », Jour. Am. Wat. Works association, V.74, N.4, 210-216.
- [11] **DENTEL, S.K. (1987)**
« Optimizing coagulant additions from laboratory and field test methods », Proceed. AWWA Seminar « Influence of coagulation on the selection, operation and performance of water treatment facilities », Juin.
- [12] **FIESSINGER, F. ; BERSILLON, J.L. (1977)**
« Prépolymérisation de l'hydroxyde d'aluminium pour la coagulation des eaux », CEBEDEAU - BECEWA, N.399, Fév, 52-67
- [13] **VAN BENSCHOTEN, J.E. ; EDZWALD, J.K. (1990)**
« Chemical aspects of coagulation using aluminum salts - I. Hydrolytic reactions of alum and polyaluminum chloride », Wat. Res., V.24, N.12, 1519-1526.
- [14] **DENTEL, S.K. (1988)**
« Application of the precipitation - charge neutralization model of coagulation », Env. Sci. and Tech., V.22, N.7, 825-832.
- [15] **EDZWALD, J.K. (1992)**
« Coagulation in drinking water treatment : particles, organics, and coagulants », Paper presented at the IAWQ - IWSA Joint Specialist Conference on Coag., Flocc., Filt., and Sedi., Geneva, Switzerland, 1-3 Sept., 1-15 ; for publication in Wat. Sci. Tech., V.27, N.11, 21-35, 1993.

- [16] **CHING - JEY, J.K. ; AMY, G.L. (1988)**
« Factors affecting coagulation with aluminium sulfate - II. Dissolved organic matter removal », *Wat. Res.*, V.22, N.7, 863-872.
- [17] **DENTEL, S.K. ; GOSSETT, J.M. (1987)**
« Coagulation of organic suspensions with aluminum salts », *Jour. Wat. Poll. Control Federation*, V.59, N.2, 101-108.
- [18] **DENTEL, S.K. ; GOSSETT, J.M. (1988)**
« Mechanisms of coagulation with aluminum salts », *Jour. AWWA*, V.80, N.4, 187-198.
- [19] **HUNDT, T.R. ; O'MELIA, C.R. (1988)**
« Aluminum-fulvic acid interactions : mechanisms and applications », *Jour. AWWA*, V.80, N.4, 176-186.
- [20] **SRICHAROENCHAIKIT, P. ; LETTERMAN, R.D. (1987)**
« Effect of Al (III) and sulfate ion on flocculation kinetics », *Jour. of Env. Eng.*, V.113, N.5, 1120-1138.
- [21] **TIPPING, E. ; WOOF, C. ; BACKES, C.A. ; OHNSTAD, M. (1988)**
« Aluminum speciation in acidic natural waters : testing of a model for Al-humic complexation », *Wat. Res.*, V.22, N.3, 321-326.
- [22] **LING ONG, H. ; BISQUE, R.E. (1968)**
« Coagulation of humic colloids by metal ions », *Soil Sci.*, V.106, N.3, 220-224.
- [23] **FETTIG, J. ; RATNAWEERA, H. (1992)**
« Influence of dissolved organic matter on coagulation / flocculation of wastewater by alum », Paper presented at the IAWQ - IWSA Joint Specialist Conference on Coag., Flocc., Filt., and Sedi., Geneva, Switzerland, 1-3 sept., 83-92.
- [24] **JIAQIAN, J. ; GRAHAM, N.J.D. (1992)**
« Removal of algae and trihalomethane precursors by coagulation », *Wat. Treat.*, 7, 155-168 (China Ocean Press - Print. in Beijing).
- [25] **BOURAS, O. (1992)**
« Synthèse et caractérisation des montmorillonites pontées à base de bentonites algériennes », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [26] **TARDY, Y. (1985)**
« Equilibres physicochimiques entre l'eau et les minéraux des argiles. Domaines de stabilité des argiles », Colloque - Bilan sur les interactions solide - liquide dans les milieux poreux, Nancy 6-10 Fév. 1984, Ed. Technip.
- [27] **AZZOUZ, A. (1994)**
« Physicochimie des tamis moléculaires », Ed. O.P.U., Alger.
- [28] **CAILLERE, S. ; HENIN, S. ; RAUTUREAU, M. (1982)**
« Minéralogie des argiles. Structure et propriétés physicochimiques », 2^{ème} éd., Masson, Paris.
- [29] **ACHOUR, S. (1992)**
« La chloration des eaux de surface et ses effets sur la formation de composés organohalogénés toxiques », Thèse de Magister, Ecol. Nat. Polytech. d'El-Harrach.
- [30] **DUCHAUFOR, P. (1983)**
« Pédologie, pédogénèse et classification », 2^{ème} édition, MASSON.
- [31] **NEWCOMBE, G. (1994)**
« Activated carbon and soluble humic substances : adsorption, desorption, and surface charge effects », *Jour. of Coll. and Int. Sci.*, 164, 452-462.
- [32] **LAROSE, J. (1982)**
« Le traitement des eaux humiques : procédés physico-chimiques et biologiques avec préozonation », Thèse de Doctorat, Montpellier.

- [33] **VAN BREEMEN, A.N. ; NIEUWSTAD, T.J. ; VAN DER MEENT-OLIEMAN, G.C. (1979)**
« The fate of fulvic acids during water treatment », *Wat. Res.*, V.13 , 771-779.
- [34] **BECKETT, R. ; JUE, Z. ; GIDDINGS, J.C. (1987)**
« Determination of molecular weight distributions of fulvic and humic acids using flow-field-flow fractionation », *Env. Sci. Tech.*, V.21 , N.3 , 289-295.
- [35] **GLASER, H.T. ; EDZWALD, J.K. (1979)**
« Coagulation and direct filtration of humic substances with polyethylemine », *Env. Sci. Tech.*, V.13 , N.3 , 299-305.
- [36] **THURMAN, E.M. ; WERSHAW, R.L. ; MALCOLM, R.L. ; PINCKNEY, D.J. (1982)**
« Molecular size of aquatic humic substances », *Org. Geochem.*, V.4 , 27-35.
- [37] **HANNA, J.V. ; JOHNSON, W.D. ; QUEZADA, R.A. ; WILSON, M.A. ; XLAO - QLAO, L. (1991)**
« Characterization of aqueous humic substances before and after chlorination », *Eng. Sci. Tech.*, V.25 , N.6 , 1160-1164.
- [38] **EDZWALD, J.K. ; BECKER, W.C. ; TAMBINI, S.J. (1987)**
« Organics, polymers, and performance in direct filtration », *Jour. of Enviro. Eng.*, V.113 , N.1 , 167-185.
- [39] **DUCHAUFOR, P. (1965)**
« Précis de pédologie », 2^{ème} édition, MASSON & C^{ie} Editeurs.
- [40] **EDWARDS, G.A. ; AMIR THARAJAH, A. (1985)**
« Removing color caused by humic acids », *Jour. AWWA*, V.77 , N.3 , 50-57.
- [41] **FILELLA, M. ; BUFFLE, J. ; LEPPARD, G.G. (1992)**
« Characterization of submicron colloids in freshwaters : evidence for their bridging by organic structures », Paper presented at the IAWQ - IWSA Joint Specialist Conference on Coag., Flocc., Filt., and Sedi., Geneva, Switzerland, 1-3 Sept., 71-82.
- [42] **MEGATELI, S. (1995)**
« Etude de la micro-ultrafiltration à travers une membrane minérale en (ZrO₂ - TiO₂) : application à une solution d'acide humique », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [43] **CHADIK, P.A. ; AMY, G.L. (1987)**
« Molecular weight effects on THM control by coagulation and adsorption », *Jour. of Enviro. Eng.*, V.113 , N.6 , 1234-1248.
- [44] **BEVERIDGE, A. ; PICKERING, W.F. (1980)**
« Influence of humate-solute interactions on aqueous heavy metal ion levels », *Wat., Air, and Soil Pollution*, 14 , 171-185.
- [45] **EDZWALD, J.K. ; HAFF, J.D. ; BOAK, J.W. (1977)**
« Polymer coagulation of humic acid waters », *Jour. of the Enviro. Eng. Division*, V.103 , N.EE6 , 989-1000.
- [46] **MARINSKY, J.A. ; EPHRAIM, J. (1986)**
« A unified physicochemical description of the protonation and metal ion complexation equilibria of natural organic acids (humic and fulvic acids).
1. Analysis of the influence of polyelectrolyte properties on protonation equilibria in ionic media : fundamental concepts », *Env. Sci. Tech.*, V.20 , N.4 , 349-354.
- [47] **EPHRAIM, J. ; ALEGRET, S. ; MATHUTHU, A. ; BICKING, M. ; MALCOLM, R.L. ; MARINSKY, J.A. (1986)**
« 2. Influence of polyelectrolyte properties and functional group heterogeneity on the protonation of fulvic acid », *Env. Sci. Tech.*, V.20 , N.4 , 354-366.

- [48] **EPHRAIM, J. ; MARINSKY, J.A. (1986)**
 « 3. Influence of polyelectrolyte properties and functional heterogeneity on the copper ion binding equilibria in an Armadale Horizons Bh fulvic acid sample », *Env. Sci. Tech.*, V.20 , N.4 , 367-376.
- [49] **PLANKEY, B.J. ; PATTERSON, H.H. (1987)**
 « Kinetics of aluminum - fulvic acid complexation in acidic waters », *Env. Sci. Tech.*, V.21 , N.6 , 595-601.
- [50] **SAINT-FORT, R. ; VISSER, S.A. (1988)**
 « Study of the interactions between atrazine, diazinon and lindane with humic acids of various molecular weights », *J. Environ. Sci. Health*, A23 (6) , 613-624.
- [51] **KARLSSON, S. ; HAKANSSON, K. ; ALLARD, B. (1987)**
 « Simultaneous dissolution of organic acids in sequential leaching of sediment bound trace metals », *J. Environ. Sci. Health*, A 22 (6) , 549-562.
- [52] **JOHNSEN, S. ; GRIBBESTAD, I.S. (1988)**
 « Influence of humic substances on the formation of chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons during chlorination of polycyclic aromatic hydrocarbon polluted water », *Env. Sci. Tech.*, V.22 , N.8 , 978-981.
- [53] **BIRANE, Z. (1995)**
 « Analyse des trihalométhanes des eaux polluées chlorées et contribution au traitement de leurs précurseurs », Thèse de Magister, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [54] **VAN BENSCHOTEN, J.E. ; EDZWALD, J.K. (1990)**
 « Chemical aspects of coagulation using aluminum salts - II. Coagulation of fulvic acid using alum and polyaluminum chloride », *Wat. Res.*, V.24 , N.12 , 1527-1535.
- [55] **MASTEN, S.J. (1991)**
 « Ozonation of volatile organic compounds in the presence of humic acid and soils », *Ozone Sci. and Eng.*, V.13 , N.3 , 287-312.
- [56] **CATHALIFAUD, G. ; WAIS MOSSA, M.T. ; MAZET, M. (1992)**
 « Preformed ferric hydroxide flocs as adsorbents of humic substances », Paper presented at the IAWQ-IWSA Joint Specialist Conference on Coag., Flocc., Filt., and Sedi., Geneva, Switzerland, 1-3 Sept., 35-40.
- [57] **LAGALY, G. (1987)**
 « Clay-organic interactions : problems and recent results », *Proceed. of the Int. Clay Conf.*, Denver, 1985. SHULTZ, L.G. ; VAN OLPHEN, H. ; MUMPTON, F.A. ; eds., *The Clay Minerals Soc.*, Bloomington, Indiana, 343-351.
- [58] **KARANFIL, T. ; SCHLAUTMAN, M.A. ; WEBER, W.J.Jr. (1994)**
 « Impacts of dissolved oxygen on the sorption of humic substances and the subsequent inhibition of o-cresol uptake by granular activated carbon », *Wat. Res.*, V.28 , N.7 , 1673-1678.
- [59] **LAFRANCE, P. ; VILLENEUVE, J.P. ; MAZET, M. ; AYELE, J. ; FABRE, B. (1991)**
 « Organic compounds adsorption onto activated carbon : the effect of association between dissolved humic substances and pesticides », *Environ. Pollution*, V.72 , N.4 , 331-344.
- [60] **MAZET, M. ; ANGBO, L. ; SERPAUD, B. (1990)**
 « Adsorption of humic acids onto preformed aluminum hydroxide flocs », *Wat. Res.*, V.24 , N.12 , 1509-1518.
- [61] **WEBER, W.J.Jr. ; SMITH, E.H. (1986)**
 « Removing dissolved organic contaminants from water », *Env. Sci. Tech.*, V.20 , N.10 , 970-979.

- [62] **STOCK MEYER, M.R. (1991)**
« Adsorption of organic compounds on organophilic bentonites », *Appl. Clay Sci.*, V.6 , 39-57.
- [63] **BAUDU, M. ; FARKHANI, B. ; AYELE, J. ; MAZET, M. (1993)**
« Study of the adsorption of organic compounds from aqueous solutions onto grafted and clays comparison with other adsorbent materials », *Env. Tech.*, V.14 , 247-256.
- [64] **ARVANITO YANNIS, I. ; ELEFThERIADIS, I. ; TSATSARONI, E. (1989)**
« Influence of pH on adsorption of dye-containing effluents with different bentonites », *Chemosphere*, V.18 , N.9/10 , 1707-1711.
- [65] **MALLEVIALLE, J. ; ANSELME, C. ; MARSIGNY, O. (1989)**
« Effects of humic substances on membrane processes », Reprin. From *Adv. in Chem. Series N° 219. Aquatic Humic Subs. : Influence on Fate and Treat of Pollutants*, N.4 , 749-767. SUFFET, I.H. ; MAC CARTHY, P., Eds. Cop. by the Am. Chem. Soc.
- [66] **BETTELEY, A. (1992)**
« Physical methods of liquid effluent treatment-separation processes. An outline of the role of the separation processes in effluent treatment including pros and cons of selected electrically-intensive techniques in comparison to gravity settlement », *Building Res. and Inf.*, V.20 , N.2 , 102-108.
- [67] **AKLOUK, M. ; TAOUALIT, N. (1994)**
« Réduction des acides humiques par coaf », Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [68] **BOUKHATEM, F. ; BOUTEMAK, L. (1993)**
« Elimination d'acide humique par coaf », Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [69] **GHERNAOUT, D. (1995)**
« Mélange axial », Exposé, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida.
- [70] **MILAZZO, G. (1969)**
« Electrochimie », Tomes 1 et 2 , Ed. Dunod, Paris.
- [71] **BERSET, C. ; JASKIEWICZ, H. ; TRAN MANH SUNG, G. ; SANDRET, F. (1979)**
« Méthodes électrolytiques d'épuration des eaux résiduaires. Elimination des surfactifs de synthèse », *La Trib. de CEBEDEAU*, N.424 , Mars, 79-88.
- [72] **CATONNE, J.C. (1992)**
« Application de l'électrochimie dans le traitement de surface des matériaux métalliques et le traitement des effluents industriels », *L'actualité Chimique*, Jan-Fév , 67-85.

162] STOCK MEYER, M.R. (1991) « Absorption of organic compounds on organophilic bentonites ». Appl. Clay Sci., V.6, 39-57

163] BAUDU, M.; TARKHANI, B.; AYELE, J.; MAXET, M. (1993) « Study of the adsorption of organic compounds from aqueous solutions onto treated and clays comparison with other adsorbent materials ». Env. Tech., V.14, 247-256

164] ARVANITO VANNIS, I.; ELEFTHERIADES, I.; TSAITARONI, E. (1989) « Influence of pH on adsorption of dye-containing effluents with different bentonites ». Atmosphere, V.18, N.010, 1307-1311

165] MAILLEVALLE, J.; ANSELME, C.; MARIGNY, O. (1989) « Effects of humic substances on membrane processes ». Repts. from Adv. in Chem. Series N° 219. Aquatic Humic Subs. Influence on Fate and Treat. of Pollutants, N° 4, 749-767. SUPP. I.H.; MAC CARTHY, B., Eds. Cop. by the Am. Chem. Soc.

166] BETTELÉV, A. (1992) « Physical methods of liquid effluent treatment-separation processes. An outline of the role of the separation processes in effluent treatment including pros and cons of selected electrically-intensive techniques in comparison to gravity settlement ». Building Res. and Inf., V.20, N.1, 1-10

167] AKIL, M.; JAOUH, Y. (1994) « Réaction des acides humiques ». Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida

168] BOUKHAT, L.; CHAK, L. (1993) « Elimination d'acide humique par coag ». Mémoire de Fin d'Etude, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida

169] GHERMAGUT, D. (1992) « Mélange eau ». Exposé, Institut de Chimie Industrielle, U.S.T. de Blida

170] MILVAZO, G. (1992) « Electrochimie », Tome 1 et 2, Ed. Dunod, Paris

171] BERSET, C.; JASLEWICZ, H.; TRAN MANH SUNG, G.; SANDRET, F. (1992) « Méthodes électrochimiques pour le traitement des effluents ». L'Année de la Chimie Industrielle, N° 88

172] CATONNE, J.C. (1987) « Application de l'électrolyse dans le traitement des effluents métalliques et le traitement des effluents ». Chimie Industrielle, Jan-Fév., 67-85



رقم الجرد 180/8
 رقم الاقتورة 1
 التاريخ: 1
 والأصل: chinnie.Tada