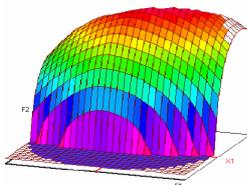


Année Universitaire : 2012-2013



Master Sciences et Techniques CAC Agiq
Chimiométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion industrielle
de la qualité

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Modélisation et optimisation du taux du sulfate
d'aluminium dans la station de traitement des eaux de
barrage BAB LOUTA par la méthodologie du plan
surface de réponse

Présenté par:

Mr. MACHKOR Mohammed

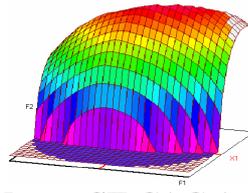
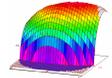
Encadré par:

- Mr. Mohamed SAAIDI ONEE -TAZA
- Pr. E. H EL GHADRAOUI FST FES

Soutenu Le 19 Juin 2013 devant le jury composé de:

- Pr. E.H EL GHADRAOUI
- Pr. O.SQALLI
- Pr. F.OUAZZANI CHAHDI

Stage effectué à : ONEE (Branche Eau) TAZA



Master ST CAC Agiq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: MACHKOR MOHAMMED

Année Universitaire : 2012/2013

Titre: Modélisation et optimisation du taux du sulfate d'aluminium dans la station de traitement des eaux de barrage BAB LOUTA par la méthodologie du plan surface de réponse

Résumé

La coagulation est l'une des étapes les plus importantes dans le traitement des eaux. La difficulté principale est de déterminer la dose optimale de coagulant à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute. Un mauvais contrôle de ce procédé peut entraîner une augmentation importante des coûts de fonctionnement et le non-respect des objectifs de qualité en sortie de la station de traitement. Le sulfate d'aluminium ($Al_2SO_4 \cdot 18H_2O$) est le réactif coagulant le plus généralement utilisé. La détermination de la dose de coagulant se fait au moyen de l'essai dit de « Jar Test » conduit en laboratoire. Ce type d'approche a le désavantage d'avoir un temps de retard relativement long et ne permet donc pas un contrôle automatique du procédé de coagulation.

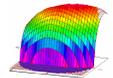
La présente étude décrit un modèle polynomial du second degré, développé pour la prédiction de la dose de coagulant utilisée lors de la phase de clarification dans la station de traitement des eaux de BAB LOUTA qui alimente la ville de TAZA en eau potable. Avec un coefficient de détermination (R^2) de l'ordre de 0,998, le modèle ainsi trouvé explique parfaitement le phénomène étudié. Les résultats obtenus de cette modélisation sont d'une grande importance pour la gestion de la station.

Mots clés: 5 mots au maximum

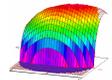
Modélisation, coagulation, sulfate d'aluminium, surface de réponse, station de traitement.

Sommaire

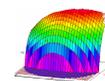
- INTRODUCTION GENERALE..... 7
- AVANT PROPOS..... 8



• Présentation de l'ONEE (Branche Eau) :	10
1- Historique :	10
2- Missions principales :	10
3- Directions régionales de L'ONEE (Branche Eau) :	10
4- Aperçu sur la station de traitement BAB LOUTA.....	11
CHAPITRE I :	13
PROCESSUS DE POTABILISATION DES EAUX DE BARRAGE BAB LOUTA	13
• Introduction	13
• TRAITEMENT DES EAUX DE BARRAGE BAB LOUTA.....	14
I. LE PRE-TRAITEMENT DE L'EAU BRUTE :	14
I.1 PRE-CHLORATION :	14
Principe d'action	14
I.2 DEBOURBAGE	14
II LE TRAITEMENT CLASSIQUE DE L'EAU BRUTE :	15
II.1 COAGULATION – FLOCCULATION :	15
II.1.1 La coagulation.....	15
II.1.1.1 Principaux caractéristiques de sulfate d'aluminium	16
II.1.1.2 Déstabilisation des colloïdes	16
Pour surmonter les forces répulsives, deux possibilités peuvent être théoriquement envisagées :	16
II.1.1.3 Les principaux facteurs influençant le processus de coagulation	18
La turbidité	18
La température.....	18
L'alcalinité.....	18
Le pH.....	18
Couleur liée à la matière organique.....	19
Les aspects mécaniques.....	19
II.1.2 La floculation.....	19
II.2 DECANTATION :	19
II.3 FILTRATION :	20
II.4 DESINFECTION :	20
III. LE TRAITEMENT DES BOUES :	21
• Conclusion	21
CHAPITRE II :	22
MODELISATION MATHEMATIQUE DU TAUX DU SULFATE D'ALUMINIUM.....	22



• Introduction	22
I. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	23
I.1 Préparation des solutions et conduite de l'essai Jar-test	24
I.1.1 Matériels utilisés.....	24
I.1.2 Solutions de coagulant	24
I.2 Essai de coagulation - floculation ' Jar -test '	24
I.3 Analyses physico-chimiques des paramètres influençant le phénomène étudié [2].....	25
I.3.1 La turbidité colloïdale	25
Définition.....	25
Principe.....	25
I.3.2 Le potentiel d'hydrogène	25
Principe.....	25
Mode opératoire	26
I.3.3 Détermination de l'alcalinité de l'eau	26
I.3.3.1 Titre Alcalimétrique (TA):	26
Principe.....	26
Mode opératoire	26
I.3.3.2 Titre Alcalimétrique complet (TAC) :.....	26
Principe.....	26
Mode opératoire	26
I.3.4 L'oxydabilité au permanganate de potassium :.....	27
Principe.....	27
Mode opératoire	27
II. RÉSULTATS ET DISCUSSION	28
II.1.1 Choix des paramètres	28
II.1.2 Caractéristiques du problème.....	29
Tableau 1 : Caractéristiques du problème.....	29
II.1.3 Domaine Expérimental	29
II.1.4 Réponse(s) expérimentale(s).....	29
II.1.5 Matrice d'expériences.....	29
II.1.6 Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	30
II.1.7 Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	30
II.1.8 Interprétation 1	31
II.2 Modélisation	31

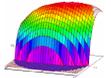


II.2.1 Présentation de la méthodologie adoptée.....	31
II.2.2 Justification du choix du modèle	32
II. 2.3 Domaine Expérimental	34
Tableau 7: Domaine expérimental	34
II .2.4 Réponse expérimentale.....	34
Tableau 8 : Réponse expérimentale	34
II .2.5 Matrice d'expériences.....	35
II. 2.6 Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	35
II. 2.7 Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	36
II .2.8 Tableau des résidus : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	37
II. 2.9 Interprétation 2.....	37
Conclusion générale.....	45
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	46
Annexe 1	48
Annexe 2.....	46

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire de la station de traitement des eaux de barrage BAB LOUTA sous la direction du Monsieur Mohamed SAAIDI chef de l'Agence Mixte TAZA-GUERCIF.

Il m'est particulièrement agréable, d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur Mohamed SAAIDI. Je peux, maintenant, lui dire quelle a été ma joie de préparer ce

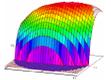


mémoire sous sa direction. Qu'il soit assuré de ma profonde gratitude, pour sa disponibilité tout au long de ce travail et de son attention inlassable et son soutien moral.

Je tiens à témoigner ici ma reconnaissance à mon encadrant Monsieur El houssine EL GHARDAOUI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de FES, de tous ses remarques, ses conseils et ses recommandations et qui me fait l'honneur de présider ce jury et en étant examinateur de ce mémoire. Je lui exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance pour tous ses conseils et son soutien.

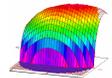
Je tiens à témoigner ici ma respectueuse reconnaissance à Monsieur Fouad OUAZZANI CHAHDI et Madame Ouafae SQALLI, Professeurs à la Faculté des Sciences et Techniques de FES pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et d'être des membres de jury.

Enfin, c'est avec beaucoup de plaisir qu'il m'est donné aujourd'hui d'exprimer ma vive reconnaissance à l'ensemble de mes professeurs, qui par leur gentillesse, leur modestie, leur aide, leur conseil et leur encouragement, ont fortement contribué à la réalisation de ce travail et particulièrement à Monsieur El Mostafa EL HADRAMI responsable du Master CAC Agiq qui n'a jamais cessé de déployer des efforts remarquables pour que notre formation soit aussi solide et fructueuse que possible.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :
Mes très chers parents,
Ma femme LAMYAE,
Mes 2 anges AYA et ALAE,
Mes frères et sœurs : « Souad, Fouad,
Rachid, Hind, Hakim et Salaheddine »,
Mohamed SAAIDI,
Tous mes professeurs, mes amis et collègues.



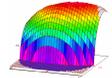
LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Mécanisme de la coagulation	10
Figure 2 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale (d'après Riddick).....	12
Figure 3 : Coupe transversale d'une lamelle	14
Figure 4 : Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs.....	28
Figure 5 : Variation du taux optimum de SA en fonction de la turbidité de l'eau brute.....	29
Figure 6 : Résidus =F (Y calculé).....	35
Figure 7 : Répartition des résidus sur la droite de Henry.....	35
Figure 8 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Turbidité colloïdale, Température en 2 D.....	36
Figure 9 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Température, TAC En2D.....	37
Figure 10 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : TAC, Turbidité colloïdale en 2D.....	38
Figure 11 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Turbidité colloïdale, Température en 3D.....	39
Figure 12 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Température, TAC en 3D.....	40
Figure 13 : Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : TAC, Turbidité colloïdale en 3D.....	41

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Variables prises en compte pour déterminer des algorithmes de contrôle du taux de traitement (GREGORY, 1981).....	3
Tableau 2 : Caractéristiques du problème	25
Tableau 3 : Domaine Expérimental.....	25
Tableau 4 : Réponse expérimentale.....	25
Tableau 5 : Matrice d'expériences.....	26
Tableau 6 : Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	26
Tableau 7 : Estimations et statistiques des coefficients.....	26
Tableau 8 : Domaine expérimental.....	31
Tableau 9 : Réponse expérimentale.....	31
Tableau 10 : Matrice d'expériences.....	31
Tableau 11 : Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	32
Tableau 12 : Estimations et statistiques des coefficients.....	33
Tableau 13 : Tableau des résidus : réponse Y1 : Taux du coagulant.....	33



Abréviations

ANOVA	: Analyse de Variance
A.M	: Agence Mixte
DR	: Direction Régionale
MES	: Matière En Suspension
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
ONEE	: Office National d'Électricité et de l'Eau Potable
ONEP	: Office National de l'Eau Potable
pH	: Potentiel Hydrogène
PRESS	: predicted residual sum of squares (Somme des carrées résiduelle prédite)
REIP	: Régie d'Exploitation Installation et Planification
REP	: Régie d'Exploitation et Planification
SA	: Sulfate d'Aluminium
T	: Température
TA	: Titre Alcalimétrique
TAC	: Titre Alcalimétrique Complet
Tb	: Tombée de burette
TC	: Turbidité Colloïdale





INTRODUCTION GENERALE

Dans la majorité des stations de traitement d'eau destinée à la consommation, le jar-test reste l'outil le plus utilisé pour déterminer le taux optimum de coagulant. Cependant lorsque la qualité de l'eau brute se modifie rapidement, l'inertie de cette technique peut provoquer soit une détérioration de la qualité de l'eau produite soit une augmentation exagérée du taux de traitement aussi bien que le temps nécessaire à l'essai de jar-test qui reste relativement long.

Pour pallier ces inconvénients, nous avons mis en œuvre un modèle mathématique du taux du sulfate d'aluminium qui doit conduire à l'automatisation de l'étape de clarification de la station de traitement des eaux du barrage BAB LOUTA.

Les eaux de surface ne sont pratiquement jamais potables sans aucun traitement du fait des divers substances d'origine naturelle ou apportées par la pollution. Pour améliorer leur qualité (potabilité), elles nécessitent des traitements appropriés c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques ou biologiques, dans une chaîne de traitement classique .

Au cours du 1er chapitre, nous allons décrire donc successivement les différentes phases de traitement des eaux de barrage BAB LOUTA constituant ainsi leur processus de potabilisation.

La majeure partie de la clarification de l'eau se fait au niveau de l'étape coagulation - floculation, ce qui constitue un traitement fondamental pour une eau destinée à la consommation. De plus cette étape est critique et elle dépend de plusieurs facteurs.

Dans le 2ème chapitre, nous allons aborder le vif de notre étude dont l'objectif est de modéliser le taux de sulfate d'aluminium en fonction des facteurs étudiés. Cette modélisation s'appuie sur la méthodologie du plan surface de réponse en utilisant le plan de BOX-BENKHEN.

Au Maroc, les études sont quasiment rares dans ce domaine de recherche. Nous avons pour notre part, procédé à la collecte systématique de données relatives au traitement d'eaux brutes par le sulfate d'aluminium afin de relier par un modèle mathématique le taux optimum de coagulant aux variables caractéristiques des eaux de barrage bab louta.

Pour que cette modélisation soit la plus fiable possible, nous nous sommes d'abord penchés sur certaines techniques analytiques comme les mesures des turbidités colloïdales mais aussi et surtout sur la reproductibilité de nos essais de floculation sur jar-test.



AVANT PROPOS

L'étude des articles publiés sur la coagulation par le sulfate d'aluminium montre que celle-ci met en œuvre des mécanismes fort complexes qui dépendent d'un nombre important de variables. Nous nous bornerons ici, à présenter dans leurs grandes lignes, les principaux axes de recherches dans ce domaine.

MATSON (en 1928) a été l'un des premiers à noter que les sels d'aluminium à certains pH pouvaient provoquer une inversion de la charge électrique des suspensions coagulées. Il suggère alors que ce sont les produits d'hydrolyse de l'aluminium qui sont responsables de ce phénomène. Les différentes étapes de cette hydrolyse ont depuis, intéressé de nombreux chercheurs. Il existe, en effet, de nombreuses espèces intermédiaires entre l'ion Al^{3+} hydraté et le trihydroxyde d'aluminium. Différentes structures de complexes polynucléaires ont ainsi été proposées par BROSSET et al. (1954), MATIJEVIC et "STRYKER (1766), HAYDEN et RUBIN (1974), BOTTERO et al. (1980) (1982) ainsi que par KAPOL'SKii (1987).

La présence de ces espèces (ainsi que leur charge) dépend du pH du milieu réactionnel. De nombreux diagrammes de stabilité de l'aluminium en fonction du pH, permettant de localiser dans différentes zones du graphe le mode d'action du coagulant, ont successivement été proposés par PACKHAM(1963), STUMM et O'MELIA (1968), MC COOK et WEST (1978), RUBIN et BLOCKSIDGE (1979), AMIRTHARAJAH et MILLS (1982). Ainsi, selon la concentration en aluminium et le pH, l'action du coagulant peut s'effectuer soit par balayage (sweep-coagulation) vers les pH basiques, c'est-à-dire ennoiment des particules à l'intérieur de floc d'hydroxydes d'aluminium plus ou moins chargés, soit par adsorption-déstabilisation à pH plus bas, avec un risque de restabilisation de la suspension floculée à taux élevé.

Selon les travaux publiés, on peut observer des déplacements des frontières entre ces différentes zones, MILLER en 1925, le pressent déjà quand il suggère que ce sont les sels constituant le milieu aqueux et particulièrement les anions qui sont responsables du décalage des zones optimales du pH de coagulation. Depuis MARION et THOMAS (1946), STUMM et MORGAN (1962), PACKHAM (1965), HANNA et RUBIN (1970), de HEK et al. (1978), LETTERMAN étal.(1977, 1983), ont travaillé sur ce sujet. De leurs études, il ressort que le déplacement ou l'élargissement de la zone optimale du pH de coagulation est principalement lié à l'affinité de l'anion considéré envers les sels d'aluminium présents. Les cations semblent eux n'avoir que peu d'influence, si ce n'est à pH élevé (PACKHAM, 1965).

La température est un facteur limitant. En effet, en dessous d'un certain seuil, les rendements de clarification deviennent médiocres. Pour MOHTADI et RAO (1973) et KOWAL et MACKIEWICZ (1975), cette dégradation est due au pH optimum de coagulation qui croît lorsque la température s'abaisse, DOLEJS (1983, 1984), dans deux études consécutives sur des eaux chargées en matières humiques, montre lui, qu'une agitation plus intense après l'injection du coagulant peut, à faible température, améliorer le rendement d'élimination des colloïdes et que selon l'alcalinité (TAC) du milieu l'effet de la température peut varier. L'action limitante de la température peut également être atténuée, comme le précisent MORRIS et KNOCKE (1984), en augmentant la concentration des matières en suspension. En 1986, BAZER-BACHI confirme le déplacement du pH optimum de coagulation avec la température. Il montre en outre, qu'à faible minéralisation, la dégradation du



rendement peut être atténuée en augmentant le taux de sulfate d'aluminium, ce qui est impossible à forte minéralisation où l'abattement de la turbidité reste médiocre quel que soit le taux appliqué.

L'efficacité de la coagulation dépend également de la nature et de la concentration des matières en suspension. Différents critères ont été utilisés pour caractériser ce phénomène.

Dans des travaux antérieurs, KAWAMURA et al (1966, 1967) avaient déjà montré que le taux optimum de coagulant était corrélé à la charge colloïdale des suspensions. (Mesurée par titration colloïdale), BAZER-BACHI (1986) confirme également le rôle de la nature de la suspension minérale ainsi que de la turbidité.

Le phénomène de la coagulation est donc complexe car dépendant de nombreux facteurs. A notre connaissance il n'existe que peu de modèles reliant le taux de coagulant à ces variables. Ceux de KAWAMURA et al (1967) et de VERMA et CHAUDHURY (1978) prennent en compte l'alcalinité et la titration colloïdale. Ils doivent cependant être modulés en fonction de la nature de la suspension colloïdale et de sa concentration. C'est également le cas des modèles de CAYRO et COYLE (1976) obtenus à partir du traitement statistique de données déjà existantes : ils doivent être adaptés en fonction des données climatiques. De même, les constantes des modèles de BRUECK et MC MULLEN (1978), doivent être modifiées selon la température de l'eau. Ce type de relation prend en compte des descripteurs caractéristiques de l'eau brute mais aussi quelquefois des paramètres de contrôle (qualité de l'eau décantée ou filtrée). Cette technique qui consiste, d'une part à utiliser des données antérieures (non forcément optimales) et d'autre part des paramètres de contrôle, est d'ailleurs souvent utilisée. En 1981, GREGORY présente un tableau récapitulatif des variables prises en compte par différentes équipes pour modéliser le taux de traitement (tableau 1). Cinq descripteurs au maximum, sont utilisés. A la même époque, JANSSENS et al. (1981) proposent un algorithme intégrant divers paramètres tels que la turbidité, les doses de sulfate d'aluminium et de silice activée, la température, la filtrabilité et l'alcalinité

Tableau 1 : Variables prises en compte pour déterminer des algorithmes de contrôle du taux de traitement (GREGORY, 1981). [1]

Références	Coagulant	Turbidité	Température	TAC	pH	couleur	Autres
1958NAUMAN	ALUM	x		x			
1968 LEWIS	ALUM	x		x	x	x	
1971ROJANSKIItfi/.	ALUM	x	x	x	x		
1973 MANNING	ALUM	x	x	x	x		
1975 MELBOURNE étal.	ALUM	x				x	
1976CHIRVAC étal.	ALUM	x	x		x		conductivité
1976CAIRO et al.	ALUM	x		x			
1978BRUECKK/3/.	ALUM/P AC	x	x	x	x		
1978MUIRAefa/.	ALUM	x	x	x	x		Oxydabilité M.organique



Présentation de l'ONEE (Branche Eau) :

1- Historique :

Créé en 1929 par Dahir sous le nom de REIP (Régie d'Exploitation Installation et Planification), puis REP (Régie d'Exploitation et Planification), ensuite sous le nom de l'ONEP en 1972 et enfin sous le nom de l'Office National de l'Électricité et de l'Eau potable ONEE (Branche Eau) depuis le 24/04/2012.

L'ONEE (Branche Eau) est l'organisme gouvernemental qui assure l'essentiel de la gestion de la ressource en eau potable et de sa production au Maroc.

C'est un établissement public à caractère industriel et commercial doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière.

2- Missions principales :

- Planifier l'approvisionnement en eau potable du Royaume.
- Etude de l'approvisionnement en eau potable et assurer la distribution pour le compte des communes qui le souhaitent.
- Contrôler la qualité des eaux produites et distribuées et la pollution des eaux susceptibles d'être utilisées pour l'alimentation humaine.
- Assister en matière de surveillance de la qualité de l'eau.
- Participer aux études, en liaison avec les ministères intéressés, des projets législatifs et réglementaires nécessaires à l'accomplissement de sa mission.

L'ONEE (Branche Eau) est le 1er Producteur avec 901 millions m³ en 2010 couvrant les besoins de 93% de la population totale urbaine du Royaume.

L'ONEE (Branche Eau) est le 1er Distributeur avec plus d'1,5 million de clients abonnés représentant :

- 500 villes et centres (6 millions d'habitants).
- le reste du Royaume est desservi par 13 régies municipales et 3 concessionnaires privés.

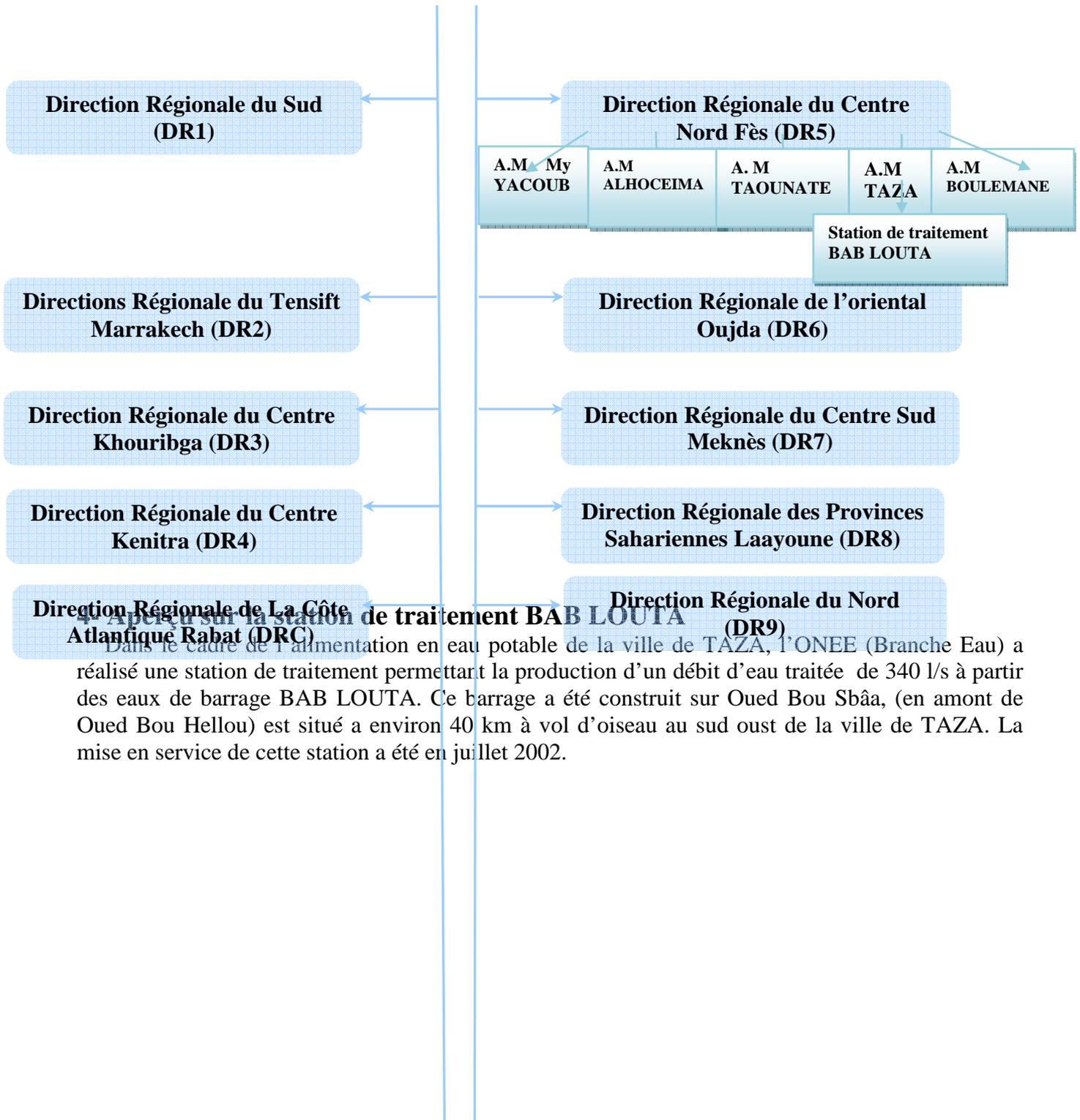
Outre les activités principales, on trouve d'autres activités particulières :

- Généralisation de l'eau potable.
- Formation et coopération.
- Sensibilisation.
- Dessalement et déminéralisation.
- Assainissement liquide.
- Amélioration de la qualité de l'eau.
- Gestion des bornes-fontaines.

3- Directions régionales de L'ONEE (Branche Eau) :

Il y a dix Directions Régionales :

Directions Régionales ONEE



4- Aperçu sur la station de traitement BAB LOUTA

Dans le cadre de l'alimentation en eau potable de la ville de TAZA, l'ONEE (Branche Eau) a réalisé une station de traitement permettant la production d'un débit d'eau traitée de 340 l/s à partir des eaux de barrage BAB LOUTA. Ce barrage a été construit sur Oued Bou Sbâa, (en amont de Oued Bou Hellou) est situé à environ 40 km à vol d'oiseau au sud ouest de la ville de TAZA. La mise en service de cette station a été en juillet 2002.



Vue générale de la ST bab louta



Vue du barrage bab louta



CHAPITRE I :

PROCESSUS DE POTABILISATION DES EAUX DE BARRAGE BAB LOUTA

Introduction

Les eaux de surface ne sont pratiquement jamais potables sans aucun traitement du fait de diverses substances d'origine naturelle ou apportées par la pollution. Pour améliorer leur qualité (potabilité), elles nécessitent des traitements appropriés c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques ou biologiques, dans une chaîne de traitement classique. Au cours de ce chapitre, nous décrivons donc successivement les étapes de clarification des eaux de barrage BAB LOUTA en vue de les rendre potables.

La majeure partie de la clarification de l'eau se fait au niveau de l'étape coagulation - floculation, ce qui constitue un traitement fondamental pour une eau destinée à la consommation. De plus le développement des techniques de décantation et de filtration des eaux a permis la réduction de la taille des équipements.



TRAITEMENT DES EAUX DE BARRAGE BAB LOUTA

Le traitement complet de l'eau brute comprend généralement 6 étapes (2 étapes en prétraitement et 3 étapes en clarification+ désinfection).

I. LE PRE-TRAITEMENT DE L'EAU BRUTE :

Surveillée et protégée, l'eau brute à l'état actuel ne représente encore qu'une matière première, qui va être transformée, élaborée, pour devenir conforme aux normes définies par la réglementation.

Les caractéristiques des eaux brutes sont extrêmement variées. Il existe un certain nombre de procédés élémentaires destinés à les traiter.

I.1 PRE-CHLORATION :

La première étape du traitement est constituée par une pré-chloration de l'eau brute. L'injection du Chlore se fait à l'entrée d'un bassin de contact ayant un temps de séjour de 12 minutes pour plein débit (386 l/s) a pour but :

- D'oxyder le fer et le manganèse contenus dans l'eau brute. (En général responsable de la couleur).
- De détruire les matières organiques. (Améliorer le goût et l'odeur de l'eau).
- De détruire les micro-organismes et d'inhiber la croissance algale.

Le produit généralement utilisé est le Chlore Cl₂.

Principe d'action

La pré-chloration correspond à l'application d'une dose de chlore avant n'importe quel traitement. Le Chlore est l'oxydant le plus communément utilisé dans le traitement de l'eau. Il est employé sous forme gazeuse (Cl₂), liquide (hypochlorite de sodium) ou solide (hypochlorite de calcium).

Le Chlore est introduit dans les canalisations ou dans les bassins de mélange disposés en début de filière.

Lorsque du Chlore pur est additionné à l'eau, il se décompose rapidement pour former de l'acide hypochloreux (HClO) et de l'acide chlorhydrique (HCl) :



HClO (acide faible) est ensuite partiellement dissocié en ion hypochlorite ClO⁻ :



On appelle chlore résiduel libre, la somme [HClO + ClO⁻].

Le rapport entre acide hypochloreux et ion hypochlorite est donné par :

$$\log (\text{HClO} / \text{ClO}^-) = 7.5 - \text{pH}$$

I.2 DEBOURBAGE

Les débourbeurs sont conçus de telle façon à assurer la pré décantation d'eau brute chargée en matières en suspension dont la teneur en MES pourrait atteindre exceptionnellement 20 g/l.

Chaque file de traitement est composée d'un :



-Mélangeur rapide de capacité 15 m³ assurant un temps de séjour de 2 minutes et permettant un brassage des réactifs de traitement avec les eaux brutes provenant du barrage Bab louta. Les réactifs pouvant injectés à ce niveau sont le polymère et le sulfate d'alumine pour le débouillage et le permanganate de potassium pour l'oxydation.

-Débourbeur lamellaire dimensionné pour traiter des eaux présentant une charge de MES allant jusqu' à 10 g/l et fonctionnant à une vitesse ascensionnelle apparente de 1.2m/h et un temps de séjour de 30 minutes. Les boues sont extraites de manière automatique suivant des séquences réglables en fonction de la charge des matières en suspension des eaux brutes.

Les eaux débouillées sont collectées par un réseau de conduites perforées réparties à la surface du décanteur et sont envoyées vers le mélangeur rapide de la filière de traitement classique. Les eaux débouillées sont réparties sur les trois files de traitement par un système de déversoirs.

II LE TRAITEMENT CLASSIQUE DE L'EAU BRUTE :

Chacune des filières de traitement est composée de trois mélangeurs rapides, trois flocculateurs et trois décanteurs lamellaires.

II.1 COAGULATION – FLOCCULATION :

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules dites « particules colloïdales », ces dernières peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longue période, peuvent même traverser un filtre très fin, par ailleurs puisque leur concentration est très stable, ces particules, n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres.

Pour les éliminer, on a recours aux procédés de coagulation et de flocculation qui sont au cœur du traitement de l'eau potable.

II.1.1 La coagulation

La coagulation est un traitement visant à neutraliser les charges électrostatiques en surface des particules colloïdales. En effet, ces matières en suspension portent des charges généralement négatives induisant des forces de répulsion entre les particules.

La coagulation est un traitement produisant des floccs, décantant beaucoup plus rapidement que les particules individuelles.

Une fois la quantité du coagulant est injectée (trouvée par le jar-test), l'eau passe dans un mélangeur rapide où s'effectue le mélange du réactif avec l'eau et entraînant par la suite une déstabilisation et une coagulation des particules génératrices de turbidité.

Le mélange rapide de capacité 15.8 m³ permet d'assurer cette déstabilisation et une coagulation pendant un temps de séjour de 2 minutes. [2]

Il est à noter que le degré de coagulation dépend de :

- La fréquence des collisions entre les floccs.
- La tendance des floccs à se coller ensemble après s'être entrechoqués.

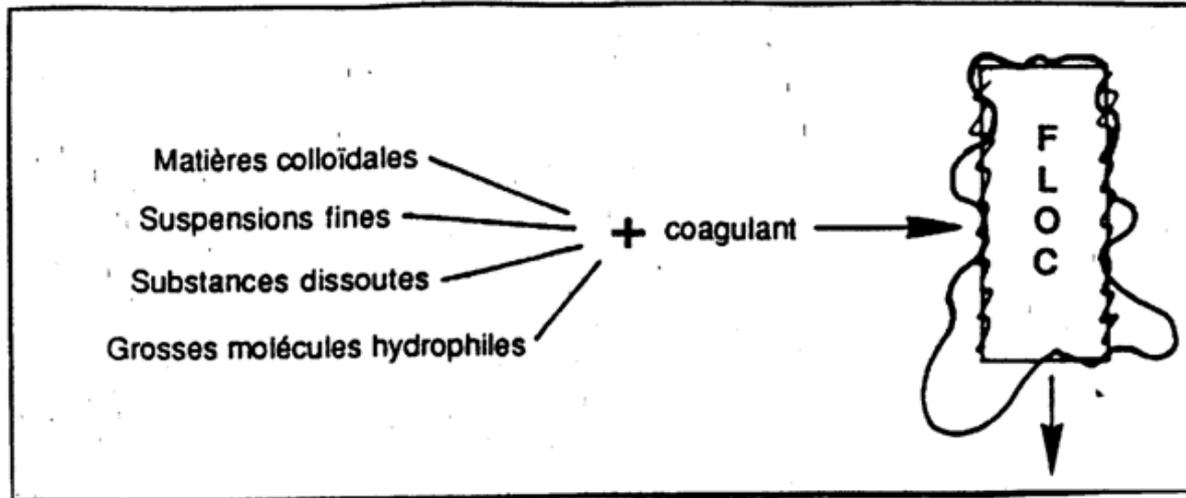


Fig.1 Mécanisme de la coagulation

II.1.1.1 Principaux caractéristiques de sulfate d'aluminium

De loin, le coagulant le plus utilisé, le sulfate d'aluminium est un sel dont :

- Sa formule générale est : $Al_2(SO_4)_3, n H_2O$
- La gamme de pH d'utilisation est de 5,7 à 7,2 (Optimum 6)
- (Produit commercial $n = 14$, produit pur $n = 18$)

Dans le jargon usuel des spécialistes de l'eau, on l'appelle communément « ALUN » bien que ce ne soit pas un alun au sens chimique du mot.

L'Alun est produit en dissolvant de la bauxite dans de l'acide sulfurique. Après la réaction du minerai (bauxite : riche en alumine (Al_2O_3)) et de l'acide sulfurique, on enlève les impuretés et les matières insolubles par sédimentation et filtration.[3]

Il est disponible sous différentes formes solides (selon les fabricants), concassé, morceaux de 10 cm de large et de 1 cm d'épaisseur environ, "noisette", granulométrie comprise entre 2 et 12 mm ou 3 et 35 mm, poudre, granulométrie courante de 0,1 à 3 mm sous forme de solution aqueuse à 8,2% d' Al_2O_3 (oxyde d'aluminium ou Alumine).

II.1.1 .2 Déstabilisation des colloïdes

Pour surmonter les forces répulsives, deux possibilités peuvent être théoriquement envisagées :

- accroissement de l'énergie cinétique des particules (techniquement inapplicable en pratique) ;
- modification de la résultante des forces mises en jeu.

On peut obtenir ceci en : augmentant la force ionique du milieu par introduction d'un électrolyte, (ce qui a pour effet la diminution de l'épaisseur de la double-couche) ;

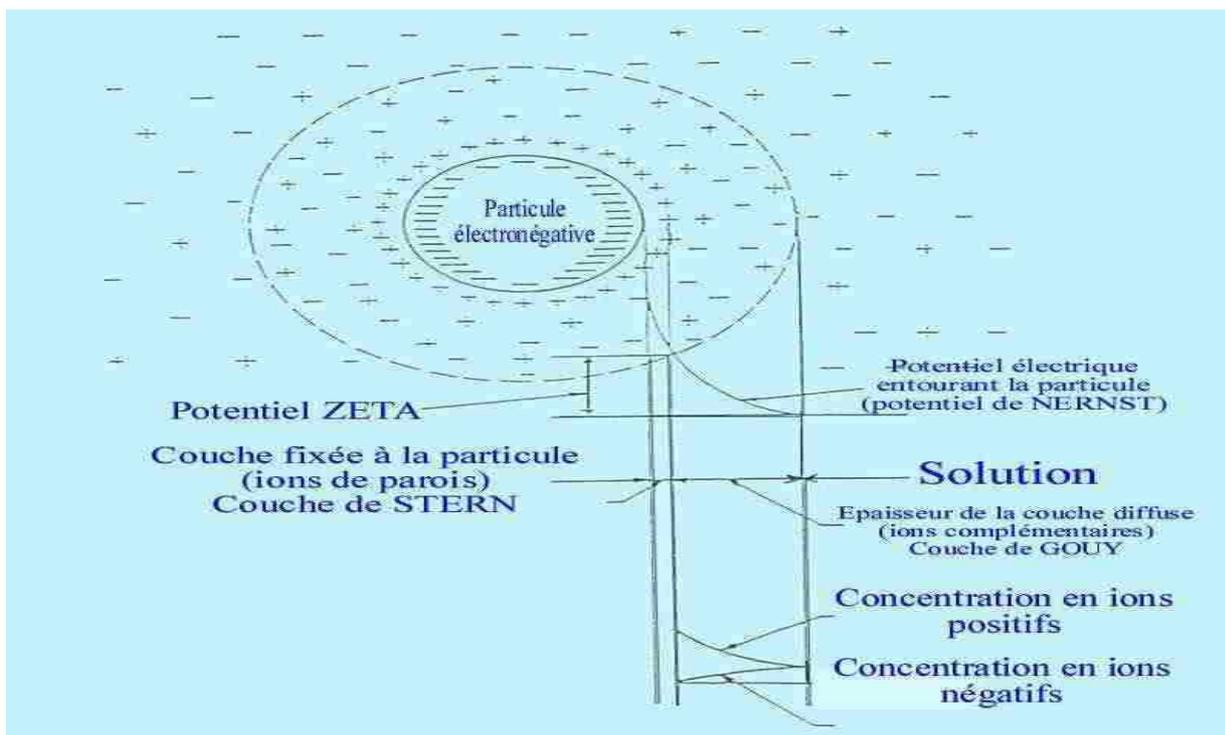
- abaissant la barrière de potentiel (dit potentiel Zêta) existant autour du colloïde par introduction d'un contre-ion dans la couche liée et adsorption de ce contre-ion sur la surface de la particule.

Dans ces conditions, les particules se rapprochent suffisamment les unes des autres pour que les forces de Van der Waals deviennent prédominantes. Le processus qui conduit à ce résultat est généralement appelé coagulation.

Cette étape franchie, chaque collision entre particule provoque un accroissement de leur taille par agglomération; c'est la *phase de floculation* qui conduit à des floes dont la taille, de l'ordre du millimètre, permet leur décantation (rappel : dépôt de particules au fond d'un récipient, par action de la pesanteur), en un temps suffisamment court si les conditions hydrauliques s'y prêtent.

L'action coagulante des électrolytes est donc déterminée par la valeur de la charge de l'ion qui est opposé à l'ion colloïdal. Dans les eaux naturelles, la très grande majorité des particules colloïdales est chargée négativement. La floculation de ces particules ne dépend donc, en fait, que de la charge du cation de l'électrolyte, l'anion ne jouant qu'un rôle secondaire.

La phase de coagulation est quasi instantanée et elle doit s'effectuer dans des conditions d'agitation intense pour obtenir l'homogénéisation du milieu après introduction de l'électrolyte (ou coagulant et/ou floculant), tandis que la floculation exige une agitation lente.



Fig

2 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale (d'après Riddick)

Au centre : l'ion colloïdal.

A l'extérieur : les ions libres de charge électrique équivalente et de signe contraire à celle de l'ion colloïdal et formant deux couches :



- ions de parois (couche de Stern) indissolubles de l'ion colloïdal qui présentent une charge toujours inférieure à celle de l'ion colloïdal (le niveau énergétique à cette distance est caractérisé par le potentiel Zêta),
- ions complémentaires (couche de Gouy) formant une couche diffuse à une plus grande distance de l'ion colloïdal, en équilibre avec le solvant, présentant un appauvrissement progressif en ions de signe contraire à celui de l'ion colloïdal, accompagné d'un enrichissement correspondant en ions de l'autre signe. [2]

II.1.1.3 Les principaux facteurs influençant le processus de coagulation

Le succès de la coagulation dépend de facteurs, dont certains peuvent être contrôlés et d'autres, comme les basses températures, ne peuvent pas être modifiés de façon économique.

Les facteurs les plus importants sont la turbidité, la température, l'alcalinité, pH, la matière organique et les éléments mécaniques de la station tels que le genre d'agitateur.

La turbidité

La nature des matières à éliminer joue un rôle très important.

Exemple:

Suspensions minérales = facilement coagulées

Matières organiques = demandent plus de coagulant.

La température

Les basses températures ralentissent la vitesse de formation du floc, mais quand ce dernier s'est produit, la précipitation est entravée par la viscosité accrue et la densité maximale de l'eau. De plus grandes doses de coagulant peuvent accélérer le développement du floc et faciliter sa précipitation. Il peut être utile d'ajouter du poids au floc au moyen de certaines argiles.

L'alcalinité

La coagulation peut être mauvaise si l'alcalinité est mauvaise.

Exemple : Certaines eaux de lac ou d'étang exigent une plus forte dose d'alun durant les mois chauds, alors que les algues et autres animaux microscopiques causent une augmentation du pH et de l'alcalinité de l'eau.

La coagulation est également très difficile à faible alcalinité.

Le pH

Le pH joue un rôle très important, car il détermine le choix du coagulant à employer. Pour chaque eau, il existe un pH où la formation du floc est la meilleure; on l'appelle parfois le point isoélectrique. Ce point doit être déterminé pour chaque eau et dans la majorité des cas, il correspond au potentiel zêta le plus proche de zéro

En plus, il influe sur la quantité résiduelle du coagulant non précipitée restant dans l'eau après coagulation-floculation.



Couleur liée à la matière organique

Les colloïdes de couleur s'enlèvent presque toujours mieux à de basses valeurs de pH, et il faut, soit de l'acide avec de l'alun, soit une plus forte dose d'alun seul. Ordinairement,

L'alumine s'hydrolysera pas pour produire un floc à un pH inférieur à 6 mais dans le cas de la couleur, certaines stations obtiennent une coagulation efficace à des valeurs de pH comprises entre 4 et 5.

Les aspects mécaniques

Il a été démontré que le perfectionnement du brassage entraîne une économie de produits chimiques en même temps qu'une meilleure coagulation.

L'efficacité de la coagulation est réduite par certains modèles d'écluses ou déversoirs d'entrée et de sortie du bassin de précipitation. Ces derniers brisent les fragiles particules du floc à cause de vitesses excessives. Pomper de l'eau avec le floc, entraîne généralement la destruction de la particule du floc et la réduit à une dimension qui se précipite mal. Dans la station moderne, on connaît les problèmes et on les évite. [3]

II.1.2 La floculation

Une fois cette étape accomplie, on injecte –dans le cas échéant– un flocculant ou adjuvant de floculation qui aura pour effet de faciliter l'agglomération de tous les floccs formés.

Les flocculants les plus utilisés sont :

- Les polymères.
- L'alginate.

La floculation est assurée par un ouvrage de capacité 158 m^3 permettant un temps de séjour de 20 minutes et doté d'un agitateur avec un gradient de vitesse allant de 25 s^{-1} à 100 s^{-1} .

II.2 DECANTATION :

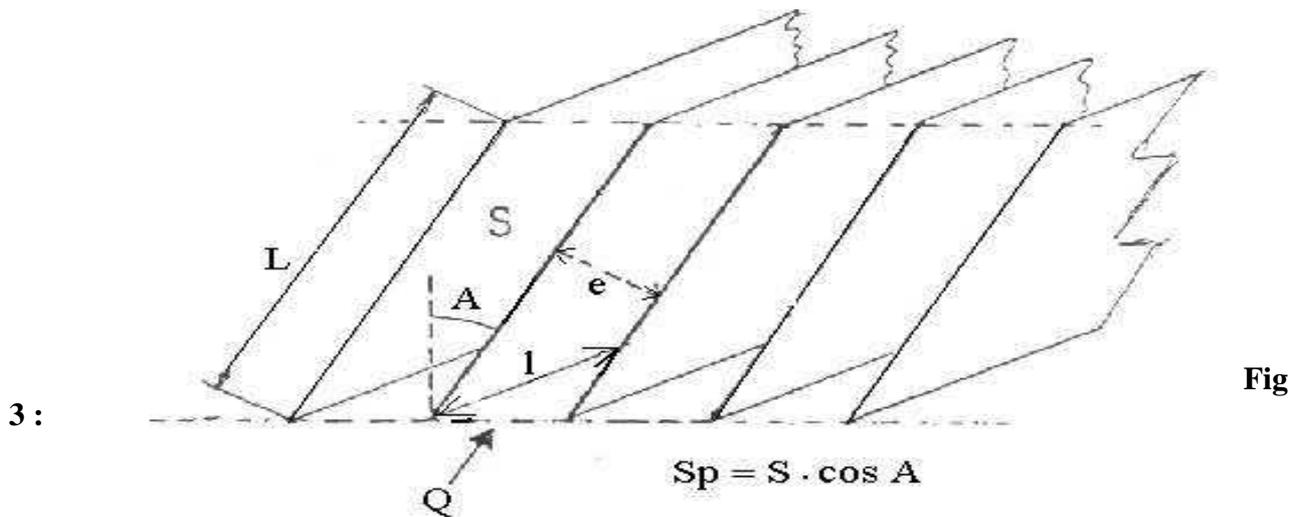
La décantation est une phase très importante de traitement de l'eau pour récupérer tous ou une grande partie des floccs.

Il existe de nombreux types de décanteurs, ceux utilisés à la station sont au nombre de trois type lamellaires de surface unitaire de 52 m^2 fonctionnant à des vitesses au miroir réelle de 9.1 m/h et une vitesse de Hazen de 0.6 m/h , le temps de séjour dans l'ouvrage pour le débit nominal $1419 \text{ m}^3/\text{h}$ est 30 minutes.

La décantation permet aux floccs de s'accumuler pour former de la boue qui devra être régulièrement extraite. Plus de 95% des matières en suspension sont éliminées lors de cette étape. La turbidité de l'eau décantée ne doit pas dépasser 5 NTU.

Le décanteur est équipé de purge des boues qui fonctionnent en mode automatique et manuelle.

Chaque lamelle représente un décanteur modulaire dont le pouvoir de coupure est caractérisé par le rapport du débit transité (Q) à la *surface projetée* (Sp) de la lamelle.



Coupe transversale d'une lamelle

II.3 FILTRATION :

La filtration consiste à faire passer l'eau à travers un matériau poreux afin d'éliminer les matières en suspension restantes.

Le type de filtration le plus répandu est la filtration sur sable.

L'eau à filtrer passe donc à travers le lit de sable et se débarrasse de floccs non éliminés par la décantation.

La station est équipée de 9 filtres de surface unitaire 26.25 m^2 fonctionnant chacun à une vitesse de filtration de 6 m/h à plein débit. Le lavage se fait en trois phases : air, air+eau et eau seule.

Le système utilisé pour la filtration est celui de siphon régi par un dispositif qui crée une dépression permettant à l'eau de s'infiltrer.

Cette phase doit réduire la turbidité de l'eau à des valeurs inférieures ou égales à 0.5 NTU. (Unité de turbidité néphélogométrique)

N.B

Les eaux de lavage de tous les filtres sont collectées dans une bache de stockage de 600 m^3 équipée de deux pompes de 10 l/s permettant d'envoyer ces eaux sans traitement en tête de la station.

II.4 DESINFECTATION :

A la fin du traitement, la désinfection permet de détruire ou d'éliminer les micro-organismes pathogènes, on utilise pour cela généralement un désinfectant chimique tel que le chlore. Donc la désinfection est une étape très importante pour la potabilisation d'une eau.

- L'eau est devenue potable et prête à être acheminée vers le réservoir de la RADEETA.



- L'eau sera ensuite acheminée vers les filtres qui enlèveront les plus petites particules qui n'auront pas sédimenté ou décanté.

III. LE TRAITEMENT DES BOUES :

Les boues issues des décanteurs sont traitées par une filière de déshydratation, celles des débourbeurs sont envoyées à l'égout.

La filière de traitement des boues est composée de ce qui suit :

-Bâche de reprise des boues de capacité 42 m^3 équipée de 3 déversoirs pour alimentation des épaisseurs.

-Trois épaisseurs de boues de surface unitaire 38 m^2 . L'alimentation de ces 3 épaisseurs se fait gravitairement.

-Un local de déshydratation (bac de préparation automatique et dosage du polyélectrolyte).

-Six lits de séchage.

La déshydratation est prévue pour traiter les boues issues du décanteur au débit nominal des eaux brutes présentant une charge moyenne de 100 mg/l de MES. [2]

Conclusion

Au vu de ce chapitre, nous pouvons conclure que les eaux de surface nécessitent des types de traitement selon la qualité physico chimique et bactériologique des eaux brutes. Généralement ces dernières passent par de différentes étapes constituant ainsi une chaîne de traitement classique (prétraitement, clarification, désinfection).

Au Maroc, le traitement des eaux de surface est difficilement optimisé, notamment la coagulation-floculation. En effet, les connaissances techniques limitées du personnel d'exécution et les conditions climatiques constituent les principales contraintes vis-à-vis la bonne exploitation des stations de traitement et surtout vis-à-vis les taux du coagulant appliqués .

Le chapitre suivant va aborder plus particulièrement la modélisation mathématique du taux du sulfate d'aluminium par la méthodologie de surface de réponse en utilisant le plan d'expériences de BOX-BENKHEN généré par le logiciel NEMRODOW sur laquelle porte notre étude.



CHAPITRE II :

MODELISATION MATHEMATIQUE DU TAUX DU SULFATE D'ALUMINIUM

Introduction

Notre étude a été menée en pilote expérimentale en réalisant des essais de floculation sur le jar test chaque fois que les caractéristiques des eaux de barrage BAB LOUTA se modifient. C'est cette



modification rapide de la qualité et le temps de retard que représente l'essai de Jar-test qui nous ont poussé à mettre en œuvre un modèle mathématique du taux du sulfate d'aluminium conduisant ainsi à l'automatisation de l'étape de clarification de ces eaux et ce pour éviter la détérioration de la qualité des eaux produites d'une part et pour optimiser le taux de coagulant d'autre part. Cette modélisation s'appuie sur la méthodologie de surface de réponse en utilisant le plan d'expériences de BOX-BENKHEN généré par le logiciel NEMROD.

Au début, nous avons établi la liste de tous les facteurs qui pourraient influencer sur le phénomène étudié, ils sont en totalité 5 descripteurs avant qu'ils soient restreint en 3 seulement et ce suite à une étude de criblage effectuée en se référant à la matrice d'HADAMARD.

I. PROCEDURE EXPERIMENTALE



Pour acquérir les données, des essais de floculation ont été lancés chaque fois que les caractéristiques des eaux de barrage BAB LOUTA se modifiaient. Chacun de ces essais a été complété par des analyses physico-chimiques (turbidité, température, TAC, pH, matières organiques).

I.1 Préparation des solutions et conduite de l'essai Jar-test

Tous les essais de coagulation-floculation ont été conduits sur des solutions préparées par dissolution de composés de qualité analytique dans de l'eau distillée (pH = 6,0 à 6,8 ; conductivité = 1 à 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et Cl_2 résiduel nul). Toute la verrerie (de classe A) est nettoyée avec un mélange sulfochromique, rincée à l'eau distillée puis séchée à l'étuve à 110 °C.

I.1.1 Matériels utilisés

- Floculateur ORCHIDIS à six postes dont les pales tournent généralement de 0 à 260 tr/min.
- Six bocal ou béchers de 1000 ml ainsi que des béchers de 50 et 100 ml.
- Erlenmeyers de 250 ml.
- Entonnoirs de verre.
- Papier filtre.
- Pipette de 1ml, 5ml, et 10 ml.
- Thermomètre étalonné de 0,5 °C d'incertitude pour la mesure de la température.

I.1.2 Solutions de coagulant

Au cours de nos essais, nous avons utilisé comme réactif coagulant le sulfate d'aluminium en poudre ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ / 17% Al_2O_3), préparé par dissolution dans l'eau distillée. Une solution mère de 10 g/l est préparée périodiquement.

I.2 Essai de coagulation - floculation ' Jar -test '

Les essais de floculation ont été réalisés sur jar-test ORCHIDIS. Tous les résultats étant liés à l'emploi de cet appareil, nous lui avons tout d'abord apporté quelques modifications afin de le fiabiliser en augmentant la répétabilité de ses résultats :

- d'une part, la configuration des béchers et des mobiles d'agitation a été modifiée selon les spécifications d'ANDREU-VILLEGAS et al, (1976). Ceci, afin de connaître la puissance dissipée en fonction de la vitesse de rotation des pales,
- d'autre part, chaque bûcher comprenant des chicanes a été muni d'une prise d'échantillon fixe permettant de prélever 300 ml de surnageant.

Les essais de Jar-test ont été réalisés sur un floculateur à 6 agitateurs (FLOCULATEUR ORCHIDIS) (voir annexe 1) avec une vitesse de rotation individuelle variant entre 0 et 260 tr/min. cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de béchers remplis chacun de 1000 ml d'eau brute .

Au cours de notre étude, l'eau brute et le coagulant sont soumis pendant 2min à une agitation rapide de 120 tr/ min. la vitesse est par la suite réduite à 40 tr / min (vitesse de formation des flocons et leur taux de grossissement) pour une durée de 20 min . Après une décantation de 30 min (une phase durant la quelle le floc déstabilisé est entraîné vers le



fond des béchers), siphonner l'eau surnageant pour déterminer les paramètres physico-chimiques. Après filtration de l'eau décantée, nous déterminons la turbidité et le TAC.

I.3 Analyses physico-chimiques des paramètres influençant le phénomène étudié [2]

Avant de procéder aux analyses nous sommes censés de suivre les étapes suivantes :

- La propreté du matériel utilisé pour l'analyse.
- S'assurer de la qualité des réactifs préparés et le respect des conditions et des délais maximums de leurs stockages.
- Le suivi des modes opératoires, en respectant l'ordre d'ajout des quantités des réactifs et les volumes des échantillons à analyser.
- Le respect du domaine d'application des méthodes d'analyses et les limites de sensibilité.
- L'étalonnage des appareils de mesure avant chaque série d'analyse et chaque fois que les conditions d'analyse changent.
- Le chauffage et la stabilité des appareils de mesure.
- Le respect des temps de réaction avant d'effectuer les mesures.
- L'absence d'interférence d'autres éléments dans le dosage.

I.3.1 La turbidité colloïdale

Définition

La turbidité désigne la teneur d'un liquide en matières qui le troublent. Elle est causée par des particules en suspension qui absorbent, diffusent et/ou réfléchissent la lumière.

Principe

La méthode néphélométrique est basée sur la comparaison de l'intensité de la lumière diffractée (effet Tyndall) par l'échantillon à celle de l'étalon de référence dans les mêmes conditions (longueur d'onde entre le rayon incident et diffracté).

Les valeurs de la turbidité colloïdale sont déterminées par passage d'une solution turbide (contenant les MES) à travers un papier filtre. Le filtrat ainsi obtenu est placé dans la cuvette du turbidimètre où l'on mesure ce qu'on appelle la turbidité colloïdale. L'unité utilisée est le NTU.

I.3.2 Le potentiel d'hydrogène

Principe

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il est en fonction de la concentration des ions H⁺ contenus dans l'eau.

Dans les eaux naturelles l'activité des ions H⁺ est due à des causes diverses, en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et des sels.

$$PH = -\log [H^+]$$

La présence norme pour eau naturelle et à consommation humaine est destinée à décrire la mesure du pH des eaux par deux méthodes :

- Soit par colorimétrie à l'aide d'un indicateur coloré dont la coloration obtenue est comparée à une échelle de teintes préparées à partir des solutions de pH connus. Cette méthode est



valable pour la mesure du pH sur le terrain et ne doit être utilisée que pour des eaux naturelles dont le pH est compris entre 6 et 9.

➤ Soit par potentiométrie à l'aide d'électrode de verre. Cette méthode peut être utilisée pour la mesure du pH de tout type d'eau, aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire.

Mode opératoire

La mesure doit être effectuée sur place au moment du prélèvement de l'échantillon de façon à ne pas modifier les équilibres ioniques par suite d'un transport ou d'une conservation prolongée.

Le pH d'une eau potable doit être compris entre 6,5 et 8,5 (Voir annexe 2).

I.3.3 Détermination de l'alcalinité de l'eau

I.3.3.1 Titre Alcalimétrique (TA):

Principe

TA : correspond à la neutralisation des ions hydroxydes OH⁻ et à la transformation de la moitié des ions carbonates en hydrogénocarbonates (HCO₃⁻) par un acide fort.

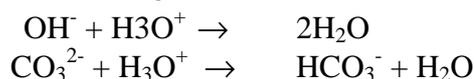
Mode opératoire

On prélève 100 ml d'échantillon dans un erlenmeyer de 250 ml, on Ajoute deux gouttes de phénophtaléine (Indicateur de pH avec une zone de virage de 8.3 à 10), dont deux manifestations peuvent se présenter, soit :

➤ Une coloration rose, qui signifie que le TA est différent de 0, ce qui nécessite un dosage par HCl (N/10) .On verse goutte à goutte jusqu'à la décoloration et on note le volume versé V.

➤ Pas de coloration rose, ce qui signifie que le TA est égal à 0, donc pH de l'eau est inférieur à 8.3.

Les réactions mises en jeu sont :



I.3.3.2 Titre Alcalimétrique complet (TAC) :

Principe

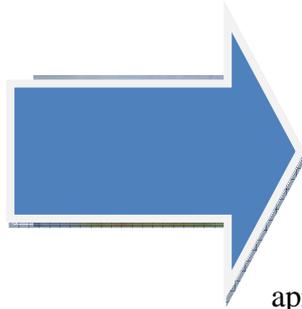
TAC : le titre alcalimétrique complet correspond à la neutralisation par un acide fort des ions hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates.

Mode opératoire

Pour déterminer le TAC, on utilise l'hélianthine comme indicateur coloré (avec une zone de virage de 3.3 à 4.6), qu'on ajoute à 100 ml d'échantillon pour donner une coloration jaune, ce qui nécessite un dosage par HCl, on ajoute un volume V' d'acide chlorhydrique à l'aide d'une burette, tout on agitant après chaque goutte versé jusqu'à l'apparition d'une coloration jaune orangée.

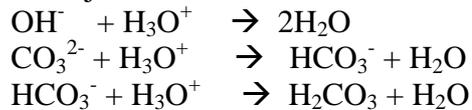


Après ajout de l'hélianthine



après dosage par HCl 0.1 N sur l'échantillon

Les réactions mises en jeu sont :



Expression des résultats **TAC (mécq/l) = Tb**

Tombée de burette (Tb= (V + V'))

I.3.4 L'oxydabilité au permanganate de potassium :

L'indice de permanganate d'une eau correspond à la quantité d'oxygène exprimée en mg/l cédée par l'ion permanganate et consommée par les matières oxydables contenues dans un litre d'eau.

Principe

L'oxydabilité consiste à oxyder les matières oxydables contenues dans l'échantillon par un excès de permanganate de potassium en milieu acide et à ébullition pendant 13 min.

- L'addition de l'acide oxalique permet la réduction de permanganate de potassium.
- On procède à un titrage en retour par le permanganate de potassium.

Mode opératoire



100 ml de l'eau à analyser
+ 2 ml de H₂SO₄
+10 ml de KMnO₄ (N/100).



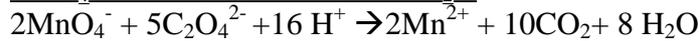
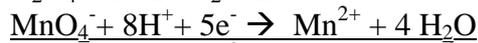
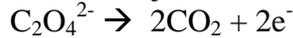
On porte le mélange à ébullition dans un bain marie pendant 13 min.





On ajoute 1 ml de l'acide oxalique (0,05M)

Les réactions mises en jeu sont :



Et la réaction globale du dosage en milieu sulfurique s'écrira :



Expression des résultats

Tb : Volume versé de KMnO_4 .

on effectue un dosage en retour par KMnO_4

[Oxydabilité] mg/l = Tb x 0,8

II. RÉSULTATS ET DISCUSSION

II.1 Etude de criblage des facteurs

Les stratégies de criblage sont utilisées afin d'identifier rapidement les quelques facteurs dans un grand ensemble de facteurs potentiellement influents avec un faible nombre d'expériences.

Les matrices de criblage les plus connues sont les matrices de Hadamard ou matrice de plackett et burman (1946) (appelées aussi matrices des effets) pour les quelles le nombre d'expériences est proche du nombre de facteurs étudiés. [4]

Le but final de cette étude étant l'automatisation de l'étape de clarification de la station de traitement d'eau potable alimentant la Ville de TAZA, le modèle mathématique devait répondre à deux caractéristiques essentielles :

- être le plus simple possible,
- faire appel aux descripteurs les plus informatifs.

Il fallait pour cela, tout d'abord, adapter les informations bibliographiques, parfois contradictoires, aux caractéristiques particulières des eaux de barrage BAB LOUTA.

Dans ce but, nous avons établi un diagramme de cause - effet et ce pour estimer l'influence de certains paramètres sur le taux de coagulant.

II.1.1 Choix des paramètres

Le diagramme d'ISHIKAWA (cause-effet) nous a permis de dégager 5 groupes de variables représentatifs des variations de la qualité de l'eau de BAB LOUTA. Ces paramètres sont : la turbidité colloïdale, la température, l'alcalinité (ou TAC), le pH et les matières organiques (Oxydabilité) l'influence de l'ensemble des autres paramètres a été démontré.

Modèle

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4 + b_5 * X_5$$



II.1.2 Caractéristiques du problème

Tableau 2 : Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude des effets
Nombre de variables	5
Nombre d'expériences	8
Nombre de coefficients	6
Nombre de réponses	1

II.1.3 Domaine Expérimental

Tableau 3 : Domaine Expérimental

	Facteur	Nbre Niveaux	Niveaux
U1	TURBIDITE COLLOIDALE	2	2
			290
U2	TEMPERATURE	2	11
			23
U3	TAC	2	10
			15
U4	PH	2	7.20
			8.30
U5	OXYDABILITE	2	1.2
			3.2

II.1.4 Réponse(s) expérimentale(s)

Tableau 4 : Réponse expérimentale

	Réponse	Unité
Y1	Taux du coagulant	mg/l

II.1.5 Matrice d'expériences

Tableau 5 : Matrice d'expériences

N°Exp	X1	X2	X3	X4	X5	Y1
1	1	1	1	-1	1	75.00



2	-1	1	1	1	-1	10.00
3	-1	-1	1	1	1	20.00
4	1	-1	-1	1	1	90.00
5	-1	1	-1	-1	1	20.00
6	1	-1	1	-1	-1	80.00
7	1	1	-1	1	-1	85.00
8	-1	-1	-1	-1	-1	25.00

II.1.6 Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant

Tableau 6 : Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	8.36563E+0003	5	1.67313E+0003	535.4000	0.154 **
Résidus	6.25000E+0000	2	3.12500E+0000		
Total	8.37188E+0003	7			

Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Taux du coagulant

Tableau 7 : Estimations et statistiques des coefficients

Ecart Type de la réponse		1.768			
R ²		0.999			
R ² A		0.997			
R ² pred		0.997			
Nom	Coefficient	F.Inflation	t.exp.	Signif. %	
Nombre de degrés de liberté		2	0.625	81.00	0.0171 ***
b1	31.875	1.00	0.625	51.00	0.0302 ***
b2	-3.125	1.00	0.625	-5.00	3.46 *
b3	-4.375	1.00	0.625	-7.00	1.64 *
b4	0.625	1.00	0.625	1.00	42.4
b5	0.625	1.00	0.625	1.00	42.4

de la réponse Y1 : Taux du coagulant



II.1.8 Interprétation 1

On conclut que les facteurs pH et matière organique sont significativement différents de zéro.

*Le quatrième facteur, c'est-à-dire le pH n'est pas significatif. Ce paramètre a été considéré comme une constante, ce qui nécessite quelques explications.

En effet, cela est réel en périodes de crues où la variation de pH reste minime (ΔpH inférieur à 0,2).

En période d'étiage, il peut, par contre varier dans des proportions non négligeables (pH 8,0 à pH 9,0) lors de journées ensoleillées. Sauf à pH élevé (supérieur à 8,6/8,7), il n'a jamais été observé de variations significatives du rendement des chaînes de clarification de l'usine de traitement d'eau.

La qualité des eaux brutes, en période de basses eaux, ne nécessite généralement que de faibles taux de coagulant. Le pH de l'eau floculée ne s'abaisse donc que modérément et croît jusqu'à atteindre des valeurs proches de pH 8,0, où il influe sur l'efficacité de la coagulation. Cependant, lorsqu'il atteint de telles valeurs, on observe une solubilisation telle de l'aluminium, que l'on dépasse les normes de potabilité. Le seuil se situant autour d'un pH de floculation de 6/7,2, il est alors impératif d'abaisser artificiellement le pH en dessous de cette valeur. C'est ce qui est fait en augmentant (au-delà du taux optimum) la dose de coagulant. On retombe alors dans une zone de pH optimal.

C'est donc pour des critères de potabilité, que ce paramètre a été considéré comme une constante. Dans l'absolu, il faudrait cependant, en tenir compte.

*Le cinquième facteur (matière organique) a été écarté : en effet, les eaux de barrage BAB LOUTA ne contiennent pas une teneur importante en matière organique ce qui rend son influence sur le taux du coagulant n'est pas significative.

Bref, Seuls les facteurs : la turbidité colloïdale (TC), la température (T) et l'alcalinité (TAC) qui ont été retenus pour la présente étude afin de modéliser le phénomène étudié.

II.2 Modélisation

II.2.1 Présentation de la méthodologie adoptée

L'objectif de notre étude est de modéliser le taux de sulfate d'aluminium en fonction des paramètres opératoires, tels que : la turbidité colloïdale, la température et le TAC. Nous allons modéliser expérimentalement la réponse avec un modèle du second degré en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse.

Box et Behnken ont proposé en 1960 ces plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1 , 0 et $+1$. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre les résultats des essais déjà effectués.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hypercube, mais au milieu des arêtes ou au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère ou sur une hypersphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au centre du domaine d'étude.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est illustré par la figure 4. Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs possède donc $12 + 3$ essais, soit 15 essais. On pourra remarquer qu'avec 4 points au centre au lieu de 3, on obtient un plan qui répond au critère de presque-orthogonalité [5]

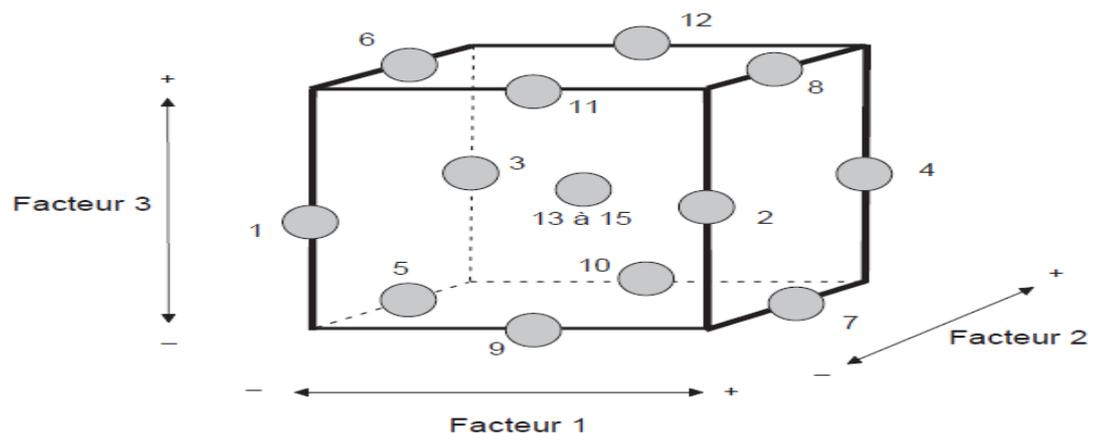


Figure 4 – Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre.

II.2.2 Justification du choix du modèle

L'étude du graphe (fig. 5) représentant le taux optimum de coagulant en fonction de la turbidité de l'eau brute montre que la corrélation, (non linéaire) bien qu'importante n'est pas suffisante pour décrire le phénomène (à turbidité constante le taux optimum peut doubler).

L'étude de ces eaux a d'autre part laissé entrevoir l'existence d'interaction entre paramètres (celle entre de TAC et la température, par exemple).

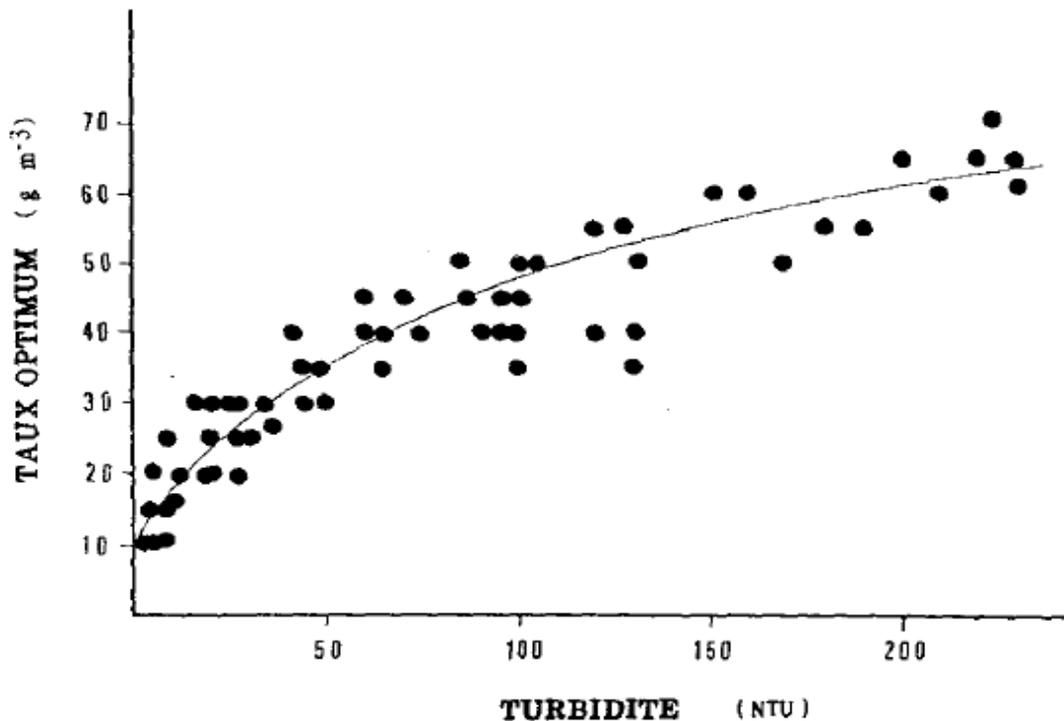


Fig 5 : Variation du taux optimum de SA en fonction de la turbidité de l'eau brute

Le choix s'est donc porté sur un modèle polynomial de degré deux complet, c'est à dire incluant aussi les effets dits quadratiques β_{11} , β_{22} et β_{33} (on parle encore de modèle pour surface de réponse). Ce modèle est donc donné explicitement par la forme :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i \neq j}}^k b_{ij} X_i X_j$$

Y : réponse du modèle

b_i : coefficients du modèle

X_i : variables du modèle

Les variables X_i sont réduites, c'est-à-dire adimensionnelles et de faible amplitude (elles varient entre - 1 et + 1). Ce choix de codage permet de comparer directement l'influence des descripteurs sur la réponse.

La transformation d'une variable réelle U_i , en variable codée X_i , s'obtient à partir de la relation suivante : $X_i = (U_i - U_i^0) / \Delta U$

Si U_{sup} et U_{inf} représentent respectivement les limites supérieures et inférieures de variation d'un descripteur alors :

$$U_i^0 = (U_{sup} + U_{inf}) / 2 ;$$



$$\Delta U = (U_{\text{sup}} - U_{\text{inf}}) / 2$$

U_i^0 représente la variable réelle au centre du domaine expérimental et ΔU , l'écart maximal.

Les coefficients du modèle sont calculés par la loi des moindres carrés, à partir d'un logiciel « NEMROD » mis au point par le laboratoire de prospective réactionnelle et d'analyse de l'information de l'Université d'Aix-Marseille.

La qualité de la prévision sera testée par trois critères :

- l'écart-type de l'estimation sur la réponse (σ_T),
- le coefficient de régression multiple ajusté au carré (R^2A),
- les courbes des résidus permettant de visualiser l'écart entre le taux expérimental et le taux calculé à partir du modèle postulé et ceci pour chacun des échantillons.

II. 2.3 Domaine Expérimental

Le taux du sulfate d'aluminium peut être influencé de manière générale par plusieurs facteurs expérimentaux :

- Turbidité colloïdale.
- Température
- TAC

Les trois facteurs retenus après le criblage sont testés à trois niveaux comme indiqués dans le tableau 8 (domaine expérimental).

Afin de réaliser un plan d'expériences, il faut définir les variables centrées réduites qui permettent de représenter sous forme de matrice les différents essais à mener. La variable centrée réduite x correspond à un changement de variable tel que :

$$x = (A - A_0) / P$$

Où :

A : Valeur de la variable d'origine

A_0 : Valeur médiane de l'intervalle étudié

Tableau 8: Domaine expérimental

	Facteur	Unité	Centre	Pas de variation
U1	Turbidité colloïdale	NTU	146.00	144.00
U2	Température	°C	17.00	6.00
U3	TAC	°F	12.50	2.50

II .2.4 Réponse expérimentale

Tableau 9 : Réponse expérimentale

	Réponse	Unité
--	---------	-------



Y1	Taux du coagulant	mg/l
----	-------------------	------

Un plan d'expérience classique permettant d'estimer les 10 paramètres inconnus d'un tel modèle est le plan BOX BENKHEN donné ci-dessous. Il est donc nécessaire de réaliser un total de 15 expériences avec 3 expériences au centre pour pouvoir évaluer l'erreur expérimentale.

II.2.5 Matrice d'expériences

Tableau 10: Matrice d'expériences

N°Exp	X1	X2	X3	Y1
1	-1.0000	-1.0000	0.0000	15.00
2	1.0000	-1.0000	0.0000	115.00
3	-1.0000	1.0000	0.0000	10.00
4	1.0000	1.0000	0.0000	100.00
5	-1.0000	0.0000	-1.0000	15.00
6	1.0000	0.0000	-1.0000	110.00
7	-1.0000	0.0000	1.0000	10.00
8	1.0000	0.0000	1.0000	105.00
9	0.0000	-1.0000	-1.0000	95.00
10	0.0000	1.0000	-1.0000	90.00
11	0.0000	-1.0000	1.0000	85.00
12	0.0000	1.0000	1.0000	80.00
13	0.0000	0.0000	0.0000	75.00
14	0.0000	0.0000	0.0000	80.00
15	0.0000	0.0000	0.0000	80.00

L'analyse statistique conduit à la table d'analyse de la variance suivante :

II.2.6 Analyse de la variance : réponse Y1 : Taux du coagulant

Tableau11 : Analyse de la variance : réponse Y1:Taux du coagulant

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	2.05183E+0004	9	2.27981E+0003	273.5778	< 0.01 ***
Résidus	4.16667E+0001	5	8.33333E+0000		
Validité	2.50000E+0001	3	8.33333E+0000	1.0000	53.4



Erreur	1.66667E+0001	2	8.33333E+0000		
Total	2.05600E+0004	14			

D'après l'ANOVA 1 $p < 5\%$ et $VREG > VRES$ donc l'ANOVA 1 est vérifiée on peut juger la validité du modèle d'après l'ANOVA 2, le $p > 5\%$ et $VLOF = VPE$ donc l'erreur due au modèle égale à l'erreur expérimental, donc le modèle est jugé validé (voir tableau 10).

La somme des carrés due à l'erreur est très faible devant la somme totale. Ceci indique que le

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
-----	-------------	-------------	------------	--------	-----------

modèle semble être bien ajusté. Le tableau d'analyse de la variance proposé ici par le logiciel est plus complexe car la somme des carrés due aux résidus a été décomposée en somme due à la

Ecart Type de la réponse	2.887
R^2	0.998
R^2_A	0.994
R^2_{pred}	0.979
PRESS	437.500
Nombre de degrés de liberté	5

"validité" et somme due à l'erreur". Il s'agit d'une technique permettant d'affiner l'analyse de la variance, utilisable dès lorsqu'au moins une expérience a été répétée, et permettant de tester l'hypothèse H_0 : "le modèle est bien ajusté en moyenne". Une analyse plus fine donne ensuite les résultats ci-dessous.

II. 2.7 Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Taux du coagulant

Tableau 12 : Estimations et statistiques des coefficients : réponse Y1 : Taux du coagulant



b0	78.333		1.667	47.00	< 0.01 ***
b1	47.500	1.00	1.021	46.54	< 0.01 ***
b2	-3.750	1.00	1.021	-3.67	1.48 *
b3	-3.750	1.00	1.021	-3.67	1.48 *
b11	-22.917	1.01	1.502	-15.25	0.0109 ***
b22	4.583	1.01	1.502	3.05	2.85 *
b33	4.583	1.01	1.502	3.05	2.85 *
b12	-2.500	1.00	1.443	-1.73	14.2
b13	0.000	1.00	1.443	0.00	100.0
b23	0.000	1.00	1.443	0.00	100.0

II.2.8 Tableau des résidus : réponse Y1 : Taux du coagulant

Tableau 13 : Tableau des résidus : réponse Y1 : Taux du coagulant

N°Exp	Yexp.	Ycalc.	Différence	Normée	dU	Student-R	R-Student	D-Cook
1	15.000	13.750	1.250	0.433	0.750	0.866	0.840	0.225
2	115.000	113.750	1.250	0.433	0.750	0.866	0.840	0.225
3	10.000	11.250	-1.250	-0.433	0.750	-0.866	-0.840	0.225
4	100.000	101.250	-1.250	-0.433	0.750	-0.866	-0.840	0.225
5	15.000	16.250	-1.250	-0.433	0.750	-0.866	-0.840	0.225
6	110.000	111.250	-1.250	-0.433	0.750	-0.866	-0.840	0.225
7	10.000	8.750	1.250	0.433	0.750	0.866	0.840	0.225
8	105.000	103.750	1.250	0.433	0.750	0.866	0.840	0.225
9	95.000	95.000	-0.000	-0.000	0.750	-0.000	-0.000	0.000
10	90.000	87.500	2.500	0.866	0.750	1.732	2.449	0.900
11	85.000	87.500	-2.500	-0.866	0.750	-1.732	-2.449	0.900
12	80.000	80.000	-0.000	-0.000	0.750	-0.000	-0.000	0.000
13	75.000	78.333	-3.333	-1.155	0.333	-1.414	-1.633	0.100
14	80.000	78.333	1.667	0.577	0.333	0.707	0.667	0.025
15	80.000	78.333	1.667	0.577	0.333	0.707	0.667	0.025

II.2.9 Interprétation 2

Le calcul a conduit au modèle suivant (exprimé en variables réduites) :

$$Taux SA = 78.333 + 47.500TC - 3.750T - 3.750TAC - 22.917TC^2 + 4.583T^2 + 4.583TAC^2$$

Où :

$$\sigma_T = 2.887$$

$$R^2A = 0,994$$



Aussi bien l'écart-type que le coefficient de régression montrent que ce modèle est d'excellente qualité. Ceci est confirmé par la courbe des résidus (fig. 6 et 7). En effet, il y a 1 seul échantillon qui s'écarte de plus de 3 g/m³ du taux expérimental (de plus en surdosage, ce qui est un moindre mal) soit seulement 6,6% des échantillons et 1 autre échantillon de plus de 2 g/m³ soit 6,6% des données. Les 13 échantillons (87% environ) restants ne s'écartent pas de 1,67 g/m³ maximum. Ceci montre que l'ajustement est de très bonne qualité.

A titre d'exemple, le tableau 8 montre le taux optimum de SA calculé à partir du modèle lorsqu'une variable balaye le domaine expérimental, les autres étant au centre.

La valeur de 48,9 g/m³, par exemple, correspond à une eau ayant les caractéristiques suivantes :

TC = 74,0 NTU (X₁ = - 0,5) ; T = 17 °C (X₂ = 0) ; TAC = 12,5°F (X₃ = 0)

Dans ces cas bien précis, le taux de coagulant croît avec la turbidité et décroît avec la température et le TAC.

Dans notre cas, l'influence d'un facteur peut s'interpréter aussi facilement puisqu'il intervient non seulement de manière linéaire et/ou quadratique mais aussi par son non interaction avec un ou plusieurs autres facteurs.

La complexité de la coagulation est représentée clairement si on utilise la représentation par courbes d'isoréponse (fig. 8, 9 et 10). Dans cet exemple, les courbes représentent le taux de traitement optimum dans le plan turbidité température, l'autre variable (TAC) étant fixée.

Ainsi :

- A moyenne alcalinité (TAC = 12,5°F) le taux croît lorsque la température s'abaisse.
- A moyenne température (17 °C), le taux croît lorsque le TAC diminue.
- A moyenne turbidité (146 NTU), le taux est pratiquement constant quelle que soit la température et le TAC.

La très forte influence de la turbidité sur le taux optimum peut s'expliquer en partie par son très large domaine de variation. Par contre, la température et l'alcalinité semblent avoir moins d'influence sur la réponse.

Les différents résidus peuvent une nouvelle fois être représentés sous forme graphique :

Etude des résidus de la réponse : Y₁ : Taux du coagulant Résidus

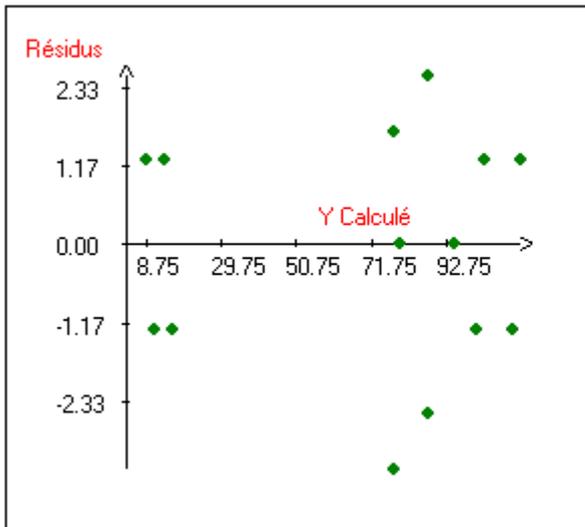


Fig.6 : Résidus =F (Y calculé)

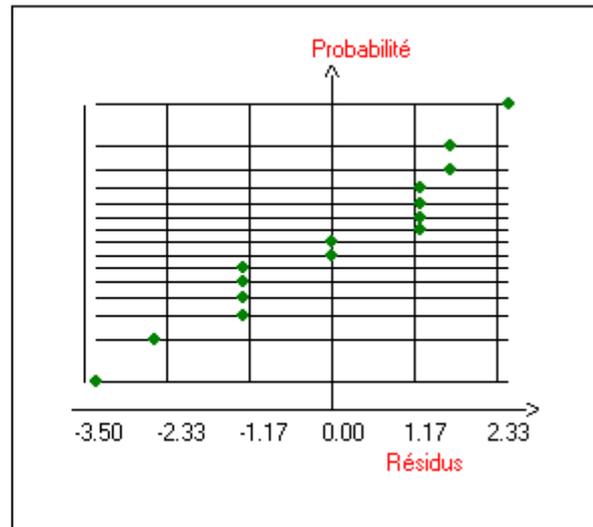


Fig. 7: Répartition des résidus sur la droite de Henry

La figure 6 montre la bonne répartition des résidus de part et d'autre de l'axe 0.

La figure 7 montre que l'ensemble des résidus se sont bien alignés sur la droite de Henry.

L'étude graphique des deux figures prouve alors que l'ensemble des résidus suit une loi normale.

La plus grande erreur d'ajustement commise (de l'ordre de -3,33) pour une réponse observée de 78,33) correspond à l'une des expériences dites "centrales" (expérience 13). Ceci était prévisible car il est impossible que la réponse moyenne prédite au centre du domaine par le modèle soit parfaitement ajustée aux trois valeurs différentes obtenues lors des trois répétitions de l'expérience 75, 80 et 80). Au sens des moindres carrés la meilleure réponse moyenne que peut prédire le modèle correspond à la moyenne de ces trois réponses, c'est à dire 78,33 ici (cette valeur est d'ailleurs très proche de celle donnée par le modèle ajusté).

Etude graphique en 2D

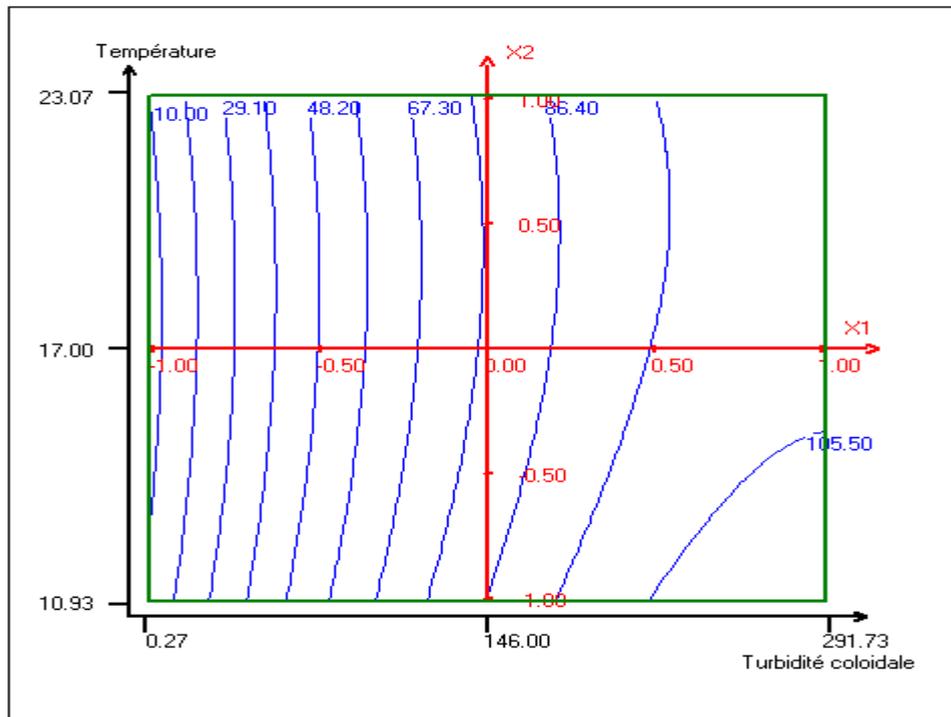


Fig.8 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Turbidité coloidale, Température

FACTEURS FIXES : - TAC = 12.50 °F

-A moyenne alcalinité (TAC = 12,5°F) le taux croît lorsque la température s'abaisse.

Etude graphique en 2D

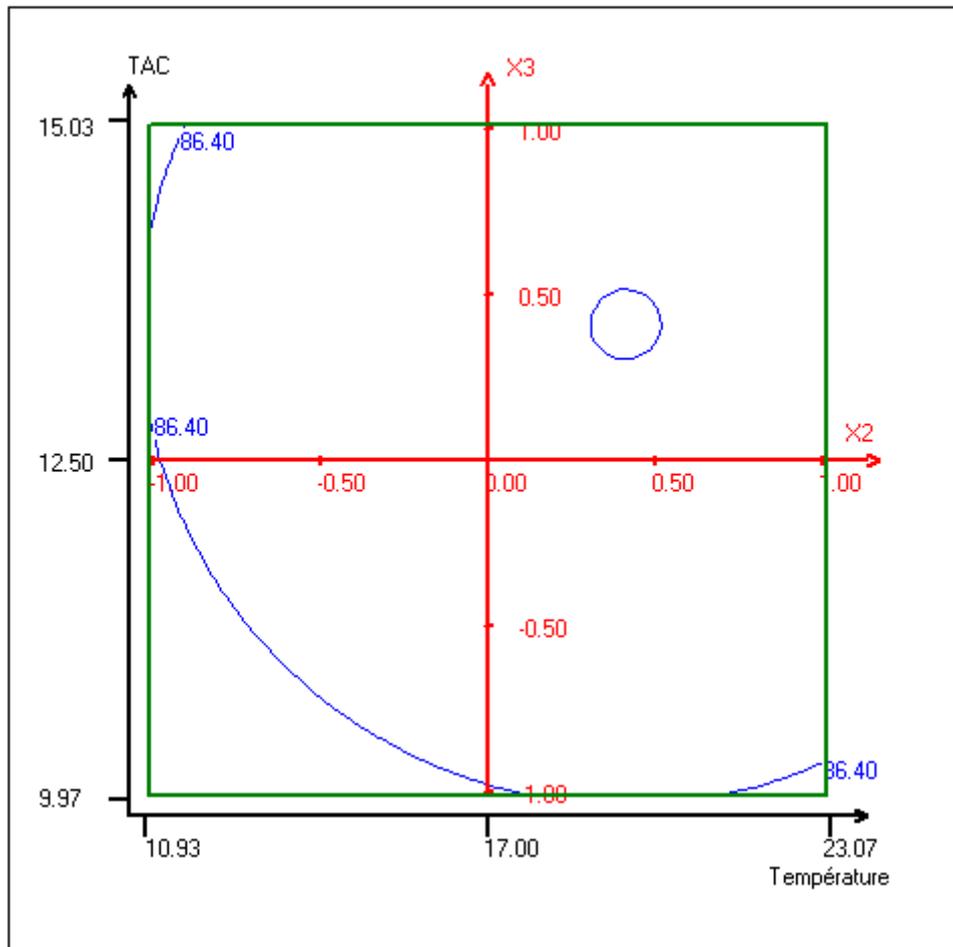


Fig.9 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Température, TAC
FACTEURS FIXES : - Turbidité coloidale = 146.00 NTU

- A moyenne turbidité (146 NTU), le taux est pratiquement constant quelle que soit la température et le TAC.

Etude graphique en 2D

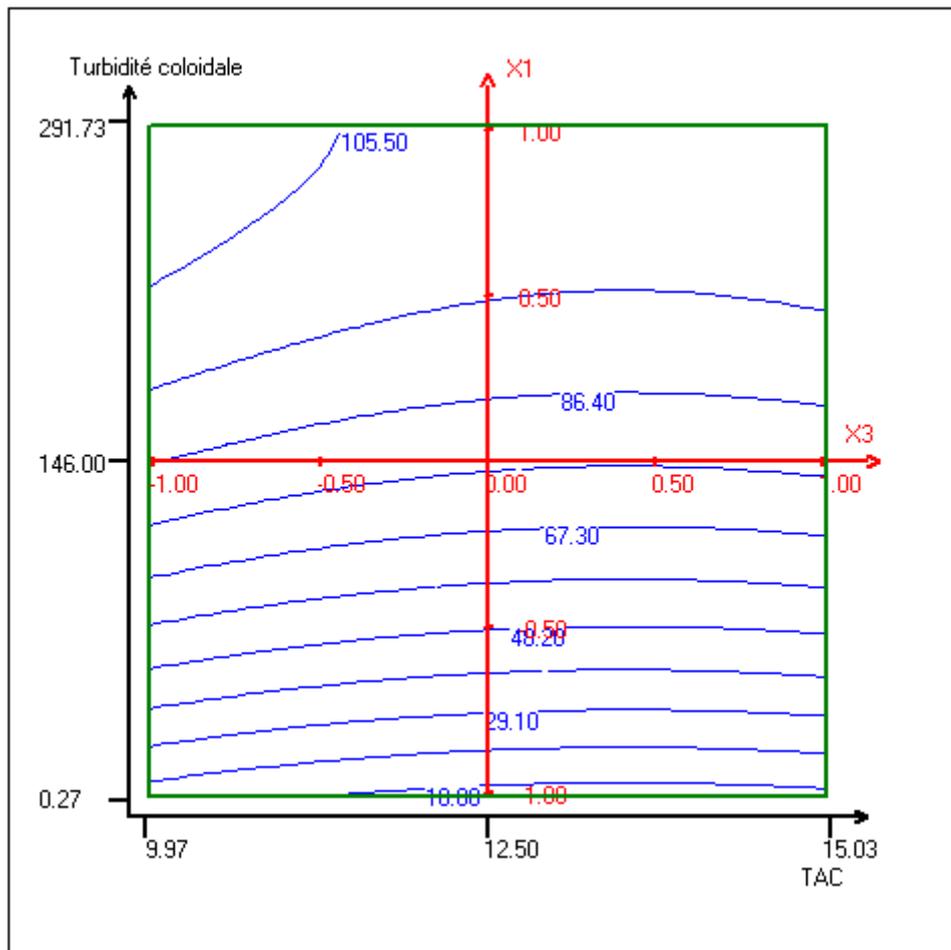


Fig.10 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : TAC, Turbidité coloidale
FACTEURS FIXES : - Température = 17.00

- A moyenne température (17 °C), le taux croît lorsque le TAC diminue.

Etude graphique en 3D

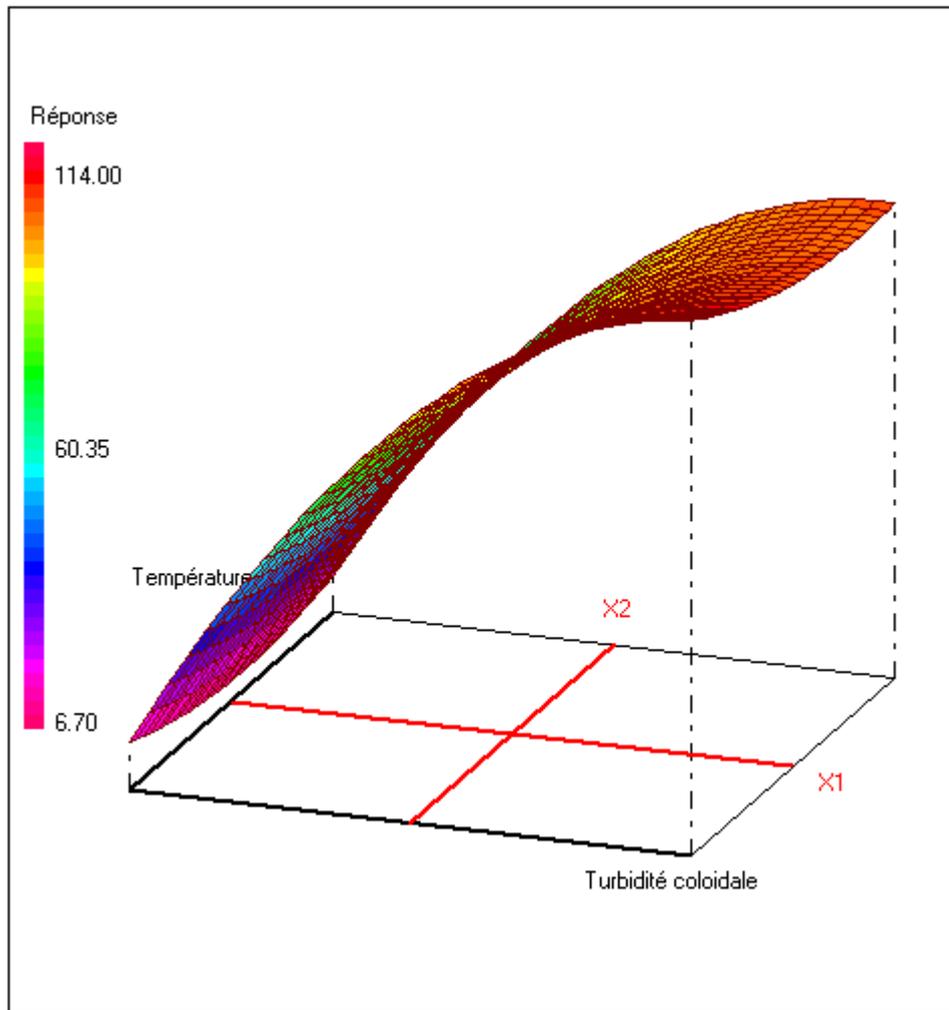


Fig.11 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Turbidité colloïdale,
Température
FACTEURS FIXES : - TAC = 12.50 °F

Etude graphique en 3D

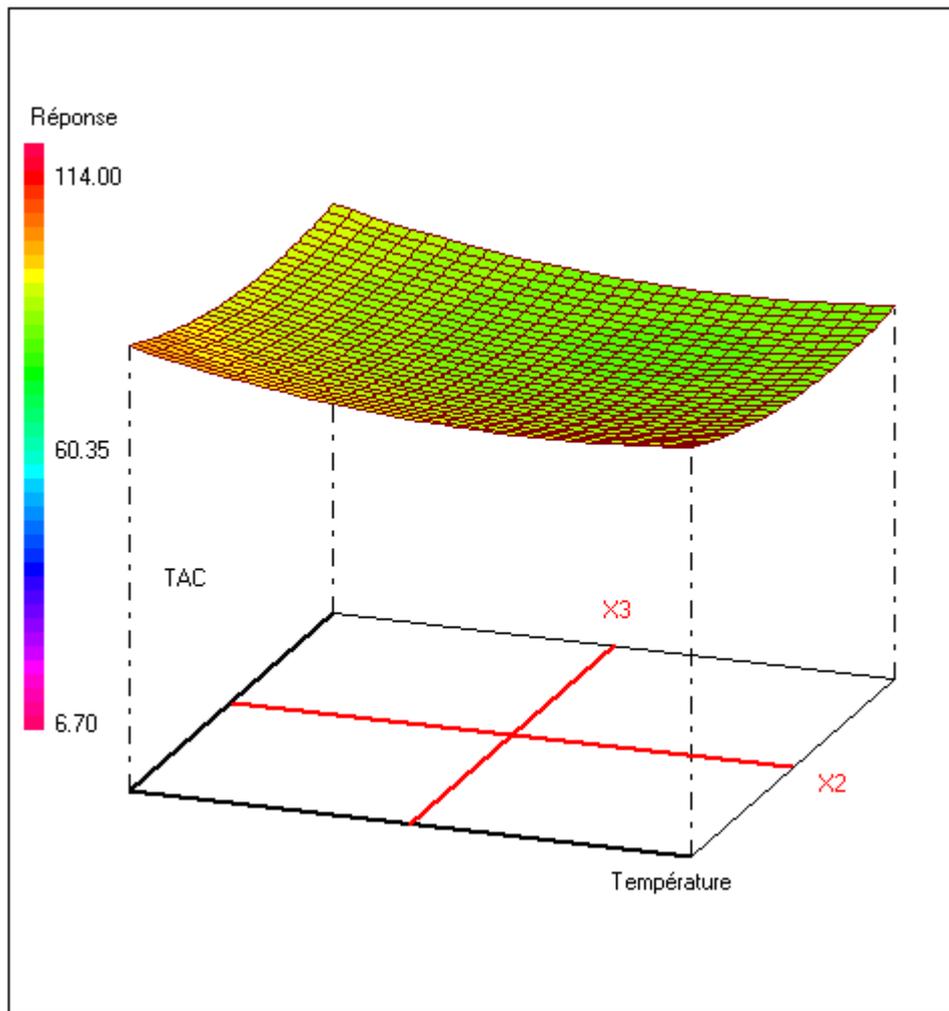


Fig.12 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : Température, TAC
FACTEURS FIXES : - Turbidité coloidale = 146.00 NTU

Etude graphique en 3D

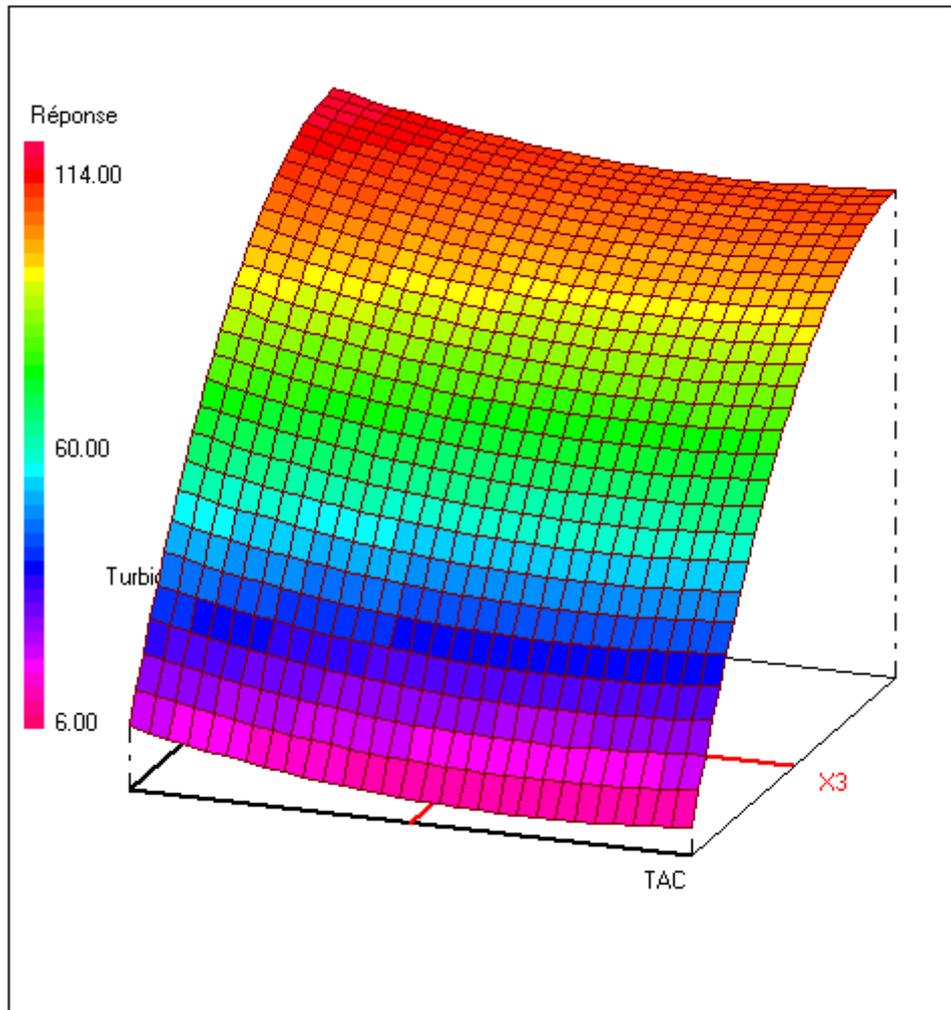


Fig.13 Variation de la réponse - Taux du coagulant dans le plan : TAC, Turbidité coloidale
FACTEURS FIXES : - Température = 17.00

Conclusion générale

Certes, les eaux de surface nécessitent une chaîne de traitement classique (préchloration.....désinfection) ; le phénomène de coagulation-floculation est critique et dépend de 5 facteurs (TC, T, TAC, pH et la matière organique).

Une étude de criblage des facteurs a montré que les facteurs les plus influents sur le phénomène étudié sont: TC, T et TAC.

Cette étude a montré qu'un modèle polynomial d'ordre deux sans interaction semble modéliser correctement le phénomène étudié ici.



Le modèle descriptif présenté et développé à partir d'essais de floculation sur l'eau de BAB LOUTA, est très intéressant puisque pour chaque échantillon testé, le taux calculé est très proche du taux expérimental. Cependant l'intérêt de telles relations ne peut être que dans leur caractère prévisionnel et dans leur adaptation en grandeur nature.

L'adaptation de cette modélisation sur la station de traitement BAB LOUTA est encourageante. En effet, le modèle trouvé nous a permis de diminuer, ces derniers jours, la consommation du sulfate d'aluminium de 5g/m³ environ et par conséquent économiser presque 147 kg de SA /jour.

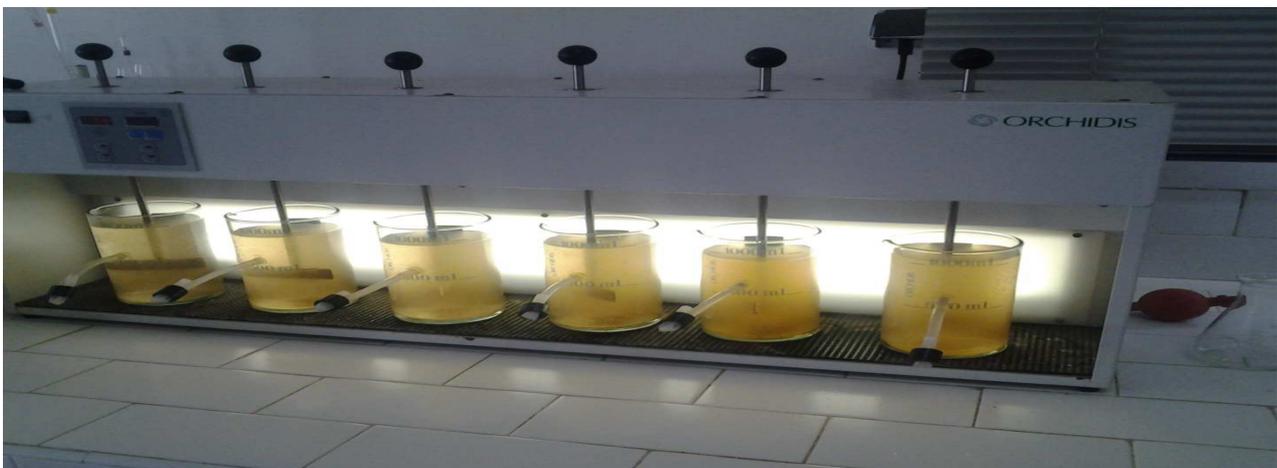
Cette modélisation, n'est bien entendu, pas universelle. Cependant, son utilisation sur des eaux aux caractéristiques proches de celles de BAB LOUTA, pourrait être envisagée. De même, sa forme avec quelques modifications, (pour tenir compte de l'invariabilité de certains paramètres) devrait inspirer bon nombre de traiteurs d'eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAZER -BACHI A. Modélisation mathématique du taux de coagulant dans une station de traitement d'eau, Revue des sciences de l'eau, 1990, 3, 377-397.
- [2] MACHKOR.MOHAMMED Rapport détaillé sur la station de traitement BAB LOUTA
- [3] Manuel de formation de l'ONEP intitulé traitement de l'eau potable coagulation –floculation code fascicule E10 05
- [4] Magalie Claeys-Bruno Matrices super saturées issues de fractions de matrices de RECHTSCHAFFNER pour l'étude d'effets d'interaction
- [5] Jacques Goupy • Lee Creighton Introduction aux plans d'expériences 3^e édition p180-181.



 ANNEXE 1



Floculateur à six postes (banc de jar test)



Turbidimètre type HACH 2100N



pH mètre type HACH SENSION3



 **ANNEXE 2**



NM 03.7.001

Norme Marocaine

2006

Qualité des eaux d'alimentation humaine



Norme Marocaine homologuée

Par arrêté conjoint du Ministre de l'Industrie, du Commerce et de la Mise à Niveau de l'Economie et du Ministre de l'Equipement et du Transport et du Ministre de la Santé N° 221-06 du 2 Février 2006, publié au B.O. N° 5404 du 16 Mars 2006.

La présente norme annule et remplace la norme NM 03.7.001 homologuée en 1991.

Correspondance

- Directives de Qualité pour l'Eau de boisson de l'OMS de 1993,
- Directive Européenne 98/83 CE du 03/11/1998 concernant la qualité des eaux destinées à la boisson
- Arrêté N° 1277-01 du 17/10/02 relatif à la fixation des normes de qualité des eaux superficielles utilisées pour la production d'eau potable.

Modifications

Elaborée par le comité technique de normalisation des eaux d'alimentation humaine
Editée et diffusée par le Service de Normalisation Industrielle Marocaine (SNIMA)

© SNIMA 2006



ANNEXE I - SPECIFICATIONS DES EAUX D'ALIMENTATION HUMAINE
(normative)

PARAMETRES A EFFET SANITAIRE

A - Paramètres bactériologiques

PARAMETRES	VMA	COMMENTAIRES
Escherichia coli	0/100 mL	Les teneurs en chlore résiduel doivent être comprises entre : 0,1 et 1 mg/l à la distribution 0,5 à 1,0 mg/l à la production
Entérocoques intestinaux	0/100 mL	

B - Substances minérales

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Nitrites	NO ₂ : mg/l	0,5	Somme des rapports : (NO ₃)/50 + (NO ₂)/3 ne doit pas dépasser 1. 0,1mg/l de NO ₂ doit être respectée au départ des installations de traitement
Nitrates	NO ₃ : mg/l	50	
Arsenic	As : µg/l	10	
Baryum	Ba : mg/l	0,7	
Cadmium	Cd : µg/l	3	

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Cyanures	CN : µg/l	70	
Chrome	Cr : µg/l	50	
Manganèse	Mn : mg/l	0,5	Plaintes du consommateur à partir de 0.1 mg/l
Cuivre	Cu : mg/l	2	Plaintes du consommateur à partir de 1 mg/l
Fluorures	F : mg/l	1,5	
Mercure	Hg : µg/l	1	
Plomb	Pb : µg /l	10	La VMA de 50 µgPb/l sera appliquée jusqu'à 2010, à partir de cette date, la VMA de 25 µgPb/l est imposable jusqu'à 2015. Au delà de 2015 c'est la VMA de 10 µgPb/l qui sera respectée.
Sélénium	Se : µg/l	10	
Bore	B : mg/l	0,3	
Nickel	Ni : µg/l	20	



NM 03.7.001

7

C - Substances organiques

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Pesticides 1- par substance individualisée	µg/l	0.1	Par «pesticides» on entend: - les insecticides organiques - les herbicides organiques - les fongicides organiques - les nématocides organiques - les acaricides organiques - les algicides organiques - les rodenticides organiques - les produits antimoisissures organiques - les produits apparentés (notamment les régulateurs de croissances) et leurs métabolites, produits de dégradations et de réaction pertinents.
A l'exception des substances - suivantes : - Aldrine, dieldrine, l'heptachlore et l'heptachlorépoxyde	µg/l	0.03	
2- et pour le total des substances mesurées	µg/l	0.5	

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Hydrocarbures polycycliques Aromatiques (HPA) total des substances suivantes: 1. Benzo(b)fluoranthène, 2. Benzo(k)fluoranthène, 3. Benzo(ghi)pérylène 4. Indénol(1.2.3-cd)pyrène	µg/l	0.1	
Benzo(a) pyrène	µg/l	0.01	
Benzène	µg/l	1	
Trihalométhanes (THM) Chloroforme Bromoforme Dibromochlorométhane Bromodichlorométhane	µg/l µg/l µg/l µg/l	200 100 100 60	Il est recommandé de plus que la somme des rapports de la concentration de chacune de ces substances à sa VMA respective ne dépasse pas 1.

D - Constituants radioactifs de l'eau

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Activité alpha globale	Bq/l	0,1	Si la VMA est dépassée il faut procéder à une analyse plus détaillée des radionucléides. Des valeurs plus élevées ne signifient pas nécessairement que l'eau est impropre à la consommation.
Activité bêta globale	Bq/l	1	



**PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES INDICATEURS DU FONCTIONNEMENT
DES INSTALLATIONS ET DE L'EFFICACITE DE TRAITEMENT**

E – Paramètres bactériologiques

Coliformes	0/100 mL	- Pas de coliformes dans 95 % des échantillons prélevés sur une période de 12 mois - Pas de résultats positifs dans deux échantillons consécutifs
Spores de micro-organismes anaérobies sulfito-réducteurs (clostridia)	0/100 mL	Ce paramètre doit être mesuré lorsque l'eau est d'origine superficielle ou influencée par une eau d'origine superficielle.
Micro-organismes revivifiables à 22 °C et 37 °C	20/1 mL à 37 °C 100/1 mL à 22 °C	Variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle



**SUBSTANCES INDESIRABLES ET/OU POUVANT DONNER LIEU A DES
PLAINTES**

F : Paramètres physico-chimiques

PARAMETRES	EXPRESSION DES RESULTATS	VMA	COMMENTAIRES
Odeur	Seuil de perception à 25 °C	3	
Saveur	Seuil de perception à 25 °C	3	
Couleur réelle	Unité Pt mg/l	20	
Turbidité	Unité de turbidité néphélométrique (NTU)	5	Turbidité médiane ≤ 1 NTU et Turbidité de l'échantillon ≤ 5 NTU.
Température	°C	Acceptable	
Potentiel hydrogène	Unités pH	$6,5 < \text{pH} < 8,5$	Pour que la désinfection de l'eau par le chlore soit efficace, le pH doit être de préférence < 8
Conductivité	$\mu\text{S/cm}$ à 20 °C	2700	
Chlorures	Cl : mg/l	750	
Sulfates	SO ₄ : mg/l	400	
Oxygène dissous	O ₂ : mg O ₂ /l	$5 \leq \text{O}_2 \leq 8$	
Aluminium	Al : mg/l	0,2	
Ammonium	NH ₄ : mg/l	0,5	
Oxydabilité au KMnO ₄	O ₂ : mg O ₂ /l	5	La valeur de 2 mg O ₂ /l doit être respectée au départ des installations de traitement
Hydrogène sulfuré		Non détectable organoleptiquement	
Fer	Fe : mg/l	0,3	
Zinc	Zn : mg/l	3	