

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**École Nationale Polytechnique (ENP)
Département d'hydraulique
Laboratoire de Recherches en Sciences
de l'eau : (LRS-EAU)**



MEMOIRE DE MAGISTER EN SCIENCES DE L'EAU.

Présenté par:

**Mr. MAKHLOUFI Noureddine
Ingénieur d'état en hydraulique ENSH.**

THEME:

**MODELISATION DES PARAMETRES
PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COAGULATION
FLOCCULATION POUR LES EAUX POTABLES**

Soutenu le: 14.12.2011 devant le jury:

| | | |
|--------------------|-----------------------------|---|
| Président: | Mr. KERBACHI Rabah | Professeur, ENP |
| Examineurs: | Mr. BENRACHDI Khaled | Professeur, Université de Bumerdes |
| | Mr. OUAGUED Abdellah | Professeur, Université de Chlef |
| | Mr. LOUNICI Hakim | Professeur, Université de Tizi Ouzou |
| | Mlle. ARRAR Djazia | MC (A), ENP |
| Rapporteur: | Mr. KETTAB Ahmed | Professeur, ENP |

ENP 10, Avenue Hassen Badi EL-HARRACH ALGER

Dédicace:

Je dédis ce travail à ma **mère**, que dieu la protège et a mon **père**, que dieu l'accueille en son vaste paradis, mes parents qui m'ont encouragé à aller de l'avant et qui m'ont donné tout leur amour pour continuer mes études. A mes frères et sœurs, et toute ma famille.

A ma femme, mon fils Moncif et toute ma belle famille.

A mes collègues et frères: Hassan, Abdelkader, Rachid et tous les autres.

A toute personne que j'aime.

Remerciements:

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur **KETTAB** Ahmed, professeur et chef de laboratoire de recherche en sciences de l'eau à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'être le directeur de cette thèse, pour sa disponibilité et sa gentillesse.

Avant tout, je remercie messieurs les membres du jury (Mr. **KERBACHI** Rabah. Mr. **BENRACHDI** Khaled. Mr. **OUAGUED** Abdellah. Mr. **LOUNICI** Hakim. Mlle. **ARRAR** Djazia) pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance.

Les travaux présentés n'auraient probablement pu aboutir sans la collaboration de l'équipe de la station de traitement des eaux de Boudouaou (wilaya de Boumerdes). Je tiens donc à remercier Monsieur **Dellala** mohamed nabi, chef de service exploitation et tous le personnel de son service pour leur accueil au sein de la station. Je tiens particulièrement à remercier Monsieur **Boumchedda** Rachid, chef de laboratoire de m'avoir fait confiance et me permettre de traiter les résultats expérimentaux.

Je remercie Monsieur **Abderezak** de la station de traitement des eaux de Médéa, pour son aide et son bon accueil.

Un grand merci à mes parents, tous les membres de ma famille et ma belle famille pour leur soutien.

Toute ma reconnaissance à mes collègues: **Boujellal** Hassen, **Bouزيدani** Ibrahim, et tous les autres, pour leurs conseils et leurs aides quotidiennes.

ملخص:

تعتبر طريقة التختير معقدة جدا. فلإيجاد تركيز المحلول المختبر في محطات تصفية المياه، نضطر إلى اللجوء إلى عملية تختير نموذج باستعمال جهاز التختير، لوجود تأثير كبير من طرف بعض العوامل الفيزيوكيميائية على هذه العملية والتي تتغير باستمرار. تتمثل دراستنا إذن في إيجاد علاقة رياضية نتعرف بواسطتها على تركيز المحلول المختبر بمعرفة كمية مختلف العوامل في المياه الموجهة للتصفية.

أنجزنا عملنا هذا على المياه المصفاة في محطة تصفية المياه لبلدية بودواو (ولاية بومرداس)، على نتائج سلسلة تجارب لمدة 5 سنوات (من 2004 إلى 2008)، وأخذنا بعين الاعتبار العوامل التالية: درجة الحرارة، كمون الهيدروجين، الناقلية، التعكر، العامل الألكالمتري العام، الأوكسجين المنحل، التي يمكن أن تؤثر في عملية التختير. وبالنسبة للعلاقات الرياضية، استعنا ببرنامج يدعى (Origin Pro v8). وطريقة مخططات التجارب.

كلمات افتتاحية: نمذجة، عوامل فيزيوكيميائية، عملية التختير، المياه الصالحة للشرب.

Résumé

Le procédé de coagulation floculation est très complexe. Pour trouver la concentration du coagulant à injecter dans l'eau, l'opérateur de la station de traitement des eaux potables se trouve obligé de faire un essai de coagulation floculation à l'aide du jar test, à cause de l'influence de quelques paramètres physico-chimiques sur ce procédé, qui peuvent changer d'un jour à l'autre.

Notre étude consiste donc à trouver un modèle mathématique à l'aide duquel on peut estimer la concentration du coagulant en sachant les valeurs des différents paramètres physico-chimiques de l'eau brute.

On a travaillé sur l'eau traitée dans la station de traitement des eaux potables de Boudouaou (Wilaya de Boumerdes), sur les résultats trouvés de 5 ans (de 2004 à 2008) et on a pris en considération les paramètres: température, pH, conductivité, turbidité, TAC et l'oxygène dissous, qui peuvent influencer la coagulation floculation.

Et pour les modèles on a utilisé un logiciel qui s'appelle (Origin Pro v8), et la méthode des plans d'expériences.

Mot clés: Modélisation, Paramètres physico-chimiques, Coagulation floculation, Eaux potables.

Abstract:

The process of coagulation floculation is very complex. To find the concentration of the coagulant to be injected into water, the operator of the station of treatment of drinking water is obliged to carry out a test of coagulation floculation by the gravel bank test, because of the influence of few physico-chemical parameters on this process, which can change every day.

So, our study consists in finding a mathematical model which one can estimate the concentration of the coagulant by knowing the values of the various physico-chemical parameters of a raw water.

We worked on a water treated in the station of treatment of drinking water of Boudouaou (Wilaya of Boumerdes), on the found results of 5 years (2004 to 2008) and we took into account the parameters: temperature, pH, conductivity, turbidity, TAC and the dissolved oxygen, which can influence the coagulation floculation process.

And for the models we used a software called (Origin Pro v8), and experience plans methode.

Key words: Modeling, Physico-chemical parameters, Coagulation floculation, Drinking water.

Table des matières:

| | |
|---|-----------|
| Dédicace..... | 1 |
| Remerciements..... | 2 |
| Résumés | 3 |
| Table des matières..... | 4 |
| Liste des tableaux..... | 7 |
| Liste des figures..... | 8 |
| Liste des abréviations..... | 10 |
| Introduction générale..... | 11 |
| Chapitre I: Généralités sur les eaux | 13 |
| I-1 L'eau potable..... | 14 |
| I-2 L'eau potable et les normes..... | 14 |
| I-3 Qualité générale des eaux issues de diverses sources d'approvisionnement..... | 15 |
| I-3-1 Eaux de pluie..... | 15 |
| I-3-2 Eaux de surface..... | 15 |
| I-3-2-1 Eaux de rivières (partie amont) | 15 |
| I-3-2-2 Eaux de rivières (partie avale) | 15 |
| I-3-2-3 Eaux de lac..... | 16 |
| I-3-3 Eaux souterraines..... | 16 |
| I-3-4 Eaux de mer..... | 16 |
| I-4 La composition chimique d'une eau..... | 16 |
| I-4-1 Les matières minérales..... | 16 |
| I-4-2 Les matières organiques..... | 17 |
| I-5 Le cycle de l'eau dans la nature..... | 17 |
| I-6 Le cycle de l'eau de consommation..... | 18 |
| I-7 La pollution de l'eau..... | 18 |
| I-7-1 Types de pollution de l'eau..... | 18 |
| I-7-1-1 Matières minérales en suspension (MES) | 18 |
| I-7-1-2 Matières organiques oxydables..... | 19 |
| I-7-1-3 Matières toxiques..... | 19 |
| I-7-1-4 Pollution par les ions nitrates..... | 19 |
| I-7-1-5 Pollution par les ions phosphates..... | 20 |
| I-7-1-6 Pollution par les pesticides et herbicides..... | 20 |
| I-7-1-7 Assainissement des eaux usées..... | 20 |
| I-7-2 Exemples de contributions à la pollution..... | 21 |
| Chapitre II: Aperçu sur le traitement des eaux..... | 22 |
| II-1 Historique du traitement des eaux..... | 23 |
| II-2 Procédés de traitement des eaux..... | 23 |
| II-2-1 Procédés physiques et physico-chimiques..... | 24 |
| II-2-2 Procédés chimiques..... | 24 |
| II-2-3 Procédés biologiques..... | 25 |
| II-2-4 Procédés membranaires..... | 25 |
| II-3 Etapes et unités de traitement d'une eau de surface..... | 28 |
| Chapitre III: Le traitement de coagulation floculation..... | 29 |
| III-1 Introduction..... | 30 |
| III-2 Historique de la coagulation..... | 30 |
| III-3 But de la coagulation floculation..... | 31 |
| III-4 Pratique de la coagulation floculation..... | 33 |
| III-4-1 A travers le monde..... | 33 |
| III-4-2 En Algérie..... | 34 |
| III-5 Quelques définitions..... | 35 |

| | | |
|--|--|-----------|
| III-5-1 | Les particules colloïdales..... | 35 |
| III-5-2 | Les différents types de colloïdes..... | 35 |
| III-5-3 | Théorie de la double couche..... | 37 |
| III-5-4 | Potentiel de Nernst..... | 37 |
| III-5-5 | Potentiel Zêta..... | 37 |
| III-5-6 | Les différentes forces existantes entre les particules colloïdales..... | 38 |
| III-5-6-1 | Forces de Van der Waals..... | 38 |
| III-5-6-2 | Force de répulsion..... | 38 |
| III-5-6-3 | Energie potentielle totale d'interaction..... | 38 |
| III-5-7 | Décantation des suspensions colloïdales..... | 39 |
| III-6 | La coagulation..... | 40 |
| III-6-1 | Principe de la coagulation..... | 40 |
| III-6-2 | Réactifs coagulants..... | 42 |
| III-6-3 | Principaux réactifs coagulants..... | 43 |
| III-6-3-1 | Les coagulants minéraux..... | 43 |
| III-6-3-2 | Les coagulants organiques de synthèse..... | 44 |
| III-6-4 | Exemple de quelques coagulants..... | 44 |
| III-6-5 | Avantages et inconvénients de divers coagulants chimiques..... | 46 |
| III-6-6 | Le meilleur coagulant pour un système domestique de traitement..... | 46 |
| III-7 | La floculation..... | 47 |
| III-7-1 | Types de Floculation..... | 47 |
| III-7-1-1 | Floculation péricinétique..... | 47 |
| III-7-1-2 | Floculation orthocinétique..... | 47 |
| III-7-2 | Les adjuvants de floculation ou floculants..... | 48 |
| III-7-3 | Exemple de quelques floculants..... | 48 |
| III-8 | Conclusion..... | 49 |
| Chapitre IV: Paramètres influençant la coagulation floculation..... | | 50 |
| IV-1 | Effet de la coagulation sur les paramètres de l'eau..... | 51 |
| IV-2 | Facteurs intervenant dans la coagulation des particules en suspension..... | 51 |
| IV-3 | Paramètres influençant la coagulation floculation..... | 54 |
| IV-3-1 | Facteurs liés à la qualité de l'eau brute..... | 54 |
| IV-3-1-1 | La nature de la couleur et de la turbidité et leur proportion relative dans l'eau brute..... | 54 |
| IV-3-1-2 | La température..... | 54 |
| IV-3-1-3 | L'influence du pH..... | 56 |
| IV-3-1-4 | Effets de l'alcalinité..... | 57 |
| IV-3-1-5 | Effets des sels dissous..... | 57 |
| IV-3-1-6 | L'influence de la minéralisation..... | 57 |
| IV-3-2 | Facteurs liés au traitement..... | 58 |
| IV-3-2-1 | La nature et le dosage du coagulant..... | 58 |
| IV-3-2-2 | Les conditions d'agitation..... | 58 |
| IV-3-2-3 | La nature et le dosage de l'aide coagulant..... | 59 |
| Chapitre V: Méthodes et moyens utilisés..... | | 60 |
| V-1 | Interférences..... | 61 |
| V-2 | Travail au laboratoire..... | 61 |
| V-2-1 | Principe..... | 61 |
| V-2-2 | Réactifs..... | 61 |
| V-2-3 | Appareillage..... | 61 |
| V-2-4 | Préparation et conservation des échantillons..... | 62 |
| V-2-5 | Mode opératoire..... | 62 |
| V-3 | Manipulation..... | 63 |

| | | |
|----------------------------|---|-----------|
| V-4 | Exploitations et interprétations..... | 64 |
| V-4-1 | PH de coagulation..... | 64 |
| V-4-2 | Choix du polymère..... | 64 |
| Chapitre VI: | Interprétation des résultats expérimentaux et modélisation..... | 67 |
| VI-1 | Introduction..... | 68 |
| VI-2 | Interprétation des résultats..... | 68 |
| VI-3 | Modélisation..... | 73 |
| VI-3-1 | Première méthode: Modélisation en utilisant le logiciel OriginPro | 73 |
| VI-3-2 | Deuxième méthode: Méthode des plans d'expériences..... | 79 |
| VI-3-2-1 | Application de la méthode sur la station de Boudouaou..... | 82 |
| Chapitre VII: | Recommandations..... | 85 |
| VII-1 | Recommandations..... | 86 |
| VII-2 | Pilotage du traitement de coagulation floculation..... | 87 |
| VII-2-1 | Automatisation du pH..... | 87 |
| Conclusion générale | | 88 |
| Bibliographie | | 90 |
| Sites Web | | 93 |
| Annexes | | 95 |
| Annexe 1: | Courbe d'élimination de la turbidité | 96 |
| Annexe 2: | Références des figures | 97 |
| Annexe 3: | Résultats mensuels des différents paramètres (station Boudouaou)..... | 98 |

Liste des tableaux:

| | | |
|-------|---|----|
| I-1 | Sources annuelles d'azote en France en millions de tonnes..... | 19 |
| I-2 | Contribution à la pollution organique des eaux de certaines industries (France 1991).... | 21 |
| I-3 | Contribution à la pollution toxique des eaux de certaines industries (France 1991)..... | 21 |
| II-1 | Etapes et unités de traitement d'une eau de surface..... | 28 |
| III-1 | Evolution de la qualité physico-chimique de l'eau brute, de l'eau décantée et de l'eau traitée de Souk el djemaa..... | 34 |
| III-2 | Temps de décantation des colloïdes en fonction du diamètre..... | 39 |
| III-3 | Interaction entre deux particules en fonction de la distance les séparant..... | 40 |
| III-4 | Perte d'alcalinité et production de CO ₂ de quelques coagulants..... | 42 |
| III-5 | Avantages et inconvénients de divers coagulants chimiques..... | 46 |
| IV-1 | pH optimum pour la coagulation floculation | 56 |
| V-1 | Note de la floculation..... | 64 |
| V-2 | Fiche à remplir lors du procédé de coagulation floculation..... | 66 |
| VI-1 | Coefficients de corrélation pour chaque modèle | 78 |
| VI-2 | Exemple de présentation de plans d'expériences de trois facteurs à deux niveaux | 80 |
| VI-3 | Plan composite centré pour deux facteurs | 82 |
| VI-4 | Présentation des plans composites centrés..... | 83 |
| VI-5 | Répartition statistique des données dans le domaine expérimental étudié..... | 84 |

Liste des figures:

| | | |
|----------|--|----|
| I-1 | Le cycle de l'eau dans la nature..... | 17 |
| I-2 | Le cycle de l'eau de consommation..... | 18 |
| II-1 | Schéma représentant les différentes fonctions des filtrations..... | 27 |
| II-2 | Procédés de traitement des eaux..... | 27 |
| III-1 | Temps de décantation des particules..... | 30 |
| III-2 | La coagulation floculation..... | 31 |
| III-3 | Représentation du colloïde hydrophile..... | 36 |
| III-4 | Double couche d'une particule colloïdale..... | 37 |
| III-5 | Diagramme de l'énergie potentielle d'interaction entre deux particules..... | 38 |
| III-6 | La barrière énergétique..... | 40 |
| III-7 | Potentiels électrostatiques..... | 41 |
| IV-1 | Solubilité de Al en fonction du pH et du TAC (après filtration sur 0.2 micron)..... | 57 |
| V-1 | Le jar test..... | 62 |
| V-2 | Prélèvement des échantillons pour analyse..... | 63 |
| V-3 | Note de floculation..... | 65 |
| Fig VI-1 | Evolution de la température et de la dose du coagulant en fonction du temps..... | 69 |
| Fig VI-2 | Evolution du pH et de la dose du coagulant en fonction du temps..... | 69 |
| Fig VI-3 | Evolution de la conductivité et de la dose du coagulant en fonction du temps..... | 70 |
| Fig VI-4 | Evolution de la turbidité et de la dose du coagulant en fonction du temps..... | 71 |
| Fig VI-5 | Evolution de TAC et de la dose du coagulant en fonction du temps..... | 71 |
| Fig VI-6 | Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (introduction des données et établissement des courbes)..... | 73 |
| Fig VI-7 | Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (modélisation à partir des données et courbes établies)..... | 74 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Fig VI-8 | Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (visualisation des résultats)..... | 75 |
| Fig VI-9 | Courbe de variation de SA en fonction de la température..... | 76 |
| Fig VI-10 | Courbe de variation de SA en fonction du pH..... | 76 |
| Fig VI-11 | Courbe de variation de SA en fonction de la conductivité..... | 77 |
| Fig VI-12 | Courbe de variation de SA en fonction de la turbidité..... | 77 |
| Fig VI-13 | Courbe de variation de SA en fonction de TAC..... | 78 |
| Fig VI-14 | Domaine de variation d'un facteur..... | 79 |
| Fig VI-15 | Différents essais effectués pour l'établissement de plans d'expériences..... | 82 |

Liste des abréviations:

| | |
|-----|--|
| CAP | Charbon actif en poudre |
| CMA | Concentration maximale admissible |
| COT | Carbone organique total |
| C | Conductivité |
| Eh | Equivalent habitant |
| MES | Matières en suspension |
| MO | Matières organiques |
| NCF | Nombre de coliformes fécaux |
| NCT | Nombre de coliformes totaux |
| R | Coefficient de corrélation |
| SA | Dose du coagulant |
| TA | Titre alcalimétrique complet (teneur totale en ions HCO_3^- CO_3^{2-} et OH^-) en °F |
| T | Température en °C |
| TU | Turbidité en NTU |
| UV | Ultra violet |

Introduction générale

Introduction générale:

L'eau recouvre 70 % de la superficie du globe, mais malheureusement 97 % de cette eau est salée et non potable et ne convient pas à l'irrigation ni à la consommation. L'eau douce, représente 3 % de l'eau totale de notre planète. Dans ce faible pourcentage, les rivières et les lacs représentent 0.3 %, alors que tout le reste est stocké dans les calottes polaires glaciaires.

Un des facteurs majeurs qui gouvernent le développement des sociétés humaines est la préoccupation d'obtenir et de maintenir une provision adéquate d'eau. Le fait de disposer d'une quantité d'eau suffisante, des sociétés ont dominé les premières phases de développement.

L'eau est le composé le plus abondant sur la surface du globe. Sans elle, la vie comme nous le savons cesserait d'exister. Elle est essentielle à la vie et au bien-être, ses ressources sont précieuses et rares, c'est pourquoi elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée.

Cependant, les augmentations des populations ont poussé à puiser de façon intensive dans les sources en surface de bonnes qualités mais qui sont en quantités limitées ou les ont contaminées. La qualité de l'eau ne pourra plus être oubliée dans le processus de développement. La conséquence inévitable de l'augmentation de la population et du développement économique est le besoin de concevoir des installations de traitement de l'eau pour fournir une eau de qualité acceptable issue de sources en surface contaminées.

Ces installations de traitement des eaux, demandent d'être mieux développées pour augmenter les quantités d'eau traitée et faciliter les différentes étapes de traitement, par la réunion d'un certain nombre de branches de la science, à savoir: l'hydraulique, la chimie, la biologie, l'informatique,... Parmi les étapes de traitement de l'eau nous avons le procédé de coagulation floculation qui est gros au modo l'obtention de grosses particules pour pouvoir les éliminées par décantation par la suite. Dans cette étape de traitement, l'opérateur utilise un appareil qui s'appelle le jar test aidant à avoir la concentration optimale du coagulant, qui est une opération presque quotidienne et fatigante (routine) parce qu'elle est influencée par plusieurs paramètres physico-chimiques.

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.

A partir de cette étude on va essayer de modéliser quelques paramètres influençant ce procédé pour pouvoir prédire au futur la concentration du coagulant sans avoir besoin de passer par le jar test.

Nous avons divisé notre travail par plusieurs chapitres à savoir:

1. Chapitre I: Généralités sur les eaux.
2. Chapitre II:Aperçu sur le traitement des eaux.
3. Chapitre II:Le traitement de coagulation floculation.
4. Chapitre IV:Paramètres influençant la coagulation floculation.
5. Chapitre V:Méthodes et moyens utilisés.
6. Chapitre VI:Interprétation des résultats expérimentaux et modélisation.
7. Chapitre VII:Recommandations.

Chapitre I: Généralités sur les eaux

I-1-L'eau potable:

Toutes les eaux de la nature ne sont pas bonnes à boire. Même une eau d'apparence limpide, transporte en son sein toutes sortes de substances inertes et vivantes, dont certaines peuvent être nocives pour l'organisme humain. Ces substances proviennent soit du milieu physique dans lequel l'eau a évolué, soit des rejets de certaines activités humaines dont l'eau est devenue le récepteur.

L'eau est ainsi le vecteur de transmission privilégié de nombreuses maladies. Pour pouvoir être consommée sans danger, l'eau doit donc être traitée. Mais la pollution croissante des réserves d'eau rend cette opération de plus en plus délicate, obligeant les traiteurs d'eau à constamment innover les techniques de traitement de l'eau. Ces dernières ont d'ailleurs beaucoup évolué, faisant aujourd'hui du traitement de l'eau une industrie de pointe.

I-2-L'eau potable et les normes:

L'eau utilisée pour la production d'eau destinée à la consommation humaine contient un très grand nombre de composants à éliminer totalement ou partiellement: matières en suspension (MES), matières organiques (MO), micropolluants organiques et/ou minéraux, et micro-organismes (bactéries, virus...). Mais elle contient aussi des éléments bénéfiques pour la santé (calcium, magnésium, sels minéraux). Il est donc nécessaire de caractériser précisément sa composition afin de connaître les paramètres à corriger, et pouvoir la traiter correctement. Les traitements visent, non seulement à éliminer les composants indésirables, mais aussi à améliorer les qualités organoleptiques de l'eau, et à limiter les phénomènes de corrosion ou d'entartrage des équipements et des réseaux.

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque sur la santé. Afin de définir précisément une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances nocives.

Selon ces normes, une eau potable doit être exempte de germes pathogènes (bactéries, virus) et d'organismes parasites. Elle ne doit contenir certaines substances chimiques qu'en quantité limitée (substances indésirables ou toxiques), comme les nitrates et les phosphates, les métaux lourds, ou encore les hydrocarbures et les pesticides, pour lesquelles des concentrations maximales admissibles ont été définies. À l'inverse, la présence de certaines substances peut être jugée nécessaire comme les oligo-éléments indispensables à l'organisme.

Une eau potable doit aussi être agréable à boire (elle doit être claire, et avoir un bon goût). Pour avoir un bon goût, il faut que l'eau contienne un minimum de sels minéraux dissous (de 0,1 à 0,5 g/l), lesquels sont par ailleurs indispensables à l'organisme. Enfin, elle ne doit pas corroder les canalisations afin d'arriver propre à la sortie des robinets.

Les normes ne font donc que définir, à un moment donné, un niveau de risque acceptable pour une population donnée. Elles dépendent par ailleurs étroitement des connaissances scientifiques et des techniques disponibles, notamment dans le domaine des risques sanitaires et dans celui de l'analyse chimique. Elles peuvent donc être modifiées à tout moment en fonction des progrès réalisés.

Tous les pays du monde ne suivent pas les mêmes normes. Certains édictent leurs propres normes, d'autres adoptent celles conseillées par l'organisation mondiale de la santé (OMS). En Europe, elles sont fixées par la commission des communautés européennes.

I-3-Qualité générale des eaux issues de diverses sources d'approvisionnement:

On retrouve quatre sources principales des eaux brutes:

- Les eaux de pluie.
- Les eaux de surface.
- Les eaux souterraines.
- Les eaux de mer.

Les caractéristiques générales de chacune de ces sources reflètent l'interaction de l'eau et du milieu environnant.

I-3-1-Eaux de pluie:

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine. Elles sont saturées d'oxygène et d'azote et ne contiennent aucun sel dissous, comme les sels de magnésium et de calcium, elles sont donc très douces. Dans les régions industrialisées, les eaux de pluie peuvent être contaminées par des poussières atmosphériques. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de captage font que peu de municipalités utilisent cette source d'eau.

I-3-2-Eaux de surface:

On peut répartir les eaux de surface en trois catégories: eaux de rivières (partie amont), eaux de rivières (partie aval) et eaux de lacs. La dureté de toutes les eaux de surface est modérée.

I-3-2-1-Eaux de rivières (partie amont):

L'amont d'une rivière est en général situé dans une région montagneuse, où la densité de population est faible et les industries pratiquement inexistantes. Les principales caractéristiques de ces eaux sont présentées ci-dessous:

- a) Turbidité élevée: Le régime des rivières étant torrentiel, les eaux transportent de grandes quantités de matières en suspension.
- b) Contamination bactérienne faible: La pollution causée par l'homme ou l'industrialisation y est pratiquement inexistante.
- c) Température faible: Ces eaux proviennent soit de sources soit de la fonte des neiges et des glaciers.
- d) Indice de couleur faible: Ces eaux n'ont pas eu le temps de dissoudre des matières organiques principales sources de couleur.

I-3-2-2-Eaux de rivières (partie aval):

L'aval d'une rivière est en général situé dans une région où la population est dense, l'agriculture est développée et les industries sont plus ou moins nombreuses. Les eaux y sont donc habituellement de moins bonne qualité et plus difficiles à traiter qu'en amont. Les principales caractéristiques de ces eaux sont:

- a) Contamination bactérienne élevée: Cette contamination est surtout imputable au déversement des égouts domestiques et agricoles.
- b) Contamination organique et inorganique élevée: Les eaux usées domestiques agricoles et industrielles contiennent de grandes quantités de matières organiques et inorganiques.
- c) Indice de couleur pouvant être élevé: Dans beaucoup de cas, les eaux ont eu le temps de dissoudre des matières organiques qui les colorent.

Signalons que le débit et la qualité des eaux de rivières (amont et aval) peuvent varier. C'est pourquoi les usines de purification doivent être suffisamment complexes pour réagir rapidement à toute modification des caractéristiques des eaux de rivière.

I-3-2-3-Eaux de lac:

On peut considérer un lac comme un bassin naturel de décantation dont la période de rétention est longue. La turbidité de l'eau y est donc faible et la contamination bactérienne habituellement peu importante. Les caractéristiques des eaux de lac varient très lentement au cours de l'année à l'exception de deux courtes périodes au printemps et à l'automne. Durant ces périodes, la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes peut provoquer un renversement des eaux du lac et en augmenter ainsi brusquement la turbidité.

I-3-3-Eaux souterraines:

Les eaux souterraines enfouies dans le sol, sont habituellement à l'abri des sources de pollution. Puisque les caractéristiques de ces eaux varient très peu dans le temps, les usines de purification n'ont pas à résoudre les problèmes dus aux variations brusques et importantes de la qualité de l'eau brute. Les principales caractéristiques des eaux souterraines sont:

- a) Turbidité faible: Les eaux bénéficient d'une filtration naturelle dans le sol.
- b) Contamination bactérienne faible: Le très long séjour dans le sol, la filtration naturelle et l'absence de matières organiques ne favorisent pas la croissance des bactéries.
- c) Température constante: Les eaux souterraines sont à l'abri du rayonnement solaire et de l'atmosphère.
- d) Indice de couleur faible: Les eaux souterraines ne sont pas en contact avec les substances organiques sources de couleur.
- e) Débit constant: Contrairement à celles des eaux de rivières, la qualité et la quantité des eaux souterraines demeurent constantes durant toute l'année.
- f) Dureté souvent élevée: Les eaux peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents (Mg^{2+} , Ca^{2+} , ...) responsables de la dureté.
- g) Concentration élevée de fer et de manganèse: Ces métaux, souvent présents dans le sol, sont facilement dissous lorsque l'eau ne contient pas d'oxygène dissous.

I-3-4-Eaux de mer:

Les eaux de mer sont une source d'eau brute qu'on n'utilise que lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mer sont caractérisées par leurs concentrations en sels dissous, c'est ce qu'on appelle leur salinité. La salinité de la plupart des eaux de mer varie de 33000 à 37000 mg/l.

I-4-La composition chimique d'une eau:

L'eau contient des gaz dissous, essentiellement de l'oxygène et du gaz carbonique, mais aussi de l'azote ou encore du méthane. Tous n'ont pas la même solubilité dans l'eau et celle-ci décroît quand la température augmente.

Elle contient aussi, sous forme dissoute ou en suspension, des substances minérales et organiques.

I-4-1-Les matières minérales :

L'eau contient beaucoup d'ions dissous, dont les principaux sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{+}), le sodium (Na^{+}), le potassium (K^{+}), les carbonates (CO_3^{2-}), les bicarbonates (HCO_3^{-}), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorures (Cl^{-}) et les nitrates (NO_3^{-}). Ils proviennent essentiellement du lessivage des sols par les eaux de pluie. Leur teneur dépend directement de la nature des roches du bassin versant. Elle peut varier du milligramme par litre au gramme par litre pour les eaux les plus salées.

L'eau contient aussi des éléments nutritifs, ou nutriments, qui sont l'azote (contenu dans l'ammoniac, les nitrites et les nitrates), le phosphore (contenu dans les phosphates) et la silice, mais aussi le fer et le manganèse.

D'autres éléments ne sont présents qu'à l'état de trace (de 0,1 à 100 microgrammes par litre), comme l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt, et le plomb... Ils proviennent des roches et parfois des activités industrielles et domestiques.

L'eau contient aussi des matières minérales en suspension (matériaux argileux, limons, ...etc).

I-4-2-Les matières organiques :

Les matières organiques peuvent être présentes sous forme dissoute (carbohydrates, acides humiques, pigments et composés d'origine artificielle comme les hydrocarbures, les solvants chlorés, ou les pesticides), ou en suspension (déchets végétaux, plancton...). Elles proviennent essentiellement de la dégradation de la matière organique présente dans le milieu ou dans les sols lessivés par les pluies (décomposition des plantes et des animaux), mais aussi de composés issus de l'activité humaine.

I-5-Le cycle de l'eau dans la nature:

Dans l'environnement, l'eau effectue un cycle, décomposé en plusieurs étapes. La majeure partie de l'eau contenue dans les nuages provient des océans. Sous l'effet de la chaleur fournie par le soleil, l'eau de la surface des océans (également des rivières ou des lacs) s'évapore et s'élève dans l'atmosphère. Lorsque celle-ci refroidie, il y a formation de nuages. Lorsque les nuages sont suffisamment chargés en eau, cette dernière retombe à la surface de la terre, sous forme de pluie.

Deux cas sont alors possibles. Si la surface sur laquelle l'eau tombe est imperméable, l'eau ruisselle, et rejoint les cours d'eau (ruisseau, rivière, fleuve). Si la surface est perméable, l'eau pénètre dans le sol jusqu'à la couche imperméable suivante. Cette eau est dite souterraine, il y a formation de nappes phréatiques. L'eau peut alors parcourir une très longue distance avant de jaillir à la surface, sous forme de source ou de puit (voir figure I-1). [w3]

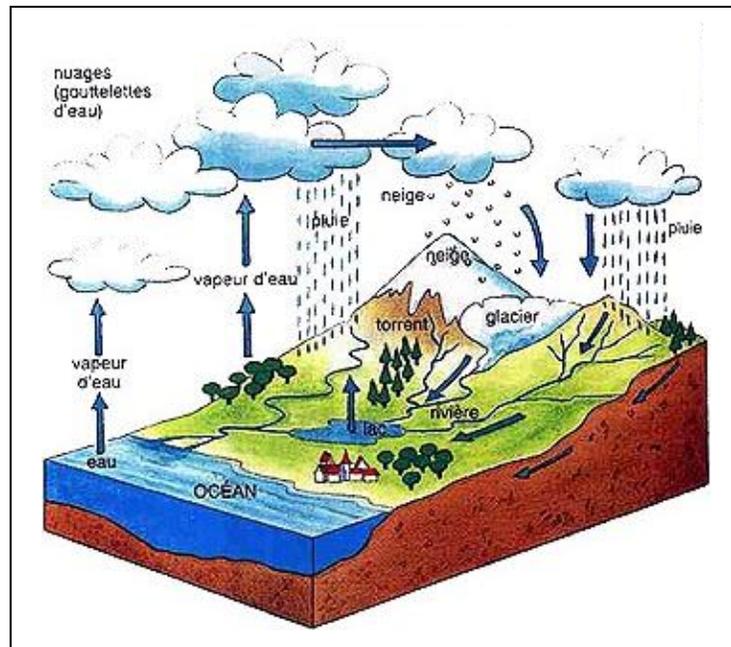


Fig I-1: Le cycle de l'eau dans la nature.

I-6-Le cycle de l'eau de consommation:

L'eau brute destinée à la consommation humaine est prélevée dans un cours d'eau ou une nappe d'eaux souterraines. Elle est ensuite acheminée vers une usine de production d'eau potable où elle subit divers traitements physiques, chimiques et biologiques. Rendue potable, elle est distribuée aux consommateurs.

Après usage, elle est recueillie pour être conduite vers les usines de dépollution des eaux usées, avant d'être enfin rendue à la nature.

Ce cycle subi par l'eau du fait de son usage par les sociétés humaines se décompose en cinq grandes étapes: le captage, le transport, la production d'eau potable, la distribution, puis la collecte et la dépollution des eaux usées. La figure suivante illustre le cycle de l'eau de consommation.

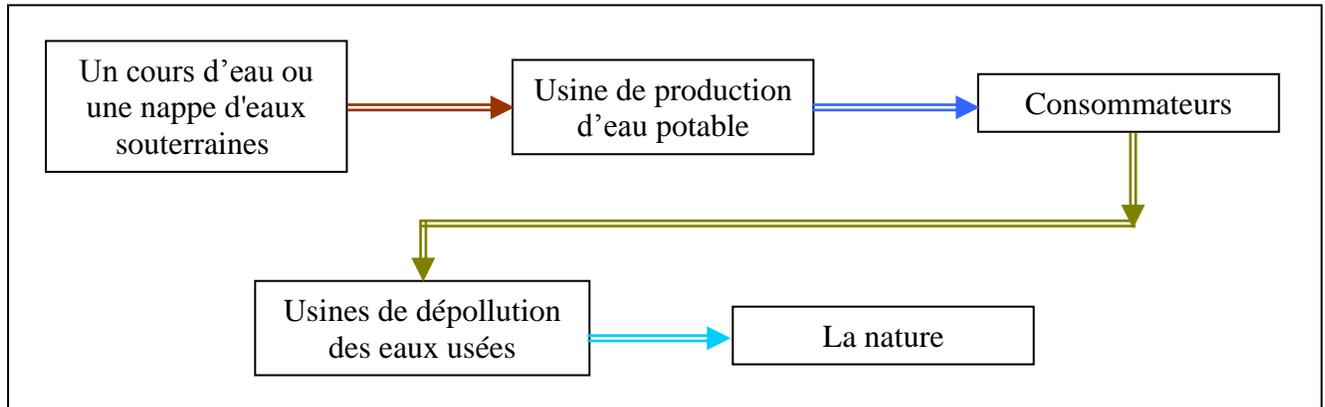


Fig I-2: Le cycle de l'eau de consommation.

I-7-La pollution de l'eau:

L'eau est rarement chimiquement pure. Elle contient toujours des ions en solution. On parle de pollution de l'eau lorsque celle-ci renferme des substances dont les teneurs sont telles que cette eau présente des risques pour la santé.

Quatre des cinq maladies les plus répandues dans le Tiers Monde sont transmises par l'eau (le choléra, la typhoïde, l'hépatite B, les gastro-entérites).

Dans le monde, on estime que la mauvaise qualité de l'eau serait à l'origine de la mort de 25 millions de personnes par an. [7]

I-7-1-Types de pollution de l'eau:

On distingue la pollution due aux :

I-7-1-1-Matières minérales en suspension (MES) : Sable, argiles, faciles à traiter et éliminer. En France, les teneurs varient de 30-40 mg/l pour les eaux de surface d'une région granitique (Auvergne, Bretagne), à 300-500 mg/l pour de nombreuses eaux souterraines. Le taux record est atteint, en Chine, par le Fleuve jaune: 20 g/l. [7]

I-7-1-2-Matières organiques oxydables : Provenant de la nature, de l'agriculture, des industries, des déchets animaux et humains... Les substances organiques naturelles représentent 60 à 90 % de ces matières organiques. Cette pollution est mesurée par la potentialité de consommation de l'oxygène. Une eau "pure" contient 10 mg/l de O₂ à 10 °C et 8 mg/l à 20 °C. Dans une eau polluée par des matières organiques, la teneur en oxygène sera plus faible. On utilise pour chiffrer cette pollution :

- La DBO₅ (demande biochimique en O₂ à 20 °C en 5 jours): Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder (dégrader) l'ensemble de la matière organique d'un échantillon d'eau maintenu à 20 °C, à l'obscurité, pendant 5 jours.
- La DCO (Demande Chimique en O₂): Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par voie chimique de la totalité de la matière organique. D'après la norme française NF T 90-101 d'octobre 1988 (équivalente à la norme internationale ISO 6060 de 1986), c'est la concentration, exprimée en mg de O₂/l, équivalente à la quantité de dichromate consommée par les matières dissoutes et en suspension (1 mole de Cr₂O₇²⁻ équivaut à 1,5 mole de O₂). [7]

I-7-1-3-Matières toxiques : Souvent due à des causes accidentelles. Cette pollution impose la présence de stations d'alerte situées en amont des prélèvements dans les rivières. [7]

Tableau I-1: Sources annuelles d'azote en France en millions de tonnes.

| Source | Quantitéx10 ⁶ t/an | Source | Quantitéx10 ⁶ t/an |
|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Minéralisation des matières organiques | 3.0 | Précipitations | 1.8 |
| Déjections animales | 2.2 | Déjections humaines | 0.2 |
| Engrais minéraux | 2.0 | industries | 0.1 |

I-7-1-4-Pollution par les ions nitrates :

Due, en dehors des phénomènes naturels, principalement au lessivage des engrais azotés utilisés en agriculture et aux déjections animales (lisier) des élevages industriels. On estime que sur un apport d'engrais de 167 kg d'azote par hectare et par an, 40 kg sont lessivés et alimentent les eaux de surface et les eaux souterraines. En France, sur les 9 millions de tonnes de N apportés par la fertilisation ou produits par la minéralisation (3 millions dans les sols, 4.5 apportés par les engrais et les déjections animales, 1.5 fixé par les légumineuses à partir de l'azote de l'air), seulement 7 millions de tonnes de N sont consommés par les plantes. Le reste, pour l'essentiel, est entraîné dans les cours d'eau et les nappes phréatiques. [7]

La concentration maximale admissible (CMA) en ions nitrates des eaux destinées à la consommation humaine est de 50 mg/l. Une eau contenant plus de 100 mg/l ne doit pas être consommée, entre 50 et 100 mg/l elle ne doit être consommée ni par les femmes enceintes ni par les nourrissons de moins de 6 mois (risques de méthémoglobinémie: accumulation dans les globules rouges d'une hémoglobine inapte au transport du dioxygène de l'air). La (CMA) est dépassée dans de nombreuses régions européennes (Royaume Uni - Pays Bas – Allemagne centre, ouest et nord de la France).

En 1997, en France, un échantillonnage réalisé sur 3300 captages montre que 25 % d'entre eux ont une teneur moyenne comprise entre 40 et 50 mg/l et que 12% dépassent 50 mg/l. La solution souvent adoptée pour diminuer la teneur en ions nitrates des eaux consommées consiste à mélanger des eaux à teneur élevée avec des eaux à plus faible teneur afin de rester à une valeur proche de 25 mg/l (valeur guide). [7]

I-7-1-5-Pollution par les ions phosphates :

Elle entraîne l'eutrophisation des lacs et rivières qui se traduit par une prolifération anormale d'algues (cyanophycées) due aux apports de phosphates qui agissent comme engrais. L'eau est appauvrie en O₂ dissous ce qui empêche toute autre vie animale ou végétale. En zone urbaine, l'essentiel de la pollution provient des effluents domestiques et en particulier des lessives.

Exemple: Rejets de phosphates dans l'eau: estimés en France à 1,2 million t/an.

- Erosion des sols: 0,5 à 5 kg/hectare/an.
- Retombées de poussières atmosphériques: 0,1 à 0,8 kg/hectare/an.
- Domestiques: moins de 4 g/habitant/jour, soit 70 000 à 80 000 t/an.
- Métabolisme: 1,5 g/jour.
- Produits lessiviels: 2,1 g/jour.
- Industriels: 40 000 t/an.
- Agricoles: 110 000 t/an.

En 1990, dans les eaux de surface de l'Union Européenne, 34% proviennent de l'élevage, 24% des rejets humains, 16% des engrais, 10% des détergents, 7% de l'industrie. [7]

I-7-1-6-Pollution par les pesticides et herbicides:

Les désherbants sélectifs les plus employés en agriculture sont: l'atrazine, simazine et l'isoproturon. Les deux premiers ont été employés pour le traitement des accotements de chaussées et de voies ferrées. Les normes imposent une teneur maximale de 0,1 µg/l par pesticide et de 0,5 µg/l pour la somme de tous les pesticides.

Les teneurs des eaux de rivière en ces divers pesticides varient fortement au cours de l'année en fonction des traitements agricoles. En hiver l'isoproturon est présent alors que l'atrazine et la simazine se retrouvent au printemps et en été.

Les traitements classiques d'une eau de rivière éliminent correctement la simazine et l'isoproturon. Par contre, l'atrazine est plus résistant. Lorsque sa concentration est trop élevée, son élimination nécessite un traitement renforcé d'oxydation par l'ozone complété par l'utilisation de charbon actif en poudre. [7]

I-7-1-7-Assainissement des eaux usées:

La pollution des eaux usées est définie par un indicateur synthétique de matières organiques: l'équivalent habitant (Eh) qui correspond à 57 g de matière organique. En France, et par an, la production d'eaux usées correspond à 150 millions d'Eh soit 55 millions provenant des habitants réels et 95 millions correspondant à l'activité économique (par exemple: 1 tonne de papier correspond à 100 à 300 Eh).

Une station d'assainissement produit, en moyenne, par jour et par habitant, 2,8 l de boue à 20 g/l de matière sèche soit, par an, en France 3 millions de tonne de boue qui donnent 600 000 tonne de matière sèche qui à 40-50 % vont en décharge, à 40-50 % sont répandues en agriculture et à 15 % incinérés.

- En France, en 1994, 77 % des logements sont reliés à un réseau d'assainissement. Le rendement des stations d'assainissement est de l'ordre de 2/3 de la pollution.
- Dans le monde, et par an, on estime que 450 km³ d'eaux usées sont déversés dans des cours d'eau sans avoir été épurés. [7]

I-7-2- Exemples de contributions à la pollution :

Les tableaux suivants illustrent la valeur de la contribution à la pollution de l'eau de certaines industries pour les grands secteurs d'activité en France, en 1991:

Tableau I-2: Contribution à la pollution organique des eaux de certaines industries (France 1991).

| | | | |
|-----------------------------|--------|-----------------------|-------|
| Industries agroalimentaires | 44.9 % | Industries textiles | 8.9 % |
| Industries du bois, papiers | 14.6 % | Commerce et services | 4.0 % |
| Industries chimiques | 14.5 % | Industries des métaux | 1.7 % |

Tableau I-3: Contribution à la pollution toxique des eaux de certaines industries (France 1991).

| | | | |
|------------------------|--------|-----------------------|-------|
| Industries chimiques | 45.7 % | Industries des métaux | 2.8 % |
| Bois, papiers, cartons | 5.2 % | Cuir et peaux | 1.0 % |
| Industries textiles | 3.6 % | Production d'énergie | 0.5 % |

Chapitre II:

Aperçu sur le traitement des eaux

II-1-Historique du traitement des eaux:

L'une des plus anciennes références au traitement des eaux de consommation est tirée d'un texte médical en sanscrit datant de 2000 ans av.j.c. On y indique comment rendre les eaux potables en les faisant bouillir au dessus d'un feu, en les chauffant au soleil, en y plongeant un fer chaud ou en les filtrant à travers un lit de sable et de gravier.

Les armées d'Alexandre, pendant leurs nombreuses campagnes d'Asie mineure, recevaient la consigne de faire bouillir leur eau avant de la consommer. Dans la Rome antique, les aqueducs acheminaient des eaux de diverses qualités (on consommait les meilleurs d'entre elles, alors qu'on réservait les médiocres aux bains et aux thermes, et les pires au cirque nautique).

En 1852, à Londres, on vota une loi qui stipulait que toute eau destinée à la consommation humaine devait être filtrée. En 1854, John Snow et John York ont montré, dans la mesure où ils le pouvaient avec les moyens de l'époque, que la fièvre asiatique qui sévissait alors à Londres était transmise par les eaux du puits de "Broad Street". Ils ont par ailleurs établi que ce puits était contaminé par des eaux issues d'un réseau d'égouts défectueux, réseau dans lequel étaient déversées les eaux usées d'une maison habitée par un malade. Après 1870, les progrès réalisés en bactériologie permirent d'isoler plusieurs bactéries et de prouver, hors de tout doute, que l'eau pouvait transporter ces bactéries et favoriser ainsi la transmission de diverses maladies. A partir de 1904, en Angleterre, on procéda à la chloration continue des eaux de consommation, pratique que les Etats-Unis adoptèrent à leur tour en 1909. Il est utile de signaler que, jusqu'au début du XX^e siècle, les critères d'appréciation de la qualité d'une eau étaient essentiellement basés sur les sens: l'eau devait être limpide, un agréable goût et dépourvue d'odeur désagréable.

Depuis le début du siècle, on a réalisé d'importants progrès en matière de traitement des eaux. La désinfection continue des eaux est maintenant chose courante, des produits désinfectants, comme l'ozone et le dioxyde de chlore, assurent une meilleure désinfection. Certains développements dans les domaines de la décantation et de la filtration ont entraîné la réduction de la taille des équipements. Par ailleurs, le raffinement des techniques de laboratoire permet de mesurer avec davantage de précision les concentrations des différentes substances contenues dans une eau, on peut ainsi déterminer si une eau est potable grâce à la technologie actuelle, on peut rendre potable à peu près n'importe quelle eau et ce quel que soit son degré de pollution.

La tâche actuelle du spécialiste en traitement des eaux ne consiste pas uniquement à appliquer des principes connus, étant donné que la croissance démographique et l'industrialisation ont augmenté la quantité et la diversité des déchets rejetés dans les rivières et les lacs, ce qui donne naissance à de nouveaux problèmes. Les virus, les métaux lourds, les micropolluants et les trihalométhanes engendrent autant de cas que le spécialiste doit résoudre techniquement et de façon économique.

II-2-Procédés de traitement des eaux:

Le traitement d'une eau brute dépend de sa qualité, laquelle est fonction de son origine et peut varier dans le temps. L'eau à traiter doit donc être en permanence analysée, car il est primordial d'ajuster le traitement d'une eau à sa composition et, si nécessaire, de le moduler dans le temps en fonction de la variation observée de ses divers composants. Il peut arriver cependant qu'une pollution subite ou trop importante oblige l'usine à s'arrêter momentanément.

Le traitement classique et complet d'une eau s'effectue en plusieurs étapes dont certaines ne sont pas nécessaires aux eaux les plus propres.

II-2-1-Procédés physiques et physico-chimiques:

1/-Le dégrillage:

Le dégrillage, premier poste de traitement, permet de protéger les ouvrages aval de l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de traitement. Ceci permet également de séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution. Le dégrillage est avant tout destiné à l'élimination de gros objets : morceaux de bois, etc. Le dégrillage sert aussi à protéger les pompes et les canalisations contre les corps flottants grâce à des barreaux espacés généralement de 5 à 10 cm. [13]

2/-Le tamisage:

Le tamisage permet, grâce à des grilles à mailles de 0.3 à 3mm, l'évacuation de matière en suspension et notamment algues, herbes, alluvions, insectes, débris végétaux et animaux...Il existe également des micro-tamis à mailles de 25 à 100 microns pour éliminer le plancton par exemple. [2]

3/-Le dessablage ou débouage:

Il a pour but d'extraire les graviers, sables et particules minérales plus ou moins fines pour éviter les dépôts et protéger les appareils contre l'abrasion. C'est une étape de traitement qui précède la clarification dans le cas d'une eau très chargée en limon ou en sable fin. [2]

4/-La coagulation floculation:

L'opération de coagulation floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floes. Les floes ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite. (Voir en détail dans le chapitre: Le traitement de coagulation floculation) [6]

5/-La décantation:

Le floe étant formé, il reste à instaurer un régime hydraulique qui lui permettra ainsi qu'à toutes les particules en suspension de se déposer dans un ouvrage d'ou l'on pourra les évacuer facilement.

6/-La filtration:

Le procédé général de filtration consiste à faire passer l'eau à travers un milieu poreux qui est le plus souvent le sable. Selon les objectifs à atteindre on effectue:

- La filtration rapide: La filtration rapide s'applique à des eaux préalablement traitées (eau floculée et décantée ou flottée) et aura pour but d'obtenir une clarification poussée de l'eau par l'élimination des MES. Au fur et à mesure des passages de l'eau à travers le lit filtrant, les matières retenues s'accumulent dans les pores: le filtre se colmate. Ainsi afin d'atteindre une trop grosse perte de charge, il faut nettoyer le filtre.
- La filtration lente: Contrairement à la filtration rapide qui ne représente qu'un maillon de l'étape de la clarification, la filtration lente constitue à elle seule un traitement quasiment complet de l'eau brute. [2]

II-2-2-Procédés chimiques:

1/-L'oxydation : Si les eaux à traiter contiennent beaucoup de matières organiques, ou encore de l'ammoniacque, du fer ou du manganèse, une étape d'oxydation préalable est nécessaire. Elle permet d'éliminer plus facilement ces substances au cours de l'étape suivante dite de clarification. On utilise pour cela un oxydant comme le chlore ou l'ozone. L'oxydation, par le chlore ou l'ozone, agit sur les métaux (fer, manganèse), sur les matières organiques et détruit ou inactive les germes vivants, les virus et les bactéries. Les procédés de substitution d'ions par échange d'ions sur des résines spécifiques sont utilisés pour la dénitrification et l'adoucissement de l'eau.

II-2-3-Procédés biologiques:

Des cultures bactériennes appropriées mises en contact avec l'eau à traiter éliminent certains éléments indésirables.

1/-La désinfection :

A la fin du traitement, la désinfection permet l'élimination des micro-organismes pathogènes (bactéries et virus). On utilise pour cela soit un désinfectant chimique comme le chlore ou l'ozone, soit des rayonnements ultraviolets.

Il est important que ce traitement persiste tout au long du réseau afin qu'aucun germe ne puisse se développer dans les canalisations où l'eau peut séjourner plusieurs jours. Enfin, la dureté et l'acidité de l'eau sont corrigées afin de protéger les canalisations de la corrosion ou de l'entartrage.

Lorsque cette chaîne traditionnelle de traitement ne suffit pas, ce qui est de plus en plus souvent le cas, compte tenu de la présence de quantités croissantes de certains polluants comme les nitrates et les pesticides, certains traitements spécifiques sont appliqués.

Le procédé d'adsorption sur charbon actif, notamment, permet d'éliminer, après un éventuel traitement d'oxydation, des polluants organiques dissous comme certains pesticides ou hydrocarbures. Le charbon actif est utilisé soit sous forme de poudre lors de la floculation, soit en grains dans d'épais lits de filtration. Les molécules organiques, dont la taille a été réduite lors de l'oxydation, pénètrent et se fixent dans les pores du charbon actif. L'intérêt d'un tel procédé est qu'il permet d'extraire des micropolluants organiques sans l'emploi de produits chimiques.

II-2-4-Procédés membranaires:

1/-La filtration sur membranes:

Un procédé d'avenir afin de répondre à la sévérité croissante des normes, aux volumes toujours plus grands d'eau à traiter, et à la pollution grandissante des réserves, d'importants efforts de recherche ont été consentis au cours des dernières décennies. Les études portent notamment sur les procédés de traitement des eaux ainsi que sur les techniques d'analyse et la mise au point d'instruments de surveillance automatique.

De nouvelles techniques, très performantes ont ainsi pu voir récemment le jour. Ces techniques dites de séparation par membranes constituent une mini-révolution dans le domaine du traitement de l'eau. Leur principe consiste non plus à éliminer chimiquement les micropolluants mais à les extraire physiquement.

Elles présentent en effet le très gros avantage de n'utiliser aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Très fiables, elles permettent de traiter des eaux très polluées et de produire une eau très pure, sans goût désagréable ni mauvaises odeurs, et de qualité constante, quelles que soient les variations de la qualité de l'eau à traiter. Elles commencent depuis peu à être utilisées à grande échelle au niveau industriel. La figure II-1 représente les différentes fonctions des filtrations.

2/-L'ultrafiltration:

Dans ce procédé, la membrane est constituée de milliers de fibres très fines, rassemblées à l'intérieur d'une gaine rigide. Les parois de chacune de ces fibres sont percées d'une multitude de pores microscopiques dont la taille est de l'ordre de 0.01 micromètre. L'eau à traiter circule sous pression à l'intérieur des fibres et passe à travers les pores. De toutes les substances contenues dans l'eau, seules qui peuvent traverser les parois des fibres sont celles dont le diamètre est inférieur à la taille des pores.

L'eau ainsi filtrée est récupérée à l'intérieur de la gaine. Les substances au diamètre trop important restent dans les fibres où elles sont lessivées par l'eau non filtrée.

L'ultrafiltration permet d'éliminer toutes les particules en suspension, les bactéries et les virus, ainsi que les plus grosses molécules organiques. Mais certains pesticides et certaines molécules responsables du goût et d'odeur, de plus faible diamètre, ne sont pas retenus. Pour pallier cet inconvénient, du charbon actif en poudre est mélangé à l'eau à traiter. Ces substances s'adsorbent sur les grains de charbon lesquels, trop gros pour passer à travers les pores, sont retenus par les membranes.

Utilisé comme traitement d'affinage, ce procédé permet d'éliminer le goût et l'odeur, et de réduire notablement l'usage des désinfectants chimiques. Il est exploité industriellement en France depuis 1997 dans l'usine de Vigneux-sur-Seine en région Parisienne.

3/-La nanofiltration:

Son principe est très semblable à celui de l'ultrafiltration, la différence essentielle est que la membrane de la nanofiltration offre une porosité dix fois plus faible, de l'ordre de 0.001 micromètre. Constituée de trois couches de matériaux différents, elle est enroulée autour d'un tube central. Injectée sous pression, l'eau à traiter traverse la membrane et ressort filtrée par le tube central.

La nanofiltration permet de retenir tous les polluants dissous, qu'ils soient biologiques, organiques ou minéraux et quelle que soit leur concentration, sans avoir besoin d'utiliser l'adsorption sur charbon actif. Elle permet, elle aussi, de diminuer notablement l'usage du chlore. Son seul inconvénient technique est que l'eau produite est tellement pure qu'il est nécessaire de la reminéraliser. Cette technique est utilisée en France depuis 1999 au sein d'une nouvelle unité de l'usine de traitement des eaux de Méry-sur-Oise dans la région parisienne.

4/-L'osmose inverse:

Les trois quarts de la surface de notre planète sont recouverts d'eau, mais de l'eau salée malheureusement. S'il était possible de transformer cette eau salée en eau douce, cela résoudrait en effet toutes les difficultés de pénurie d'eau que connaissent beaucoup de pays, car beaucoup entre eux ont un accès aux océans.

On dispose aujourd'hui de nombreux systèmes dont beaucoup ont atteint le stade industriel. Les deux procédés les plus couramment utilisés sont la distillation et l'osmose inverse. Leur principe est simple.

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur des rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable.

L'osmose inverse nécessite quant à elle le traitement au préalable de l'eau de mer en la filtrant et en la désinfectant afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient. Le procédé consiste ensuite à appliquer à cette eau salée une pression suffisante pour la faire passer à travers une membrane semi-perméable, seules les molécules d'eau traversent la membrane, fournissant ainsi une eau douce potable.

L'inconvénient majeur de ces systèmes est qu'ils sont très coûteux. Les installations sont peu rentables, les quantités d'énergie nécessaires au chauffage ou à la compression de l'eau sont trop élevées, et les volumes d'eau produits trop faibles. L'utilisation de cette technique de production d'eau potable reste donc encore très marginale. Seuls certains pays ne disposant que de très faibles ressources en eau mais suffisamment riches, comme le Koweït et l'Arabie Saoudite, utilisent le dessalement de l'eau de mer pour produire l'eau douce destinée à la consommation humaine.

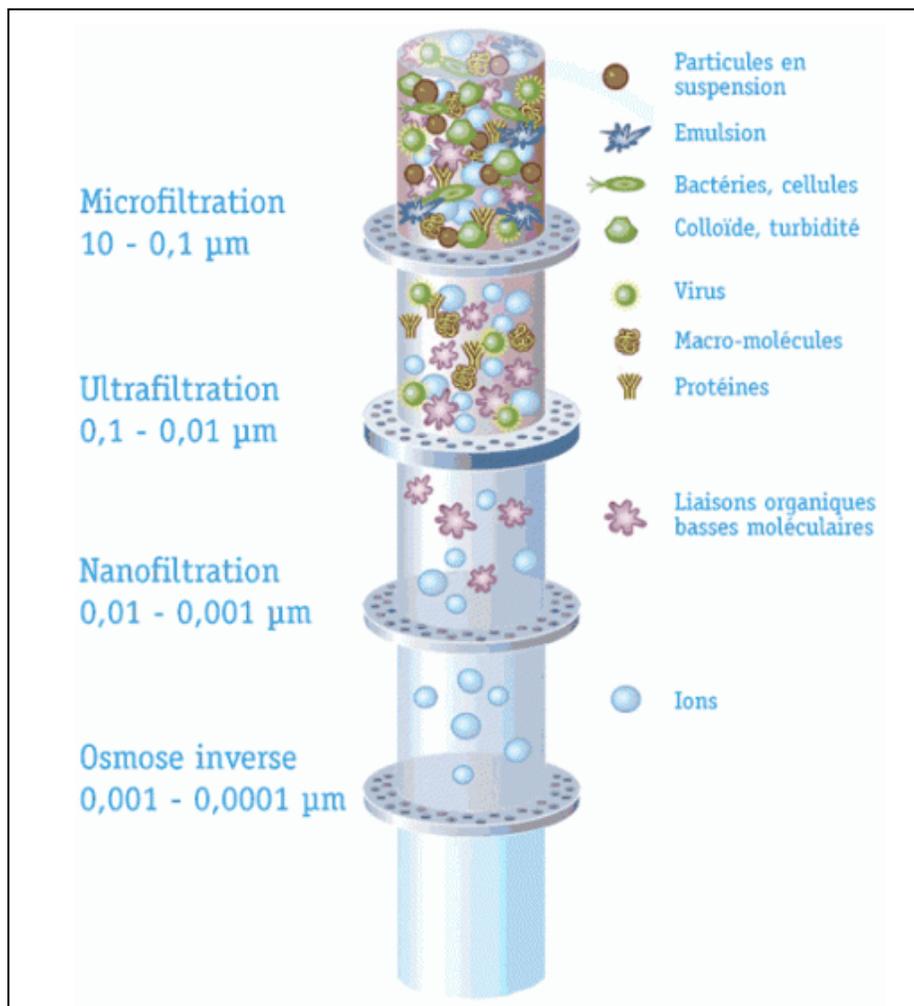


Fig II-1: Schéma représentant les différentes fonctions des filtrations

Le schéma suivant donne une idée sur les différents procédés de traitement des eaux.

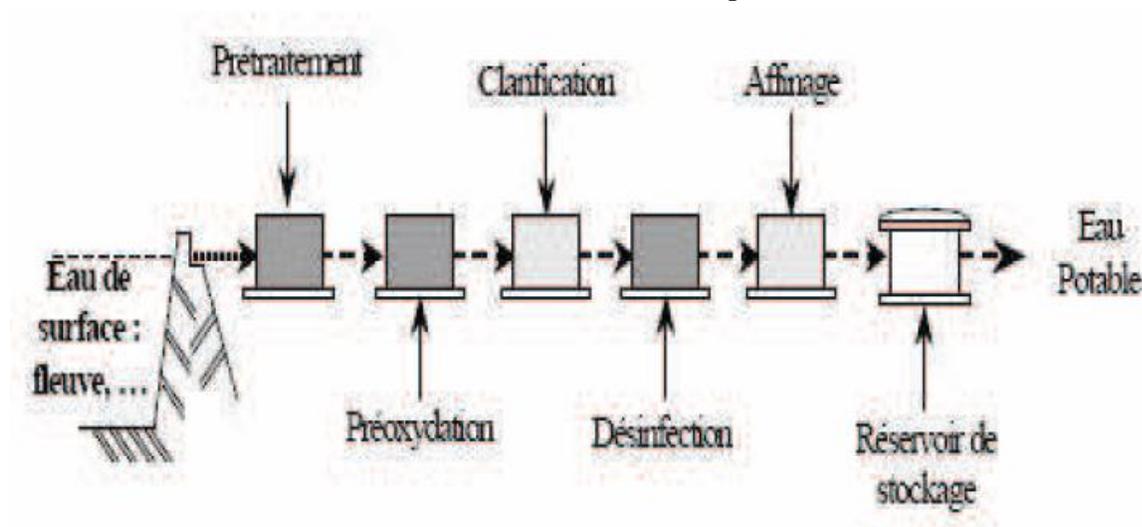


Fig II-2: Procédés de traitement des eaux.

II-3-Etapes et unités de traitement d'une eau de surface:

Tableau II-1: Etapes et unités de traitement d'une eau de surface.

| Unité ou étape de traitement | Fonction | Commentaires |
|---------------------------------|---|--|
| Prise d'eau | -Relier la rivière ou le lac au puits d'eau brute -Acheminer l'eau à l'usine de traitement | Aucun entraînement de la vase et des matières flottantes vers le puits d'eau brute |
| Dégrillage | Arrêter les impuretés grossières | -Installé dans le puits d'eau brute -Nettoyage manuel ou mécanique |
| Pompes à basse pression | Refouler l'eau du puits d'eau brute jusqu'à la première unité de traitement | Capacité totale de refoulement = consommation quotidienne maximale Pression \approx 135 KPa |
| Prédésinfection ou préoxydation | -Réduire la concentration de micro-organismes -Oxyder la matière organique | Ozone. Dioxyde de Chlore ou Chlore |
| Microtamisage | Arrêter les particules fines en suspension | Inutile en cas de coagulation floculation et décantation |
| Coagulation | -Déstabiliser les particules en suspension -Amorcer la formation d'un floc | Dans un mélangeur rapide |
| Floculation | -Agglutiner les particules d'impuretés -Augmenter le volume des particules de floc | |
| Décantation | Eliminer les particules de floc | -Liquide surnageant acheminé vers les filtres -Boue formée par les particules de floc évacuée vers le réseau d'égouts |
| Filtration | Arrêter les petites particules de floc contenues dans l'effluent du décanteur | Dernière étape permettant de réduire la turbidité et la couleur |
| Désinfection | Détruire les micro-organismes nuisibles à la santé | Chlore. Dioxyde de Chlore ou Ozone |
| Fluoruration | Ajouter les ions fluorure à l'eau traitée | Concentration optimale d'ions fluorure dans les eaux de consommation = 1.2 mg/l |
| Réservoir | Conserver l'eau traitée jusqu'à son utilisation | |
| Pompes à haute pression | Refouler les eaux traitées vers les consommateurs | Capacité = consommation horaire maximale Pression \approx 600 KPa |

Chapitre III: Le traitement de coagulation floculation

III-1-Introduction:

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

La coagulation et la floculation sont les processus qui permettent l'élimination des colloïdes. La coagulation consiste à les déstabiliser. Il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre. La floculation rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et/ou filtration. [6]

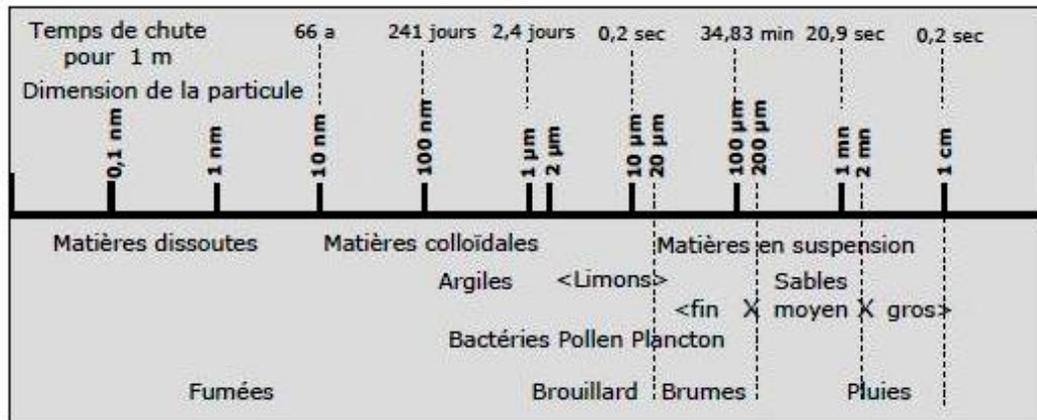


Fig III-1 : Temps de décantation des particules.

III-2-Historique de la coagulation:

La coagulation est un procédé très ancien de la technologie de l'épuration de l'eau. Elle date des premiers jours de l'histoire où des matériaux naturels aussi variés que des amandes concassés en Egypte, des noisettes en Inde et l'alun en Chine, étaient utilisés pour clarifier des eaux troubles. Comme le relate le second livre des Rois, chapitre 2, versets 19-22, Elisée assainit les eaux d'une fontaine de Jéricho en les traitant avec du sel. Ceci devait avoir eu lieu au neuvième siècle avant notre ère.

Après le Moyen Age, en 1843, James Simpson innova en Angleterre en introduisant "l'alun" pour amorcer la filtration. Cette préparation ne fut pas employée par les municipalités jusqu'à ce qu'un brevet fut attribué à Isaiah Hyatt en 1884 pour l'utilisation d'un coagulant, préalablement à une filtration rapide. La première application à grande échelle fut réalisée en 1885 par les compagnies des eaux de Somerville et de Raritan, dans le New Jersey. La règle de Schulze-Hardy date de 1900. Au début des années 1920, de manière assez générale, on acceptait de considérer l'importance de Al^{3+} ou Fe^{3+} en solution, et l'ajustement du pH était considéré comme nécessaire dans les bonnes pratiques. L'importance possible d'un anion (par exemple le sulfate) se manifestait.

En 1928, des progrès significatifs furent réalisés par Sante Mattson. Grâce à des recherches sur l'électrophorèse de suspensions d'argile, il mit en évidence que les produits de l'hydrolyse du fer et de l'aluminium étaient plus importants que les ions trivalents eux-mêmes: l'effet le plus important sur le potentiel zêta est obtenu dans la gamme de pH correspondant à l'hydrolyse des sels d'aluminium.

Pendant les années 30, les concepts relatifs à la mobilité électrophorétique et au potentiel zêta furent élargis; le changement de charge et la redispersion lors d'excès de coagulant furent démontrés.

L'idée que la précipitation et le piégeage sont les principes fondamentaux de la coagulation, ainsi que la théorie relative à la réduction du potentiel zêta, trouvèrent autant de partisans jusqu'aux années 50. Il faut noter en outre, la découverte de la silice activée par Baylis en 1937, alors que la distinction entre les procédés de coagulation et de floculation n'était pas encore affirmée.

En 1952, les polyélectrolytes synthétiques furent utilisés comme adjuvants de coagulation. Ceci eut pour conséquence de raviver l'intérêt pour d'anciens produits à base d'amidon ou de gommages naturelles. Par suite des nouvelles idées qui émergent, le développement des notions d'adsorption par pontage (ou agrégation) comme principe de coagulation, vit le jour à la fin des années 60. En dépit de la théorie de la coagulation par entraînement pour expliquer les effets de la précipitation, l'intérêt pour l'adsorption était grandissant et, avec l'idée de combiner adsorption et mélange, vinrent les méthodes de mélange instantané pour contact rapide.

Aujourd'hui, les quantités de coagulant communément employées dans le traitement de suspension polydispersées en eaux naturelles, correspondent d'abord aux concepts de la coagulation par entraînement. L'émergence de l'intérêt pour une coagulation en continu, ou coagulation filtration, s'inclut dans ce développement actuel.

Bien qu'elle soit fondamentalement un procédé distinct de la floculation, la coagulation est, en pratique, immédiatement suivie par la floculation. [2]

III-3-But de la coagulation floculation:

L'opération de coagulation floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floes qui seront décantés et filtrés par la suite. Le principe de la coagulation est présenté dans la figure suivante. [6]

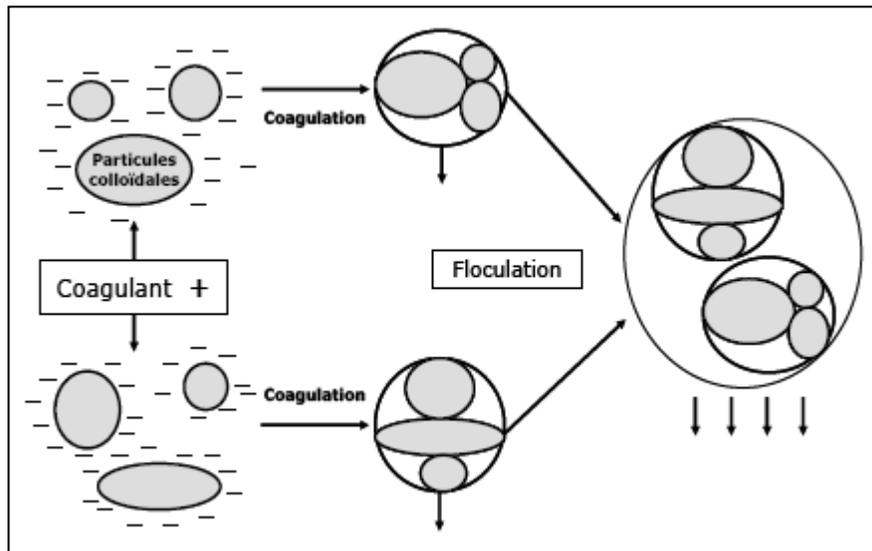


Fig III-2: La coagulation floculation.

Les principaux objectifs de la coagulation sont:

- Obtention d'une turbidité minimale: Les normes OMS et Algériennes fixent la valeur maximale à 5 NTU pour les eaux désinfectées;
- Obtention d'une couleur minimale: La couleur ne peut être complètement éliminée par coagulation floculation. La valeur maximale fixée par l'OMS et Algérienne est de 15 UH (unité Hazen);
- Désinfection finale efficace: Elle est liée à l'enlèvement de la turbidité et à la valeur du pH de l'eau;
- Obtention d'un floc de bonne qualité: Le floc doit être résistant et facilement décantable. Le dosage doit être tel que la quantité de floc soit limitée de façon à éviter une surproduction de boues et un encrassement rapide du filtre;
- Obtention d'un pH final optimal: Le pH final doit être proche de la valeur d'équilibre où l'eau n'est ni agressive ni corrosive de manière à éliminer l'ajout de correctif;
- Teneur en carbone organique total (COT) minimale et élimination des précurseurs de THM (trihalométhane): Etant donné la baisse constante de la qualité des eaux brutes qui contiennent de plus en plus de micropolluants organiques, le traitement doit être aussi efficace que possible pour les éliminer et éviter, lors de la chloration, la formation de trihalométhane. Or, les substances humiques sont reconnues pour être des précurseurs de THM. La couleur ne constitue pas un bon indice de cette tendance. Par contre, la mesure du COT et l'absorption en UV reflètent la présence des acides humiques. Le COT dissous est plus difficile à éliminer. Par contre une coagulation préalable au sulfate d'aluminium améliore sensiblement l'absorption des matières organiques en solution sur charbon actif;
- Efficacité à basse température: Une simple diminution de température de 0.5 °C (entre 4.5 et 4 °C) entraîne aussi bien avec l'alun qu'avec le chlorure ferrique une augmentation notable de la turbidité de l'effluent. Si l'on augmente la dose de coagulant, une sursaturation de l'hydroxyde de métal importante, entraîne une augmentation du métal résiduel. Ceci est due à la quantité de particules de taille inférieure qui augmente à basse température, et exige un temps de complète du sel de métal;
- Autres applications: Nous avons insisté surtout sur la coagulation appliquée à la préparation de l'eau potable. Rappelons que les dérivés de l'Al et du fer sont également employés dans le traitement physico-chimique des eaux usées où les mécanismes sont similaires avec des problèmes moins liés à la turbidité ou l'alcalinité disponibles qu'à la qualité et au volume des boues produites. Certains procédés industriels nécessitent également une coagulation efficace, en particulier dans le domaine des pâtes et papiers.
- Teneur en aluminium ou en fer résiduel minimale: Dans la grande majorité des usines, le traitement s'accompagne d'une hausse de la teneur en aluminium total qui peut être de 6 à 1500 µg/l. Or, certaines études relierait l'absorption d'une quantité importante d'aluminium dans l'organisme humain à l'apparition de désordres neurologiques tel que la maladie d'Alzheimer, dialysis encéphalopathie, insuffisance rénale. La quantité d'aluminium ingérée chaque jour par l'homme est de l'ordre de 20 mg et la contribution de l'eau potable est inférieure à 5 %. L'aluminium résiduel doit être maintenu à une valeur minimale, évitant du même coup les post-précipitations éventuelles.

- Le pH est le facteur principal qui influence l'aluminium résiduel: La quantité d'aluminium varie 100 fois pour une variation d'une unité de pH. La solubilité d'aluminium à pH (6.5-7) est de (0.025-0.075 mg/l) comparée à la solubilité d'aluminium à pH 8 qui est de 0.5 mg/l;
- La température: Une basse température peut favoriser la solubilité de l'aluminium en ralentissant les cinétiques des réactions;
- La présence de ligand (F, SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , substances humiques) favorise la formation de complexes d'aluminium solubles non éliminables par filtration;
- Le fer n'est pas un élément nuisible pour la santé. Au contraire c'est même un élément nutritif essentiel. On doit cependant en contrôler les concentrations, et ce pour des raisons d'esthétique. En effet la présence d'une certaine quantité de fer dans l'eau peut entraîner certains inconvénients. Cela peut:
 - Donner à l'eau un goût métallique désagréable;
 - Tacher les tissus lors de la lessive (taches qui vont du jaune au brun);
 - Tacher les équipements sanitaires (baignoires...);
 - Former un précipité dans les conduites, ce qui favorise la croissance des bactéries ferrugineuses.

III-4-Pratique de la coagulation floculation:

III-4-1-A travers le monde:

A travers le monde, les techniques classiques utilisées dans le traitement des eaux de surface, sont toujours précédées d'une opération de coagulation floculation qui joue un rôle capital dans la filière de traitement.

Les dérivés de l'aluminium ou de fer sont également employés dans le traitement physico-chimique des eaux usées, où les problèmes sont moins liés à l'alcalinité ou à la turbidité disponible qu'à la qualité et au volume des boues produites. Enfin, d'autres applications se développent comme par exemple l'injection de l'alun dans des conditions bien précises à l'eau de lavage des filtres, cette pratique augmente l'efficacité du processus et quand on recommence à filtrer la qualité de l'effluent s'améliore très rapidement diminuant ainsi le temps de récupération des dits filtres.

Les sels d'aluminium et du fer ont donc toujours été largement utilisés et en particulier, pour des raisons économiques, le sulfate d'aluminium.

L'utilisation de l'alun comme coagulant pour la clarification de l'eau a été introduite formellement dans un brevet 1866 (Bird). On rapporte qu'une partie de cette technologie était déjà connue à l'époque des romains.

Cependant, l'efficacité des sels trivalents d'aluminium ou de fer baisse en eau faiblement alcaline, peu turbide ou à basse température. Pour remédier à ces déficiences, de nouveaux coagulants ont été introduits.

En 1970, des tests ont été menés sur les polychlorures d'aluminium (WAC). Ces tests ont conclu que le WAC conduit à un meilleur abattement de la matière organique sans nécessité d'adjuvant de floculation. Les aluns basiques ont été fabriqués et employés depuis 1980, au Japon, aux USA et dans plusieurs pays européens. Le Japon consommait annuellement au milieu des années 80 (1985), approximativement 350.000 tonnes d'alun, 350.000 tonnes de PAC et 540.000 tonnes de PAS. [5]

III-4-2-En Algérie:

La mobilisation des ressources en eaux superficielles, priorité du premier et deuxième plan quinquennal du développement Algérien, s'est traduite par la mise en place de barrage et d'autres retenues. Afin de permettre l'alimentation en eau potable des populations, un certain nombre de stations de traitement des eaux se sont avérées nécessaires.

Il existe actuellement une dizaine de stations de traitement importantes, de différentes conceptions. Le rendement de fonctionnement de ces stations est rarement optimal. Cela est du aux grandes variations des caractéristiques des eaux de surface algériennes et aussi à la mauvaise gestion, les essais de "jar test" ne sont qu'occasionnellement réalisés et les taux des réactifs chimiques ne sont pas toujours ajustés à la qualité de l'eau brute. La station de Souk el djemaa est un exemple sur cette situation, le tableau suivant présente les données concernant la clarification de l'eau de cette station où on peut remarquer que l'étape de coagulation décantation aboutit parfois à une détérioration de la qualité de l'eau.

L'emploi des réactifs reste limité à ceux préconisés par les constructeurs de station, c'est ainsi que le sulfate d'aluminium a été généralisé dans la plupart des stations alors que des études ont montré qu'il pouvait être parfois efficacement remplacé par des sels de fer. Quand à l'adjuvant de floculation, son utilisation est très diversifiée. La silice activée, les alginates, et l'Asp6 sont souvent utilisés. [5]

Tableau III-1: Evolution de la qualité physico-chimique de l'eau brute (EB), de l'eau décantée (ED) et de l'eau traitée (ET) de Souk el djemaa. [5]

| | | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet |
|----------------------------------|----|---------|------|-------|------|------|---------|
| Température (°c) | | 15 | 15.5 | 18 | 19.5 | 21 | 24 |
| pH | EB | 7.9 | 7.5 | 7.8 | 7.9 | 7.8 | 8.0 |
| | ED | 7.8 | 7.6 | 8.1 | 7.2 | 8.0 | 7.8 |
| | ET | 7.5 | 7.5 | 7.7 | 7.3 | 7.6 | 7.4 |
| Turbidité (NTU) | EB | 16 | 8.0 | 5.2 | 11 | 6.9 | 4.7 |
| | ED | 7.0 | 8.6 | 10 | 10 | 7.7 | 3.4 |
| | ET | 3.3 | 2.2 | 2.5 | 3.4 | 3.9 | 1.9 |
| Oxy.KMno4 (mg O ₂ /l) | EB | 7.8 | 4.0 | 2.4 | 4.0 | 5.0 | 1.9 |
| | ED | 2.0 | 2.0 | 1.6 | 2.2 | 2.3 | 0.9 |
| | ET | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.6 | 1.5 | 0.7 |
| TAC (°F) | EB | 22.9 | 20.0 | 19.5 | 17.5 | 20.5 | 19.2 |
| | ED | 19.6 | 19.9 | 22.0 | 18.5 | 19.2 | 18.7 |
| | ET | 19.0 | 17.0 | 20.5 | 16.0 | 18.6 | 1.5 |

III-5-Quelques définitions:

III-5-1-Les particules colloïdales:

La très grande majorité des eaux naturelles (et, en particulier, celle des eaux de surface), contient des impuretés qui affectent leur apparence et peuvent avoir des effets néfastes sur le consommateur.

Ces impuretés (solides) peuvent être grossièrement classés comme suit:

- Impuretés dissoutes (sels minéraux dissous, molécules organiques ...),
- Colloïdes,
- Solides en suspension.

En fait, cette classification recouvre celle de la taille des particules concernées, intuitivement, on saisit que les particules les plus difficiles à éliminer sont les plus fines.

A cette notion de dimension, s'ajoutent deux autres encore plus importantes qui sont celles du rapport surface/volume des particules colloïdales qui leur confère des propriétés d'adsorption très prononcées, et celle de leur charge électrique de surface.

Cette charge peut provenir:

- De la dissociation de groupes ionisables appartenant au colloïde lui-même,
- De l'adsorption d'ions contenus dans la solution,
- D'une substitution isomorphique (remplacement dans un réseau macromoléculaire d'un atome par un autre atome de valence différente), c'est le cas général des argiles.

Les particules colloïdales sont caractérisées par deux points essentiels :

-D'une part, elles ont un diamètre très faible (de 1 nm à 1 µm)

-D'autre part, elles ont la particularité d'être chargées électronégativement, engendrant des forces de répulsions intercolloïdales.

Ces deux points confèrent aux colloïdes une vitesse de sédimentation extrêmement faible (que l'on peut même considérer comme nulle dans le cadre du traitement de l'eau). [w2]

Les particules en suspension dans une eau de surface proviennent de l'érosion du sol, de la dissolution de substances minérales et de la décomposition de matière organique. A cet apport naturel, s'ajoutent les eaux d'égouts domestiques, industriels ou agricoles.

En général, la turbidité est causée par des particules de matière inorganique, alors que la couleur est imputable aux particules de matière organique et aux hydroxydes de métaux. [w1]

III-5-2-Les différents types de colloïdes:

A/-Les colloïdes hydrophiles:

Ils proviennent de substances solubles présentant une affinité pour l'eau, et qui adsorbent une couche d'eau liée, protectrice. Dans ce groupe se trouvent les protéines, les carbohydrates et, d'une façon générale, les produits organiques. [1]

Ces colloïdes sont responsables de la coloration des eaux et sont en générale de nature organique, présentant des groupements de type R-NH₂, R-OH entre autre. Ces groupements électronégatifs vont créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau. Cette couche s'oppose au rapprochement et va être un facteur stabilisant. [w3]

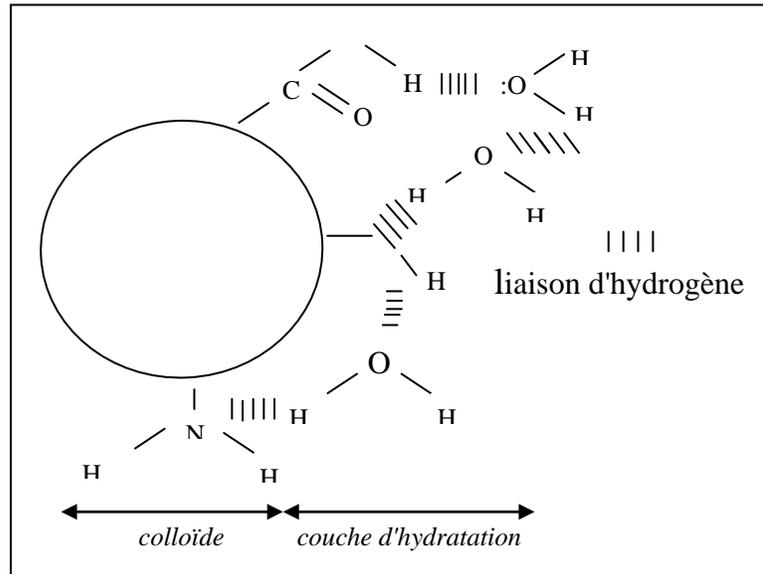


Fig III-3: Représentation du colloïde hydrophile.

B/-Les colloïdes hydrophobes:

Généralement plus gros et n'ont pas de couche protectrice. Ils proviennent de substances peu ou pas solubles tels que les métaux, leurs oxydes et/ou leurs hydroxydes. Plus généralement, ce sont des produits minéraux. [1]

Ils sont en générale de nature minérale. Leurs surfaces sont constituées de charges négatives qui engendrent une répulsion mutuelle rendant impossible toute agglomération.

En général peu de colloïdes sont exclusivement hydrophiles ou hydrophobes. La différence se fait sur la présence ou non de groupements de type hydrophiles qui induiront un degré d'hydratation plus ou moins important. [w3]

III-5-3-Théorie de la double couche:

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique qui est généralement négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus facile à éliminer. Elles demeurent donc stables.

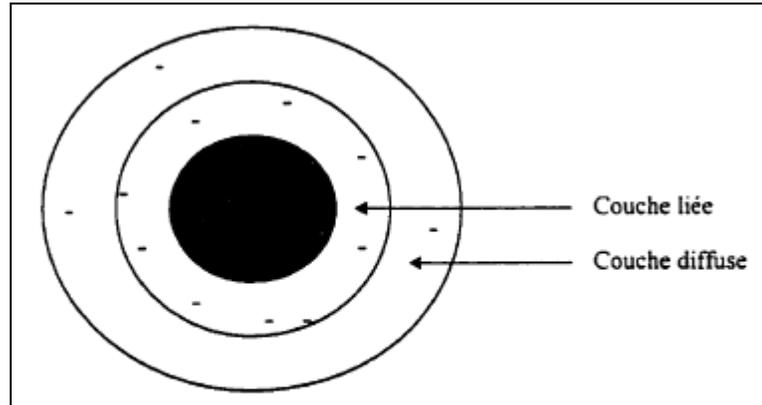


Fig III-4: Double couche d'une particule colloïdale.

Les ions positifs présents dans l'eau neutralisent la charge à la surface de la particule et forment une "couche liée, de STERN" (théorie de Helmholtz). Cette couche contient des ions positifs qui adhèrent fortement à la particule, et elle se déplace avec la particule et attire à son tour des ions négatifs accompagnés d'une faible quantité d'ions positifs la "couche diffuse, ou la couche de Gouy" (théorie de Gouy-Chapman). Il y a donc un gradient électrostatique entre la surface de la particule et la solution. La figure III-3 est en fait un rassemblement des deux théories, communément appelée théorie de la "double couche". [3] [12]

III-5-4-Potentiel de Nernst:

C'est le potentiel présent à la surface de la particule. Il varie à peu près linéairement à l'intérieure de la gaine qui constitue la couche fixe.

III-5-5-Potentiel Zêta:

Il est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel Zêta et la stabilité diminuent.

C'est le potentiel qui existe entre la surface délimitant l'entité mobile et la surface extérieure de la couche diffuse. Il est défini par l'équation:

Z: Potentiel Zêta.

$$Z = \frac{4 \times \pi \times e \times q}{D}$$

e: Epaisseur effective de la couche diffuse.

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

D: Constante diélectrique du milieu.

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

Ω : force ionique (mole/l).

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

Z_i : Valence de l'ion i.

$$\Omega = 1/2 \sum C_i \times z_i^2$$

Une augmentation de la force comprime la couche diffuse vers la particule ce qui réduit le potentiel Zêta des particules hydrophobes. Pour les particules hydrophiles il faut plutôt agir sur la couche d'eau liée lorsqu'on veut favoriser leur agglomération.

L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leur agglomération. [12]

III-5-6-Les différentes forces existantes entre les particules colloïdales:

III-5-6-1-Forces de Van der Waals:

Une attraction entre les particules est ressentie suite aux forces de Van der Waals. Ces forces résultent d'une interaction atomique et moléculaire de nature dipolaire. Les forces de Van der Waals regroupent l'interaction de Keesom (orientation de dipôles permanents sous l'effet d'un champ électrique provoqué par un dipôle permanent), l'interaction de Debye (orientation des dipôles induits au sein d'atomes ou de molécules polarisables par un dipôle permanent) et l'interaction de London (orientation de dipôles dans le voisinage d'un dipôle instantané provoqué par une fluctuation dans la distribution de charges électriques).

Les forces attractives dépendent de la nature du matériau et du milieu de dispersion, de la taille des particules et de la distance entre particules.

III-5-6-2-Force de répulsion:

Elle tend à écarter les particules les unes des autres. Cette force dépend de la charge des particules qui sont de même signe. Elle est liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu. [w7] [1]

III-5-6-3-Energie potentielle totale d'interaction:

L'énergie potentielle totale d'interaction V_T est la somme de deux termes antagonistes : l'énergie potentielle d'attraction V_A et l'énergie potentielle de répulsion V_R .

V_T : Energie potentielle totale d'interaction.

$$V_T = V_A + V_R$$

V_A : Energie potentielle d'attraction.

V_R : Energie potentielle de répulsion.

L'énergie potentielle totale d'interaction présente de manière générale un maximum et deux minimums comme sur la figure:

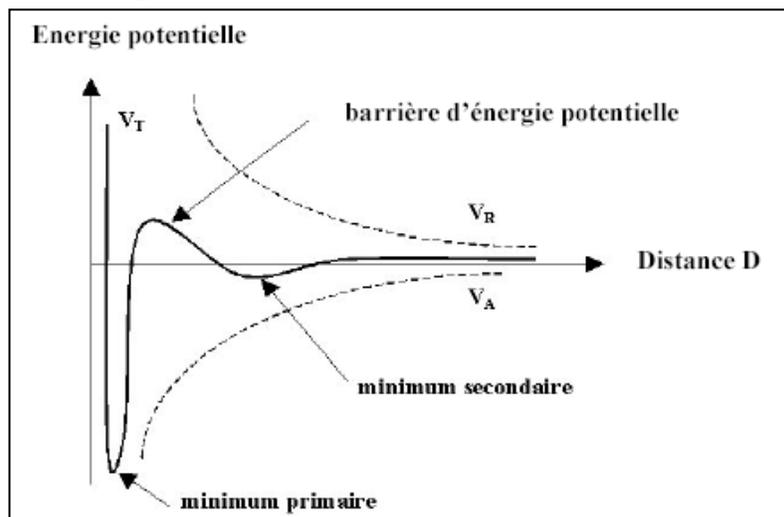


Fig III-5: Diagramme de l'énergie potentielle d'interaction entre deux particules en fonction de la distance (Lebrette-2002)

La courbe d'énergie potentielle totale V_T (trait plein) résulte de la somme des énergies potentielles de répulsion V_R et d'attraction V_A (traits en pointillés). Lorsque deux particules éloignées se rapprochent, il s'exerce d'abord une interaction attractive, responsable de l'apparition d'un premier minimum dans la courbe d'énergie potentielle totale (minimum secondaire) celui-ci correspond à une faible coagulation réversible, nommée floculation.

Si le système possède suffisamment d'énergie pour franchir la barrière énergétique, les particules peuvent alors atteindre la distance d'équilibre correspondant au minimum primaire. Une attraction forte entre les particules se développe et une coagulation irréversible se produit.

Les forces répulsives provoquent une augmentation rapide de l'énergie potentielle totale lorsque la distance interparticulaire devient très petite. Des amas de particules, nommés agrégats, peuvent ainsi se former.

La hauteur de la barrière d'énergie potentielle totale est importante pour obtenir une suspension stable. Pour une taille donnée de particules, elle dépend principalement des facteurs suivants [Jolivet-1994]:

- La concentration et la charge des ions de l'électrolyte via la longueur de Debye-Hückel: Une compression de la double couche se produit avec l'augmentation de la concentration et la charge de l'électrolyte.
- La nature du solvant: Une diminution de la permittivité du milieu diminue la valeur du maximum. L'utilisation d'un solvant organique diminue donc la barrière de potentiel par rapport à l'eau.
- Le potentiel électrique et donc la charge de surface: Le pH, la concentration et la charge des ions adsorbés influencent la valeur de la charge des particules.

III-5-7-Décantation des suspensions colloïdales:

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

Remarque : régime laminaire $\Rightarrow V = g/18\mu(\rho_s - \rho_l)d^2$

Avec.

V: Vitesse de décantation de la particule.

μ : Viscosité dynamique.

ρ_s, ρ_l : Masses volumiques de la particule et du liquide.

d : Diamètre de la particule.

g: accélération de la pesanteur.

Tableau III-2: Temps de décantation des colloïdes en fonction du diamètre.

| Diamètre du colloïde en mm | En micron | Temps de décantation pour 1 m d'eau à 20°C |
|----------------------------|-----------|--|
| 10^{-4} | 0,1 | 2 ans |
| 10^{-5} | 0,01 | 20 ans |
| 10^{-6} | 0,001 | 200 ans |

Les colloïdes sont donc des particules impossibles à décanter naturellement. [w7]

III-6-La coagulation:

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par les particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité (portant des charges négatives sur leur surface, elles ont tendance à se repousser). Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation.

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire faciliter leur agglomération, donc déstabiliser les colloïdes en diminuant les forces de répulsion électrostatiques: En pratique ce procédé est caractérisé par la neutralisation des charges négatives en ajoutant un réactif de charge positive ou coagulant.

C'est aussi l'agglomération des particules fines colloïdales en suspension et aussi des précipités obtenus par la réaction chimique des ions ferriques Fe^{3+} avec les substances dissoutes dans l'eau. Les principales réactions chimiques en causes sont les suivantes:

1. $Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O \longrightarrow 2Fe(OH)_3 + 3H_2SO_4$
2. $3Ca(HCO_3)_2 + 3H_2SO_4 \longrightarrow 3CaSO_4 + 6CO_2 + 6H_2O$
3. $2Fe_2(SO_4)_3 + 6Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 6CaSO_4 + 12CO_2$ [w4] [w10]

III-6-1-Principe de la coagulation:

Considérons deux particules colloïdales A et B. Entre ces deux particules, il existe des forces de répulsion électrostatiques, dues à la charge de surface, et des forces d'attraction intermoléculaires, dues aux interactions de Van der Waals. L'énergie potentielle de A et B varie donc en fonction de la distance les séparant [Les traitements de l'eau, C. Cardot, Ed. Ellipse]. [w1]

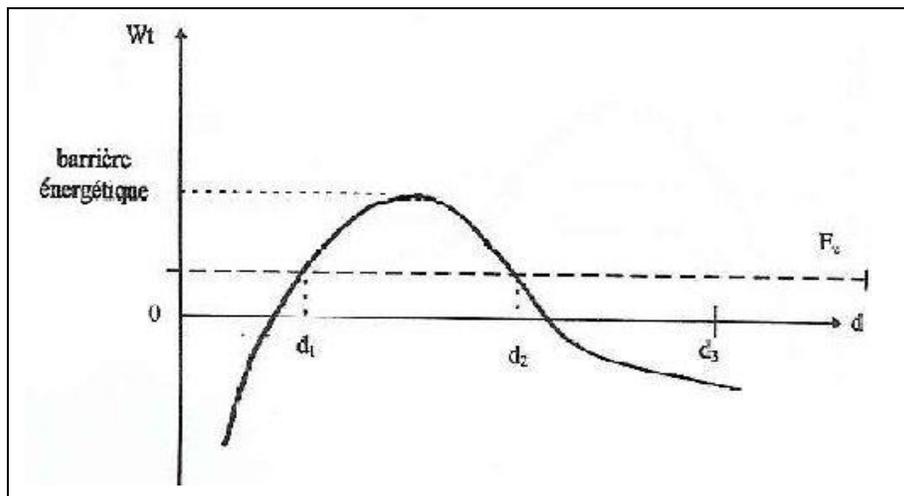


Fig III-6: La barrière énergétique.

Tableau III-3: Interaction entre deux particules en fonction de la distance les séparant.

| Distance interparticulaire | Interprétation |
|----------------------------|----------------------------|
| $d > d_3$ | aucune interaction |
| $d_3 < d < d_2$ | attraction faible |
| $d_2 < d < d_1$ | répulsion |
| $d < d_1$ | attraction forte, adhésion |

Dans un premier temps, la coagulation, par un ajout de sels métalliques (généralement de fer ou d'aluminium), permet de supprimer les répulsions intercolloïdales: les cations métalliques (Al^{3+} et Fe^{3+}) se lient aux colloïdes et les neutralisent. Les particules colloïdales peuvent désormais se rencontrer. [w2]

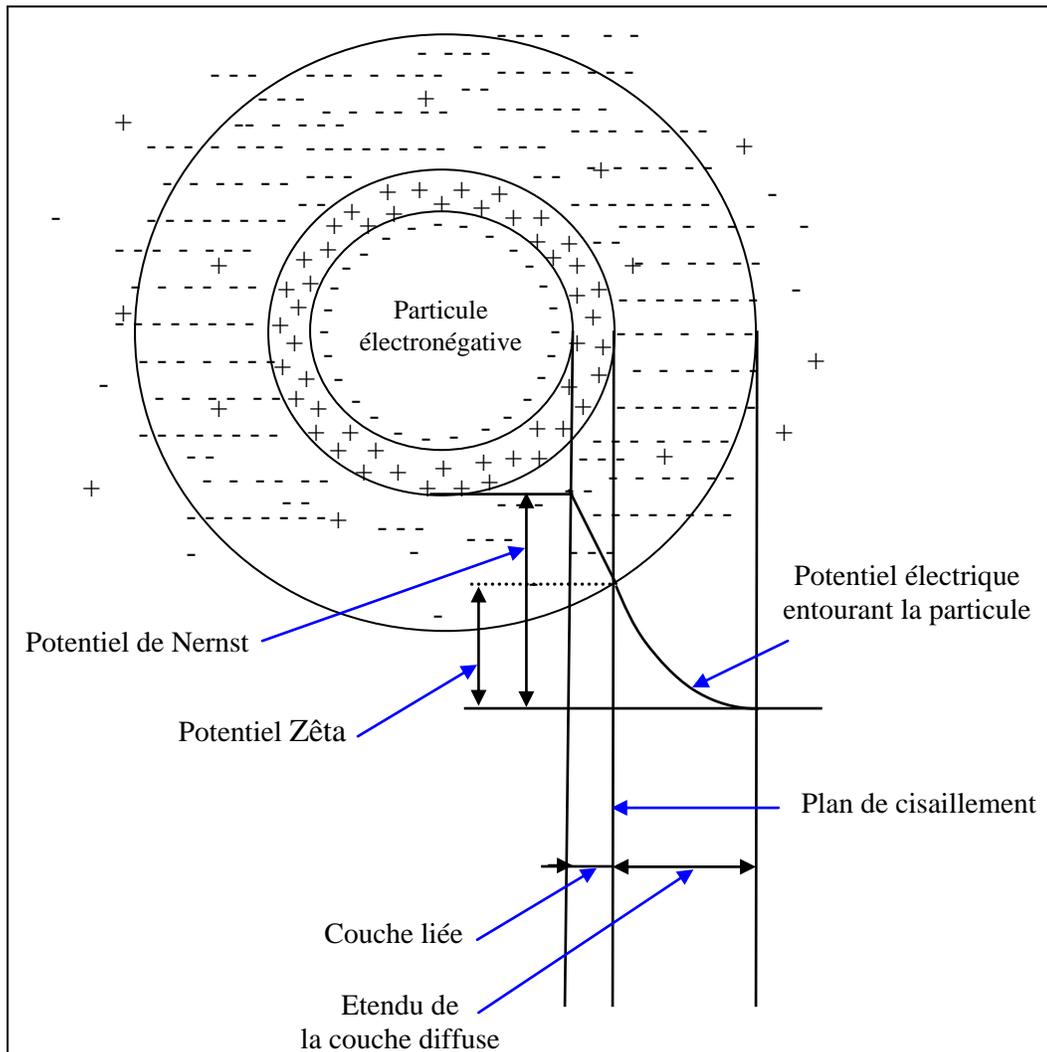


Fig III-7: Potentiels électrostatiques. [12]

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

Dans la couche liée, le potentiel de NERNST décroît linéairement car les cations constitutifs sont empilés uniformément. En revanche, dans la couche de GOUY, le potentiel électrostatique varie de manière non linéaire, étant donné que la répartition ionique résulte d'un mélange aléatoire de cations et d'anions (la valeur du potentiel à la surface de la couche de NERNST est appelée potentiel zêta). Les colloïdes étant chargés négativement, ce potentiel est négatif. Dans les eaux naturelles, sa valeur varie de -30 à -35 mV. [w1]

On en déduit donc que l'élimination des colloïdes passe par l'annulation du potentiel zêta afin d'annuler les forces de répulsion. [w9]

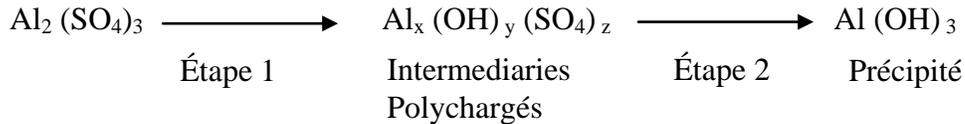
III-6-2-Réactifs coagulants:

L'efficacité des coagulants est directement liée à la valence des cations utilisés.

Les ions monovalents sont moins efficaces que les bi ou trivalents. Il est évident que les doses de coagulant à mettre en œuvre sont fonction de leur efficacité relative.

Dans le cas des ions monovalents la quantité nécessaire est de 100 pour une dose de 1 pour les ions trivalents. En conséquence, les coagulants utilisés sont des sels cationiques trivalents.

La mise en solution d'un coagulant se déroule en deux étapes. Le cas de sulfate d'alumine est très significatif. Les réactions peuvent être représentées de la façon suivante



L'étape 1: est une phase d'hydrolyse. Des intermédiaires poly chargés positifs se forment. Ces composés assez fugaces présentent un atome d'aluminium dont le nombre d'oxydation est très grand. Les formes Al IV, V et VII sont rencontrées. Conformément à la règle de SCHULZE-HARDY, ces intermédiaires poly chargés positifs sont très efficaces pour neutraliser la charge primaire négative des colloïdes. Il s'agit de la véritable forme coagulante qui déstabilise les particules chargées négativement.

L'étape1 dépend de la température et nécessite un PH compatible avec l'existence de ces intermédiaires poly chargés. Le temps de formation de ces composés est de l'ordre de 0.1 seconde.

L'étape 2 permet la formation de précipités $\text{Al}(\text{OH})_3$. cette réaction dépend de l'agitation du milieu.

Ce précipité est l'élément qui assure le pontage et la coalescence entre les colloïdes déstabilisés: c'est la forme floculant. Tout coagulant présente successivement les deux formes actives coagulantes et floculants. Le maintien de cette dernière dépend du PH du milieu. Cette notion de PH permet de définir les zones optimales de coagulation floculation.

La gamme optimale de PH pour l'utilisation du sulfate d'alumine est conditionnée par l'obtention et la persistance de la forme précipitée $\text{Al}(\text{OH})_3$. il s'agit ici de la fourchette 5.8 à 7.2. entre ces deux valeurs le précipité est prédominant. De plus, la forme dissoute Al^{3+} est inexistante. Toute fuite de cet ion au niveau d'une filière de traitement est problématique. En effet, l'ajout d'un adjuvant de floculation pour obtenir un floc cohérent est recommandé dans le cas de fuite chronique après vérification de PH.

Le chlorure ferrique possède une fourchette plus large comprise entre 5.5 et 8.3 toute fuite de Fe^{3+} peut entraîner une coloration rouge de l'eau et une corrosion sur le réseau de distribution de fait de l'existence des ferrobactéries et des phénomènes d'oxydoréduction.

L'utilisation de formes polymérisées de type WAC permet de s'affranchir de la première étape. Leur formule chimique est identique aux intermédiaires poly chargés. Leur prix est évidemment beaucoup plus élevé. En contrepartie, les difficultés de coagulation en hiver sont résolues.

Une autre particularité de l'addition de coagulant dans l'eau est à examiner. Tout coagulant mis en solution consomme de l'alcalinité. Cette perte de TAC est fonction de la nature et de

la concentration du composé mis en jeu. L'équation d'hydrolyse du sulfate d'alumine permet d'expliquer ce phénomène.



La consommation du TAC par le coagulant et la production de CO_2 sont les éléments importants de cette réaction. Cette perte d'alcalinité se traduit par une chute de PH, donc par une acidification de l'eau, sauf si en même temps, on a un dégazage de CO_2 . la précipité d'hydroxy d'alumine se forme aux dépens de la dureté temporaire ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) qui se transforme en dureté permanente sous forme de sulfate de calcium. Se composé peut précipiter et donner le gypse.

L'acidification de l'eau qui en découle peut perturber la réaction d'hydrolyse du coagulant. La correction de PH par addition de soude, de chaux ou de calcaire dans le cas d'eaux acides et d'acide sulfurique ou de CO_2 pour les eaux incrustantes est quelquefois nécessaire. L'acidité est à vérifiée avant et après la coagulation. Il s'agit de problème de l'équilibre calco-carbonique.

Tableau III-4: Perte d'alcalinité et production de CO_2 de quelques coagulants. Les valeurs sont données pour 100g de produit commercial et dépendent de la qualité de l'eau brute. La perte d'alcalinité mesurée en °F.

| Nom commercial | Perte d'alcalinité En g de CaO | Perte de TAC en °F | Production de CO_2 en g |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Sulfate d'aluminium | 25 | 4,5 | 40 |
| WAC | 5,4 | 1 | 8,6 |
| Aqualence | 5 | 9 | 8 |
| Chlorure ferrique | 21,1 | 3,8 | 33,3 |
| clairtan | 20,1 | 3,6 | 31,6 |

III-6-3-Principaux réactifs coagulants:

Le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique et le polychlorure d'aluminium sont les principaux produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau potable. Ces produits agissent en neutralisant la charge négative des composés dissous et des particules en suspension dans l'eau au moyen de la charge positive de l'aluminium ou du fer.

III-6-3-1-Les coagulants minéraux:

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

- Les sulfates d'aluminium et de fer III : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ et $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.
- Les chlorures d'aluminium et de fer III : AlCl_3 et FeCl_3 .
- Les mélanges de sulfates et de chaux : $\text{M}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Les produits mixtes $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$.

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



Le problème posé par les coagulants minéraux vient de la formation d'hydroxydes précipités qui entraîne la production d'un volume de boue important. Ces boues doivent être éliminées ultérieurement dans le processus de séparation liquide-solide.

III-6-3-2-Les coagulants organiques de synthèse:

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

Ils présentent l'avantage de réduire considérablement le volume de boue produite. Mais, dans certains cas, ils sont moins efficaces. Donc, l'utilisation conjointe des deux types de coagulant permet une très nette diminution de la quantité de coagulant minéral nécessaire (40 à 80 %) tout en assurant un moindre volume de boue produite.

III-6-4-Exemple de quelques coagulants:

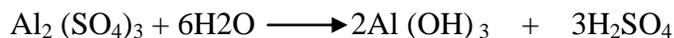
1/-Sulfate d'aluminium:

Dans les usines de traitement de l'eau, c'est le sulfate d'aluminium qu'on utilise le plus souvent comme coagulant chimique, suivi de près par le chlorure ferrique.

Le sulfate d'aluminium est il a donc pour formule : $Al_2(SO_4)_3$. Il est utilisé actuellement dans le traitement des eaux. On le trouve dans le commerce sous forme de cristaux. [2]

Le sulfate d'aluminium est actuellement le coagulant le plus largement utilisé. C'est un sel basique, hydraté, formé par la combinaison de deux cations aluminium (Al^{3+}) et de trois anions sulfate (SO_4^{2-}) commercialisé sous la forme solide $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$.

Ce sel se dissocie dans l'eau en ions aluminium et sulfate, conduisant à des réactions chimiques avec les ions hydroxyde d'aluminium qui précipite sous la forme d'un floc volumineux.



HUNDT et O'MELLA (1988) ont étudié la spécialisation de sulfate d'aluminium en fonction de pH et ont montré:

- Qu'à pH <4,5 les espèces prédominantes sont des monomères et des polymères de petites taille.
- Que pour pH 5,0 à 7,0: 92 à 92 % d'aluminium est sous forme de précipiter de $Al(OH)_3$.

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

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).

2/-Chlorure ferrique:

Le chlorure ferrique est généralement hexahydraté, obtenu en dissolvant du fer avec de l'acide chlorhydrique et en oxydant la solution avec du chlore.

Ce coagulant est aussi employé comme agent de précipitation du phosphate et comme agent de conditionnement de la boue. Ce sel se trouve sous forme $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, il se dissocie au contact de l'eau pour donner l'hydroxyde de fer.



La gamme de pH d'utilisation est de 5,5 à 8,5 (Optimum 8). Sa formule à l'état pur est $FeCl_3$.

3/-WAC (PAC):

La gamme de pH d'utilisation est de 6 à 7,5 (Optimum 6,5).

C'est un polychlorure d'aluminium basique dont la formule brute s'écrit: $Al_n (OH)_m Cl_{3n-m}$ dans laquelle $m/3n$ est compris entre 0,45 et 0,60.

Il se présente sous forme d'un liquide dont la teneur en Al_2O_3 est d'environ 10 %.

On peut citer également l'aluminate de sodium seul ou conjointement avec le sulfate d'alumine ou le chlorure ferrique, le sulfate ferrique, le sulfate ferreux. [1]

4/-P.C.B.A:

C'est un polychlorure basique d'aluminium dont la formule chimique générale est $[Al_2(OH)_5Cl]_n$. il est sous forme très instable.

Le P.C.B.A se prépare sur place et on exprime parfois ses doses en poids $AlCl_3 \cdot 6H_2O$. Ceci permet, lorsque l'on compare des différents coagulants, d'exprimer les résultats avec les mêmes unités. [9]

5/-Le charbon actif en poudre (CAP):

Une aide à la coagulation, peut être utilisé dans les bassins de coagulation pour aider à éliminer les composantes qui donnent un goût ou une odeur à l'eau et pour éliminer une partie du carbone organique. [w9]

III-6-5-Avantages et inconvénients de divers coagulants chimiques:

Tableau III-5: Avantages et inconvénients de divers coagulants chimiques. [w9]

| PRODUIT | AVANTAGES | INCONVÉNIENTS |
|---------------------------------------|---|--|
| Chlorure ferrique ou sulfate ferrique | -Le meilleur pour éliminer les matières organiques. -Bas prix. -N'ajoute pas d'aluminium à l'eau. -Les concentrations élevées de résidus de fer sont faciles à détecter. | -Un mauvais dosage produit une coloration rougeâtre et une concentration élevée de résidus de fer. -La forte concentration de résidus de fer risque de boucher les filtres et de tacher la lessive. -Très acide (le port d'un équipement de protection complet est de rigueur). -Boue inesthétique (brune). |
| Sulfate d'aluminium | -Relativement peu coûteux. -Moins acide (il faut quand même porter un équipement de protection). | -Elimination du C.O.D réduite. -Les erreurs de dosage produisent une grande quantité de résidus d'aluminium, posant un risque potentiel pour la santé. |
| Polychlorure d'aluminium | -Taux de résidus plus faible que le sulfate d'aluminium. -Moins d'impact sur le pH et l'alcalinité. | -Coûte trois fois plus cher que les autres coagulants. |

III-6-6-Le meilleur coagulant pour un système domestique de traitement:

La neutralisation de la charge superficielle négative du colloïde est réalisée par l'ajout de cations. Pour choisir le coagulant, il faut tenir compte de:

- Sa valence: La coagulation est d'autant plus efficace que la valence du cation est élevée (d'après la théorie de Schulze Hardy, un ion trivalent est dix fois plus efficace qu'un ion divalent);
- Son innocuité;
- Son coût.

Le polychlorure d'aluminium est le coagulant chimique recommandé pour les systèmes domestiques de traitement offerts sur le marché. Bien que le polychlorure d'aluminium coûte cher, il agit bien et n'est pas touché par les fluctuations saisonnières de l'alcalinité. Le sulfate d'aluminium, le chlorure ferrique et le sulfate ferrique sont plus sensibles aux fluctuations de l'alcalinité. Il faut procéder à des ajustements de dosage fréquents pour assurer le résultat du traitement. [w9]

III-7-La floculation:

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de rencontre entre les particules grâce à l'agitation lente du fluide (accroître le volume, le poids et la cohésion du floc).

La floculation consiste à alourdir les floes déjà formés par coagulation qu'on pourra facilement les éliminer par décantation. Le réactif, floculant, ou adjuvant de floculation, injecté pour former des " ponts " entre les floes. Le floculant est en général un polymère d'origine naturelle, minérale (silice activée) ou organique (alginates ou amidon). Cette étape qui se place donc après la coagulation, nécessite un milieu où l'agitation est très faible pour ne pas casser les floes. [w1][w3] [w4]

III-7-1-Types de Floculation:

III-7-1-1-Floculation péricinétique:

Durant ce type de floculation, le mouvement brownien des particules est fonction de la température de l'eau. Lorsqu'elles entrent en contact, les particules ont tendance à s'agglutiner les unes aux autres. Le nombre total de particules varie donc selon l'équation suivante:

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

Où:

N: nombre de particules par m³.

Γ: facteur tenant en compte l'efficacité des collisions.

κ: constante de Boltzmann (1.38x10⁻²³ J*k⁻¹)

θ: température (k).

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

Le taux de variation du nombre de particules, lors de la floculation péricinétique est important lorsque la taille des particules est inférieure à 1 micron. Au delà de cette taille, d'autres mécanismes doivent être utilisés afin d'assurer un statut d'agrégation des particules raisonnable. [3]

III-7-1-2-Floculation orthocinétique:

Ce type de floculation est fonction de l'énergie dissipée dans le fluide. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps et elle est caractérisée par le gradient de vitesse G. L'efficacité du processus est exprimée selon l'équation suivante lorsque le régime est turbulent:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{2}{3} \Gamma G d^3 N^2$$

Où:

G: gradient de vitesse (s⁻¹).

d: diamètre des particules (m).

Le gradient de vitesse est défini selon l'équation [Camp et Stein, 1943]:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Où:

P: puissance réellement dissipée (w).

V: volume du bassin (m³).

μ : viscosité dynamique de l'eau (kg/m*s).

Selon le degré de floculation désiré, une agitation plus ou moins énergétique doit être effectuée. [7]

III-7-2-Les adjuvants de floculation ou floculants:

Le floc qui se forme par l'agglomération de plusieurs colloïdes peut ne pas être suffisamment large pour se décanter ou pour se déshydrater à la vitesse souhaitée. L'utilisation d'un floculant est alors nécessaire. Il rassemble toutes les particules de floc dans un filet, construisant un pont d'une surface à l'autre et liant chaque particule pour former de vastes agglomérats.

Le temps à respecter entre les ajouts de coagulant et de floculant est primordial. En effet, un floculant n'est en général efficace que lorsque la phase de coagulation est achevée. Pour choisir les floculants, il faut considérer la taille, la cohésion et la vitesse de décantation du floc. Comme pour les coagulants, le taux de traitement à mettre en oeuvre est donné par un essai de floculation.

On utilise:

- Des polymères minéraux tels que la silice activée (SiO₂), généralement associée au sulfate d'aluminium en eau froide;
- Des polymères naturels extraits de substances animales ou végétales: amidons, alginates (obtenus à partir d'algues marines);
- Des polymères de synthèse apparus plus récemment qui ont fait évoluer considérablement les performances de la floculation. Ils conduisent souvent à un volume de boue très inférieur. [w18]

III-7-3-Exemple de quelques floculants:

1)-La silice activée:

On exprime les doses en poids de SiO₂. Industriellement on la prépare en continu en mélangeant une solution de silicate de sodium, une solution d'acide sulfurique et en diluant de façon à obtenir une concentration de 1% en SiO₂. [9]

2)-Les alginates:

Ils sont souvent commercialisés sous le nom commercial (AQUALGINE). Ce sont des extraits d'algues marines. Ils se présentent sous forme de poudre peu soluble. [9]

3)-Les amidons:

Ils sont connus sous le nom commercial (AMIDON 60, FLOERGER) et sont en poudre. [9]

4)-Les polyélectrolytes:

Ils ne sont pas encore autorisés pour les eaux potables. Une grande variété existe, mais les plus répandus sont les anioniques. [9]

III-8-Conclusion:

La coagulation est une opération essentielle dans l'étape de clarification des eaux de surface. Une méthode de traitement de l'eau sûre et efficace, qui améliore la qualité de l'eau en abaissant la teneur en composés organiques, en phosphore dissous, en fer et en particules en suspension et en diminuant la coloration de l'eau. Elle est aussi très complexe car elle dépend de nombreux facteurs afin d'obtenir une eau prête à être distribuée au consommateur. Pour cela les opérateurs d'usines doivent en particulier:

- Surveiller en continu les évolutions des caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute, et donc posséder des équipements de mesure et d'analyse des différents paramètres influençant sur la coagulation;
- Conduire des tests (Jar Test) suivant une procédure rigoureuse et maîtrisée, en particulier au niveau du maintien de la température à la valeur de celle de l'eau brute à tester, de l'élimination des risques de contamination des échantillons par contact avec des accessoires en aluminium, de la conservation des échantillons ... ;
- Disposer des installations de préparation et d'injection de réactifs souples permettant de remplacer le sulfate d'aluminium par un autre coagulant, tout au moins durant certaines périodes critiques, le sulfate d'aluminium restant le réactif le plus économique d'utilisation.

Chapitre IV: Paramètres influençant la coagulation floculation

IV-1-Effet de la coagulation sur les paramètres de l'eau:

1)-La turbidité:

L'élimination de la turbidité est très importante. L'élimination de gros colloïdes minéraux, ceux là même qui sont responsables de la turbidité est le domaine de prédilection de la coagulation. [9]

2)-La couleur:

La coagulation est aussi l'élimination de la couleur, c'est-à-dire des matières organiques à l'état colloïdal et dissous et les micropolluants organiques. [9]

3)-La résistivité:

Elle baisse légèrement à cause des ions sulfatés ajoutés avec l'aluminium dans le cas du traitement avec le sulfate d'aluminium et des polymères d'aluminium (sulfates). [9]

4)-Le pH:

Le pH est plus ou moins affecté selon le type de coagulant utilisé et sa concentration. Quand le sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$ est utilisé comme coagulant et est additionné à l'eau, il se déclenche une hydrolyse qui entraîne une baisse sensible du pH. Généralement, chaque Al^{3+} nécessite pour passer à l'état de l'hydroxyde d'aluminium ($Al(OH)_3$), 3 OH^- provenant des bicarbonates et de l'eau elle-même. Les protons H^+ sont ainsi libérés. Le T.A.C baisse donc également. Par contre, l'utilisation des polymères basiques d'aluminium comme coagulant n'entraîne qu'une très faible variation du pH qui n'affecte en rien la déstabilisation.

5)-La silice, les phosphates et le fluor:

La coagulation élimine, en partie, la silice par suite de la formation de silicates due à l'affinité de la silice pour l'aluminium. Les phosphates et le fluor sont considérablement diminués par suite de la forte attirance qu'ils ont pour l'aluminium.

IV-2-Facteurs intervenant dans la coagulation des particules en suspension:

A/-La valence des colloïdes:

Selon la nature des particules colloïdales et leur interaction vers le milieu aqueux, c'est-à-dire leur faculté d'échange des cations périphériques selon qu'elle s'avère forte ou faible, elle favorise plus ou moins le processus de coagulation. [9]

B/-Le potentiel Zêta:

Certaines forces attractives existent entre tous les types de particules colloïdales quelles que soit leur nature chimique. Ces forces attractives (forces de Van der Waals), sont responsables de l'agrégation de beaucoup de systèmes colloïdaux. Leur ampleur dépend de la nature des atomes qui forment les particules colloïdales et de leur densité.

Ces forces attractives diminuent avec l'augmentation de la distance séparant les particules, ainsi que l'énergie potentielle attractive qui en résulte.

Les effets de charge sur la stabilité apparente des colloïdes irréversibles doivent être déterminés par la somme des énergies attractives et répulsives de l'interaction.

Cette nette répulsion peut être considérée comme une barrière d'énergie d'activation qui doit être surmontée pour que l'agrégation ait lieu. Ses amplitudes dépendent de la charge sur les particules et de la composition ionique de la solution. A des forces ioniques élevées, cette barrière d'énergie peut disparaître.

Le taux de coagulation dépend de la grandeur de la barrière d'énergie et de l'énergie cinétique qui anime les particules colloïdales.

Les systèmes colloïdaux qui ont une haute énergie d'activation et une faible énergie cinétique coagulent très lentement (colloïdes persistants) par contre les colloïdes avec une faibles énergie d'activation et/ou une haute énergie cinétique coagulent rapidement (systèmes caducs). [9]

C/-Grosseurs et concentration des particules colloïdales:

Il existe un seul propice, pour la coagulation, du point de vue dimensionnel. Pour les particules dont les dimensions sont inférieures au micron, les forces de surface deviennent prépondérantes vis-à-vis des forces de masse. Dans ces conditions, on constate un état de dispersion stable du aux effets conjugués du mouvement brownien. De même, il s'avère que la concentration des particules, c'est-à-dire le nombre de charges électriques à mettre en jeu pour rompre le potentiel Zêta a une grande influence sur la coagulation. Cette coagulation est très difficile quand la concentration colloïdale est basse, du moment que le taux de contact interparticulaire se trouve probablement baissé. [9]

D/-L'état d'hydratation:

L'hydratation est un phénomène complexe dont les effets se répercutent sur le taux d'agrégation des colloïdes.

Dans une solution aqueuse, les particules microscopiques s'hydratent et s'enveloppent de liquide inter-micellaire. Cette monocouche d'eau absorbée chimiquement sur les surfaces des particules (ex: les oxydes métalliques, les argiles et la quartz) produit l'effet d'une gaine isolante protectrice, s'opposant à l'agrégation des particules, par réduction de la tension superficielle à l'interface particule-liquide. Par conséquent, la stabilité des colloïdes se trouve renforcée.

Ce phénomène peut être contrarié par l'augmentation de la quantité de coagulant et le prolongement de l'opération. [9]

E/-Electrisation des particules:

Comme il a été souligné précédemment, toutes les particules sont ionisées. Cette électrisation est due soit aux constituants superficiels par adsorption préférentielle soit par combinaison de la particule avec le solvant suivie d'une dissociation de cette combinaison.

La charge électrique agit par modification de la tension superficielle. Si cette tension est positive, les particules se dispersent.

En réalité, l'électrisation n'est pas la seule cause de dispersion et ne fait que superposer son effet à ceux des autres agents. Mais elle s'avère un facteur prépondérant du moment que son abaissement au dessous d'un certain point critique provoque ou du moins accélère la coagulation. [9]

F/-Concentration du coagulant:

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes. Une surdose du polymère produit inévitablement une restabilisation des particules colloïdales qui sont susceptibles de changer de charge de surface. Aussi les sites d'adsorption des particules colloïdales ne seraient plus disponibles pour la formation des ponts interparticulaires.

Un traitement de coagulation mal ajusté peut donc conduire à une dégradation rapide de la qualité de l'eau et à des dépenses d'exploitation non justifiées.

Bien souvent, la dose de coagulant conditionne le fonctionnement des ouvrages de séparation et il se trouve tout simplement impossible de réaliser la clarification si cette dose est mal ajustée. [9]

G/-Vitesse et temps d'agitation:

Lors de l'introduction du coagulant dans l'eau, on procède à une agitation rapide pour la dispersion et l'homogénéisation de la solution. Mais une agitation intense empêche l'agrégation des particules, tandis qu'une agitation prolongée conduit systématiquement à la restabilisation du système agrégé, l'effraction des liaisons entre coagulant et la surface des particules, et le rabattement ultérieur des segments étendus sur la surface des particules. [9]

H/-La température:

La température est un facteur physique important, vu ses effets sur la coagulation et son rôle sur la floculation. Toute diminution de la température suivie d'une augmentation de la viscosité et par conséquent le taux de formation des floes se trouve réduit. Aussi il est bien connu qu'en hiver le floc est plus fragile et moins dense.

De plus, la température joue probablement un rôle dans la diminution du taux de réaction chimique. De même, la valeur du pH décroît avec la diminution de la température et ce changement devient plus important avec les petites doses de coagulant. Ces difficultés dues aux basses températures peuvent être généralement vaincues par une conduite de la coagulation à un pH voisin, autant que possible du pH optimum. Ceci peut être obtenu par l'augmentation de la dose de coagulant, qui non seulement accroît la probabilité de collision des particules mais réduit l'effet du changement du pH optimum. [9]

I/-Le potentiel d'hydrogène pH:

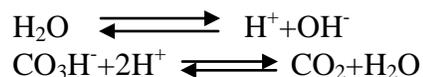
Le pH est l'un des paramètres les plus importants qu'il faut noter du fait qu'il joue un rôle déterminant dans la coagulation. Il influence le signe de l'électrisation des colloïdes suivant qu'il est acide ou basique. Les flocons d'hydroxyde de fer se forment dans des limites de pH assez larges entre 4 et 11. Pour les hydroxydes d'aluminium, les limites sont plus étroites.

En pratique, le pH optimum dépend en premier lieu des colloïdes à éliminer. Les matières organiques acides sont mieux éliminées à un pH bas, tandis que les substances basiques sont mieux coagulées à un pH élevé. [9]

J/-Rôle des bicarbonates dans l'eau:

Pendant la coagulation, il est important que les bicarbonates soient en proportion suffisante dans l'eau pour que les sels d'aluminium s'exercent de façon optimum en formant des hydrates d'aluminium sous forme colloïdale.

La formation d'ions complexes mobilise un certain nombre d'ions hydroxydes OH^- et fait entrer en jeu l'effet tampon des bicarbonates présents. L'hydrolyse conduit donc à un abaissement de l'alcalinité. L'effet tampon ne peut par nature même neutraliser entièrement le phénomène qui la déclenche, il y a également un abaissement du pH et une augmentation de la teneur en gaz carbonique dissous.



L'alcalinité bicarbonatée peut être corrigée par neutralisation et addition de CaO mais il faut se garder d'un excès de CaO qui provoquerait ou renforcerait les charges négatives. [9]

IV-3-Paramètres influençant la coagulation floculation:

Le processus de coagulation est complexe et peut être influencé par plusieurs facteurs. Certains sont liés à la qualité de l'eau brute et d'autres au traitement lui-même.

IV-3-1-Facteurs liés à la qualité de l'eau brute:

IV-3-1-1-La nature de la couleur et de la turbidité et leur proportion relative dans l'eau brute:

Rappelons qu'il n'y a pas de solution de continuité entre les mesures de couleur et de turbidité des eaux, et que seules les tailles des particules et dans une certaine mesure leur nature, permettent d'établir une classification arbitraire.

Les particules de grande taille et de nature généralement minérale (argiles) constituent la turbidité. Les petites particules et certains composés solubles de nature généralement organique sont responsables de la couleur.

La floculation des acides humiques exige des doses élevées de coagulant approximativement proportionnelles à leur concentration dans l'eau. Au contraire, les colloïdes minéraux sont facilement floculés par de faibles doses de coagulant, sans rapport avec l'intensité de la turbidité. [w3]

Des études réalisées sur la coagulation floculation de suspensions colloïdales affirment que:

- * La nature de la suspension influe sur la turbidité résiduelle et le taux de sulfate d'aluminium à l'optimum de floculation, aussi il existe une relation stoechiométrique entre la quantité des colloïdes organiques et la dose du coagulant consommé;
- * L'ajout d'une faible quantité d'argile permet d'améliorer le rendement d'élimination des substances humiques;
- * La structure minéralogique et les propriétés surfaciques des particules affectent la dose du coagulant;
- * L'élimination de la matière organique est liée directement à son poids moléculaire, aux nombre et degré d'ionisation du groupement fonctionnel;

Dans le cas de la déstabilisation par neutralisation de charge, la dose du coagulant est liée à:

- La solubilité de l'hydroxyde de l'aluminium;
- La densité de charge des particules primaires;
- La surface spécifique des particules primaires. [1]

IV-3-1-2-La température:

Des études réalisées sur l'influence de la température sur le processus de coagulation floculation montrent que l'abaissement de la température entraîne:

- Une augmentation de la concentration en sulfate d'aluminium à l'optimum de floculation;
- Une décroissance de la taille des floes;
- Un déplacement du pH optimum de floculation vers les pH basiques;
- Une inhibition des mécanismes de floculation pour des températures inférieures à 10°C, en particulier, pour les eaux peu turbides.

DESJARDINS (1996), montre que la température affecte de manière significative l'abattement de la matière organique par le sulfate d'aluminium. [1]

Comme toute réaction chimique, la floculation est accélérée par l'élévation de la température. La floculation des eaux froides est donc plus lente et moins complète que celle des eaux chaudes.

D'autre part, la rapide augmentation de la viscosité de l'eau lorsque la température s'abaisse (la valeur de la viscosité passe de 1 à 2 entre 25 et 0 °C), joue contre la fréquence des rencontres des particules dans la phase de floculation orthocinétique et diminue le nombre de chocs efficaces.

Enfin, cette viscosité entrave le phénomène de décantation. [1]

Nous savons qu'une baisse de la température ralentit la cinétique des réactions chimiques. Les premières études sur la coagulation floculation en eau froide remontent à plusieurs années. En effet, Camp et al (1940) expliquent le problème en eau froide de deux façons :

- 1) La solubilité des coagulants est plus faible;
- 2) L'augmentation de la viscosité de l'eau freine la décantation des floes.

Des études ont été faites afin de déterminer le coagulant qui est le moins affecté par une baisse de la température. Morris et Knocke (1984) comparent l'effet de la température sur les performances du chlorure ferrique $FeCl_3$ et du chlorure d'aluminium $AlCl_3$.

L'évaluation des produits est basée sur la cinétique des réactions, les caractéristiques des floes formés et l'enlèvement de la turbidité. Ils concluent que les cinétiques de réaction sont plus faibles en eaux froides et que leur meilleur enlèvement de la turbidité est réalisé par le $FeCl_3$ comparé au $AlCl_3$. De plus, ils remarquent que les floes formés à partir du chlorure d'aluminium sont plus petits et plus difficilement décantables. Par contre, le taux de précipitation n'est pas affecté par la température. Ils ont donc proposé d'utiliser le chlorure ferrique $FeCl_3$ comme coagulant primaire ou aide-coagulant. Il est à noter que les conditions des tests au laboratoire simulent une coagulation floculation classique avec un mélange rapide de 1 minute suivie d'un mélange lent de 20 minutes et d'une période de décantation d'une heure. [3]

Une étude approfondie de l'effet de la température sur la floculation a été faite par Mohtadi et Rao (1973). Les variations du potentiel Zêta sont analysées de même que les taux de formation de floes, les doses des produits chimiques ainsi que les pH optimaux.

Dans cette étude, les coagulants utilisés sont l'alun et des polyélectrolytes cationiques (Purifloc 32-C), non ioniques (Magnifloc 900N) et anioniques (Magnifloc 870A). Les résultats montrent que dans les conditions des essais (glaises kaolines et bentonite à des températures entre 1°C et 20°C) les potentiels zêta ne varient pas avec la température.

Pour l'alun, l'impact d'une baisse de la température est compensé par une augmentation de la dose d'alun ou par une augmentation du pH (nouvelle zone optimale de pH 6,6 à 6,8). Les résultats montrent également que le taux de formation des floes est dépendant de la température dans le cas de l'alun, par contre lors de l'utilisation d'un polyélectrolyte cationique, la température n'a pas d'effet sur le taux de formation des floes. Les auteurs montrent aussi que les polyélectrolytes anioniques et nonioniques ne réussissent pas à provoquer une floculation des particules chargées négativement. Ce résultat va à l'encontre de ce qu'ont démontré Gan et al. (1991).

Une étude (Kank et al, 1995) tente de déterminer les effets de la température sur la coagulation et la floculation d'une glaise kaoline par le nitrate ferrique. Il a d'abord été montré que l'augmentation du pH de 6 à 8 fait augmenter le taux de floculation. Ce taux peut aussi être amélioré en augmentant l'intensité du mélange lent. L'effet de la température sur le pH optimal est bien illustré. Ce dernier passe de 6,8 à 23°C à 7,5 à 5°C afin que le nombre d'ions OH^- soit maintenu. [3]

Le gradient de vitesse, donné par la relation ci-après, est l'un des paramètres agissant sur la probabilité de rencontre des particules dans le processus de floculation. Il dépend de la viscosité dynamique de l'eau, et donc de sa température.

G: Gradient de vitesse (s^{-1}).
P: Puissance dissipée (Watt).
V: Volume du bassin (m^3).
 η : Viscosité dynamique (Pa.s).

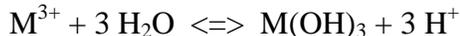
$$G = \sqrt{\frac{P}{V \times \eta}}$$

IV-3-1-3-L'influence du pH:

Le rôle du pH est particulièrement important dans la mesure où il détermine à la fois la charge des colloïdes et la nature des espèces qui naissent de sels minéraux de Al et de Fe.

Pour chaque eau il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. [1]

Les coagulants inorganiques changent les propriétés physico-chimiques (pH, conductivité,...) de l'eau à traiter en raison de leur hydrolyse.



Le pH nécessaire pour la coagulation peut être ajusté en ajoutant une base ou un acide. [w3]

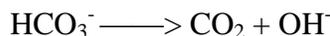
Tableau IV-1: pH optimum pour la coagulation floculation.

| Cation | pH optimum pour la coagulation floculation |
|------------------|--|
| Al ³⁺ | 6,0 – 7,4 |
| Fe ³⁺ | > 5 |

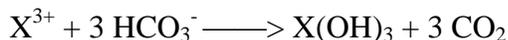
Le pH est l'un des paramètres qui affecte le plus la coagulation floculation. Son contrôle est donc suggéré. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation (Julien, 1983). Ce pH se situe souvent dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale, ce qui permet une meilleure précipitation. Le contrôle du pH permet aussi d'améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est faible. [3]

Dans la plupart des usines au Québec on utilise plutôt un sel d'aluminium (l'alun). À pH élevé, les concentrations d'aluminium dissout augmentent considérablement dans l'eau du robinet, ce qui est incompatible avec de l'eau potable. Le sulfate ferrique travaille très bien à des pH variant de 5,5 à 11,5. Le sel de fer offre définitivement plus de flexibilité. Il réagit beaucoup mieux et l'hydroxyde de fer produit est quasi insensible aux variations de pH dans la plage de pH utilisée. Même en ajoutant 5 à 7 mg/l de fer en provenance du sulfate ferrique, on obtient une eau traitée ayant des teneurs inférieures à 0,1 mg/l de fer, la norme esthétique maximale étant plus petite ou égale à 0,3 mg/l. [w10]

Aux valeurs habituelles de pH rencontrées dans les eaux naturelles, les ions OH⁻ libres n'existant pas, ils résulteront de la décomposition des bicarbonates (HCO₃⁻) par le floculant (et formation de gaz carbonique CO₂):



Réaction à laquelle se superpose celle de l'équilibre du bicarbonate de calcium avec ses produits de dissociation. L'équation globale type de coagulation peut donc s'écrire :



Donc, précipitation d'une hydroxyde métallique X(OH)₃ et formation de CO₂.

Rappelons que CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃ (acide carbonique).

L'apparition d'acide carbonique et la diminution subséquente de l'alcalinité bicarbonatée conduit à un abaissement du pH du milieu, dont l'ampleur dépend du pouvoir tampon (alcalinité initiale et force ionique) et de la dose de coagulant introduite.

C'est pour cette raison qu'il est essentiel de tenir compte du pH, de l'alcalinité et de la minéralisation de l'eau brute pour la définition du procédé de coagulation floculation. [w3]

Et voici un exemple avec l'utilisation de l'aluminium comme coagulant:

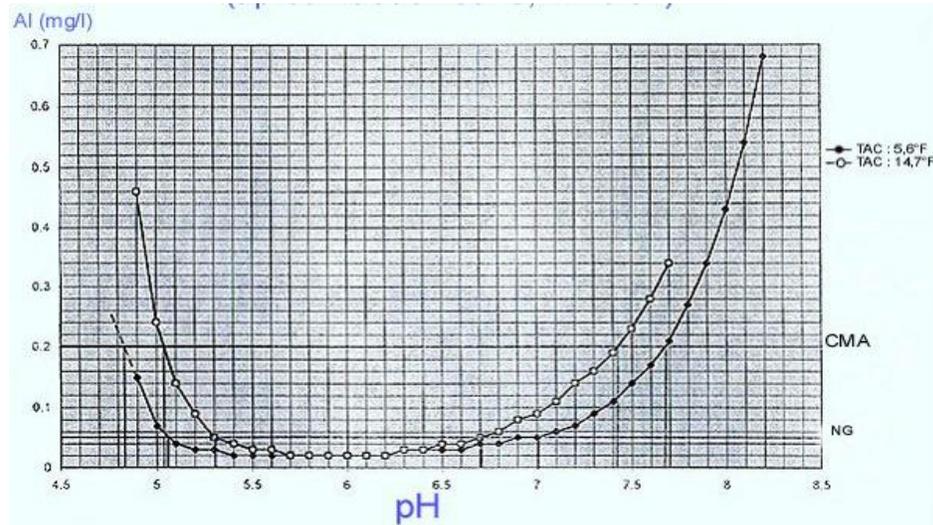


Fig IV-1: Solubilité de Al en fonction du pH et du TAC (après filtration sur 0.2 micron).

Il peut être nécessaire, pour obtenir une floculation correcte, d'ajuster le pH de l'eau en y ajoutant soit un acide, soit une base (soude, chaux, carbonate de sodium). [w3]

IV-3-1-4-Effets de l'alcalinité:

La capacité de l'eau à neutraliser des acides. Cette propriété dépend entre autres de la concentration en carbonate, bicarbonate et hydroxydes de l'eau. L'alcalinité se mesure en milligramme par litre équivalent carbonate de calcium (mg/l CaCO₃). [w3]

L'alcalinité naturelle de l'eau réagit avec l'alun pour former le précipité d'hydroxyde d'aluminium. Il faut donc un minimum d'alcalinité pour que l'alun agisse correctement.

Ce minimum permet aussi de stabiliser le pH dans la plage optimale au cours de la coagulation (Julien, 1983). Dans les eaux de faibles alcalinités, des coagulants préhydrolysés peuvent s'avérer avantageux car ils en consomment moins. [3]

IV-3-1-5-Effets des sels dissous:

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

- Modification de la plage de pH optimal;
- Modification du temps requis pour la floculation;
- Modification de la quantité de coagulant requis;
- Modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

La coagulation à l'aide des sels d'aluminium ou de fer est davantage affectée par les anions que par les cations. Exemple: SO₄²⁻, PO₄²⁻. Les cations Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ exercent une influence minime sur la coagulation.

IV-3-1-6-L'influence de la minéralisation:

L'influence de la minéralisation totale ou de teneur en certains cations ou anions a été abordée par différents auteurs, il en résulte que:

Les anions et cations ont une double action:

- Sur l'environnement des colloïdes: L'augmentation de la teneur en ions entraîne une diminution des forces de répulsion interparticulaire par compression de la double couche;
- Sur la formation des produits d'hydrolyse des sels de fer ou d'aluminium.

L'addition des ions sulfates (SO_4^{2-}) élargissait la plage de pH optimal vers l'acidité et favorise la formation de composés neutres ou chargés négativement, alors que l'addition d'ions phosphates (PO_4^{3-}) déplaçait sans élargir la plage de pH optimal et que les ions bicarbonates avaient un effet sur la précipitation des hydroxydes d'aluminium.

ZOUGRANA (1993), montre que l'alcalinité de l'eau brute joue un rôle important dans le processus de coagulation floculation et l'enlèvement du carbone organique total (COT).

PENG (1994), a mis en évidence que les sels de calcium et ceux d'aluminium affectent la floculation de suspension de kaolin avec du polymère anionique. [1]

IV-3-2-Facteurs liés au traitement:

IV-3-2-1-La nature et le dosage du coagulant:

Même si l'alun est le coagulant le plus utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par un sel de fer ou par des P.A.C ou P.A.S selon les caractéristiques de l'eau à traiter. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale qu'après essai au laboratoire vu la complexité du phénomène.

IV-3-2-2-Les conditions d'agitation:

Le processus de coagulation floculation se déroule généralement en deux étapes:

- ❖ Une étape de mise en contact entre l'eau à traiter et le coagulant. Cette étape se déroule généralement sous une agitation rapide. Son but est également de permettre la neutralisation de la charge des particules et d'amorcer le processus de floculation par la formation de microflocs. LETTERMAN (1973), montre que la turbidité résiduelle dépend du temps de mélange rapide et pour chaque combinaison de gradient de vitesse et dose du coagulant injecté; il existe un temps de mélange rapide associé au minimum de turbidité. FRANCESHI (1991), indique qu'il existe une valeur optimale de gradient de vitesse lors de la phase d'agitation rapide pour laquelle la turbidité résiduelle est minimale;
- ❖ Une étape d'agitation lente qui assure la mise en contact et la croissance des floccs, CAMP et STEIN proposent que le critère GT (dit critère de Camp) soit retenu pour le bon contrôle du bon fonctionnement d'un flocculateur $10^4 < GT < 10^5$ avec $20 < G < 40 \text{ s}^{-1}$, MLYANAMI (1982), confirme ce résultat dans le cas d'agitation par rotation et par vibration. KELLIL (1989), a montré qu'il existe un maximum pour la taille de floc de l'ordre de 500 μm qui correspond à une valeur de $GT=10^4$:
 - Pour les faibles valeurs de GT, le mécanisme de croissance prédomine;
 - Pour $GT > 10^4$ le mécanisme de cassage de floccs est plus important;
 - Plus la valeur de GT est grande plus le cassage du floc est important. [1]

L'injection du coagulant doit être extrêmement énergétique pour qu'il se disperse rapidement et uniformément dans toute la masse d'eau. Ceci est du à:

-L'importance du contact entre les particules et le coagulant évitant la déperdition de ce dernier dans l'eau.

-L'instabilité de certaines espèces (en particulier les espèces polycationiques). Les usines de traitement doivent être dotées de véritables mélangeurs rapides.

IV-3-2-3-La nature et le dosage de l'aide coagulant:

L'introduction des adjuvants pour améliorer la coagulation se fait surtout dans les cas suivants:

- Eau de faible turbidité.
- Eau de faible alcalinité.
- Eau froide.

Ces adjuvants doivent être injectés sous mélange énergétique avant ou après le coagulant. On peut citer: l'aluminate de sodium (pour une eau de faible alcalinité), la silice activée et les polyélectrolytes synthétiques.

Chapitre V: Méthodes et moyens utilisés

V-1-Interférences:

Il y a des interférences possibles qui peuvent rendre difficile la détermination de la dose optimale de coagulant.

A- Changement de la température lors du test:

Des mouvements thermiques ou de convection peuvent se produire et interférer sur la décantation des particules coagulées. Ce phénomène peut être limité en maîtrisant les variations de température de l'eau au cours du test.

B- Dégazage lors du test :

La flottation de floc peut se produire en raison de bulles de gaz générées par l'agitation mécanique, l'augmentation de la température ou une réaction chimique.

C- L'intervalle de temps entre l'échantillonnage et l'essai:

L'activité biologique et autres facteurs peuvent altérer les caractéristiques de la coagulation d'une eau. Pour cette raison le laps de temps entre le prélèvement et le test doit être réduit au minimum et dans tous les cas être noté.

V-2-Travail au laboratoire:

V-2-1-Principe:

A des volumes identiques d'eau à traiter, on injecte des quantités croissantes de coagulant de façon à déterminer la dose permettant d'obtenir une eau traitée de meilleure qualité possible. La même opération est répétée pour différents types de coagulant. Les résultats permettent de choisir la nature et la dose de coagulant.

V-2-2-Réactifs:

- Solution mère de coagulant (100 g/l de sel d'aluminium exprimée en produit commercial).
- Solution fille (10 g/l) préparée le jour de l'essais.
- Solution mère de floculant poly électrolyte (5 g/l).

V-2-3-Appareillage:

- Un chronomètre;
- Une éprouvette de un litre;
- Un floculateur de laboratoire avec six béciers de floculation;
- Un siphon (d ≈ 0,5 mm) recourbé vers le haut pour éviter l'aspiration des boues;
- 7 vases de 0,5 litre pour récupérer les échantillons;
- 1 pipette graduée de 10 ml;
- 1 pH mètre;
- 1 turbidimètre;
- Le jar test: Équipement de laboratoire pour tester des différents produits chimiques à utiliser ultérieurement dans le traitement physico-chimique (voir figure V-1). Cet équipement est composé de 6 postes avec régulation de vitesse d'agitation et programmation du temps d'essai.

L'origine du jar test est difficile à retracer, son utilisation remonte à plusieurs décennies. Les avantages du jar test sont importants, en voici quelques uns:

- Déterminer les doses optimales de produits chimiques (coagulants et aides-coagulants);
- Prédire la qualité de l'eau décantée;
- Déterminer le pH optimal de coagulation;
- Déterminer la solidité des floes formés;
- Déterminer les intensités de mélange optimal.



Fig V-1: Le jar test.

V-2-4-Préparation et conservation des échantillons:

- * Mettre le flocculateur dans un endroit protégé de la lumière, de la chaleur, des courants d'air et des vibrations.
- * Agiter l'échantillon et remplir chaque béccher du flocculateur d'un litre d'eau à tester.

V-2-5-Mode opératoire:

- Placer les bécchers sur le flocculateur et mettre les pales d'agitation en place.
- Démarrer l'agitation à la vitesse de 180 tours/min. Les pales et leur vitesse de rotation doivent être identiques dans tous les bécchers.
- Noter la température de l'eau.
- A l'aide d'une pipette graduée, ajouter le coagulant le plus rapidement possible et de manière reproductible dans chaque béccher. - Les doses appliquées dans chaque béccher sont croissantes de façon à "encadrer" la dose optimale présumée.
- Déclencher le chronomètre ($t = 0$).
- Après 2 min ($t = 2$ min) de mélange rapide (dispersion du réactif, coagulation), réduire la vitesse de rotation des pales à 40 tours/min (agitation lente, floculation).
- Noter le temps d'apparition du floc après introduction du coagulant.
- Au temps $t = 10$ min et $t = 20$ min, noter l'aspect de la floculation exprimée par une note.
- Au temps $t = 20$ min, relever (doucement en prenant soin de ne pas casser le floc formé) les pales des agitateurs en respectant un décalage de 15 à 30 s entre chaque relevé.
- Attendre 45 min de décantation puis prélever, à l'aide d'un siphon, 0,5 litre dans chaque béccher suivant le schéma suivant en veillant à ne pas siphonner la surface de l'eau:

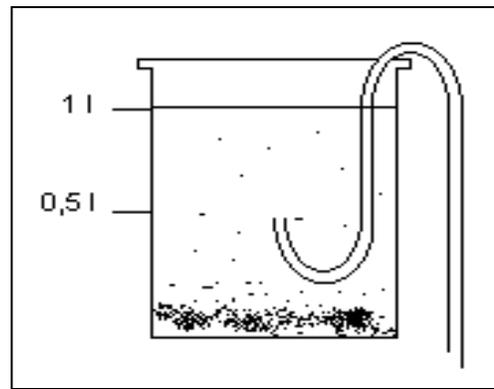


Fig V-2: Prélèvement des échantillons pour analyse.

- Homogénéiser chaque échantillon d'eau siphonnée et procéder aux analyses suivantes selon les objectifs du traitement :

1-Pour l'eau brute et les eaux décantées :

- pH après coagulation
- Turbidité
- UV_{254}
- Oxydabilité au permanganate de Potassium (méthode à l'oxalate)
- Couleur

Et éventuellement:

- Alcalinité
- Comptage des particules, algues
- Réactif résiduel (par exemple Al total, Fe total...)
- Mesure particulière au traitement étudiée: Fer, Mn, COT, UV_{254} .

2-Pour les boues obtenues avec la dose optimale de coagulant:

- Pourcentage de boue après 10 min de décantation.
- Coefficient de cohésion des boues (K): cette mesure nécessite de refaire des boues dans les conditions optimales de traitement déterminées par le présent jar-test (Volume nécessaire ≈ 60 ml de boues après 10 min de décantation).

V-3-Manipulation:

1-Température de l'eau:

L'essai doit être réalisé à la température la plus réaliste possible. Cela implique en période froide d'effectuer les essais à l'extérieur ou de disposer d'un flocculateur équipé d'un bain thermo staté. Dans tous les cas, maintenir autant que faire ce peut la température de l'eau constante au cours d'un essai.

2-Injection du coagulant:

Une injection simultanée du réactif dans tous les béchers.

3-Doses de coagulant:

L'écart entre deux doses successives de coagulant doit être suffisant pour obtenir des variations significatives de la qualité de l'eau décantée.

4-Temps de coagulation:

Ce temps peut varier en fonction de la température et de la nature de l'eau. Il peut être optimisé pour chaque type d'eau. Dans tous les cas, la durée d'agitation (rapide puis lente) ne doit pas excéder 20 min. Il faut donc réduire ou augmenter le temps de floculation en fonction de la durée optimale de coagulation.

5-Temps de décantation:

Ce temps doit être suffisant pour obtenir la décantation des floccs mais pas trop long pour conserver des variations significatives de la qualité des eaux traitées (en particulier la turbidité).

6-Volume de boues en 10 min:

Recueillir les boues dans une éprouvette de 25 à 50 ml par décantation successive. Homogénéiser l'échantillon par renversement lent (sans casser le flocc) et mise en rotation de l'éprouvette. Laisser décanter et noter précisément le volume de boue après 10 min de décantation.

V-4-Exploitations et interprétations:

-Tracer les courbes de turbidité et/ou d'oxydabilité au KMnO_4 en fonction de la dose de coagulant.

-Avec la plupart des coagulants, les courbes passent par un minimum qui correspond au taux de traitement optimal. Parfois ce minimum n'est pas net et on observe plutôt un palier. Dans ce cas la dose optimale correspond au début du pallier.

* Si les courbes ne présentent ni de minimum ni de palier et :

- Si la qualité de l'eau traitée s'améliore lorsque la dose de coagulant augmente, la dose optimale est supérieure aux doses testées : recommencer l'essai en augmentant les doses de coagulant,

- Si la qualité de l'eau traitée se dégrade lorsque la dose de coagulant augmente, la dose optimale est inférieure aux doses testées : recommencer l'essai en diminuant les doses de coagulant.

* Si les courbes ne présentent pas de variations significatives, la dose optimale est inférieure aux doses testées : recommencer l'essai en diminuant les doses de coagulant.

V-4-1-PH de coagulation:

Si le pH de l'eau coagulée pour la dose optimale de coagulant est inférieur à 6 pour les sels d'Aluminium ou à 5,5 pour les sels de Fer, répéter l'essai en ajoutant une base (chaux ou soude) de façon à obtenir un pH de coagulation constant sur tous les béchers.

V-4-2-Choix du polymère:

La procédure décrite peut être mise en œuvre pour déterminer le flocculant le mieux adapté. Dans ce cas, appliquer la dose optimale de coagulant pour les six béchers et tester sur chacun des béchers un polymère différent (dose: 0,025 ou 0,15 mg/l).

Tableau V-1: Note de la floculation.

| Note de floculation | |
|---------------------|--|
| 0 | Pas de flocc |
| 2 | Flocc à peine visible, aspect opalescent |
| 4 | Petit flocc |
| 6 | Flocc de dimension moyenne |
| 8 | Gros flocc |
| 10 | Très gros flocc |

On note la floculation comme le montre la figure suivante:

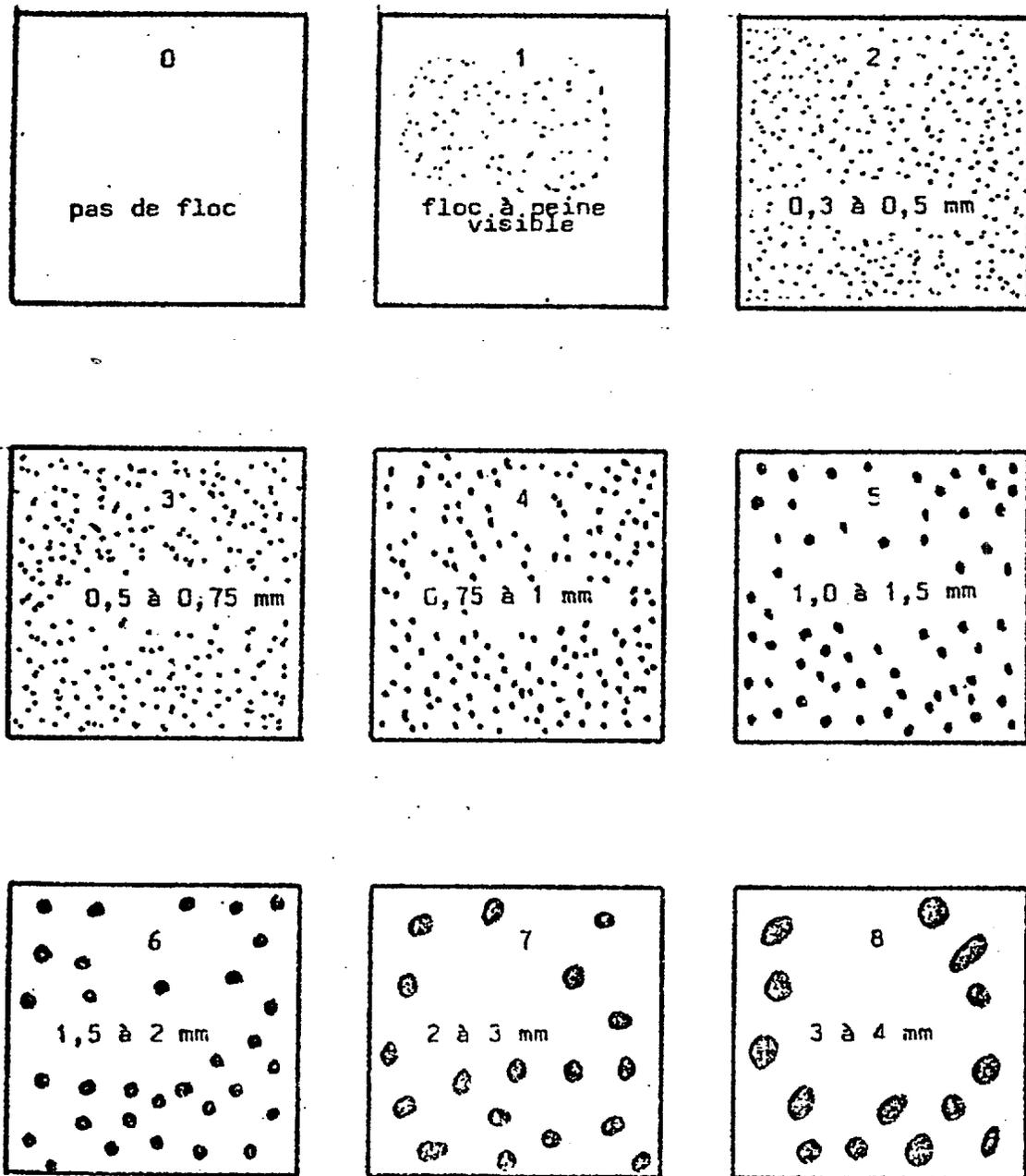


Fig V-3: Note de floculation.

Tableau V-2: Fiche à remplir lors du procédé de coagulation floculation.

| | | | | | | |
|---|---|---|-----------------------------|---|---|---|
| Eau | | | | | | |
| Température réelle de l'eau | | | | | | |
| Température de l'eau testée | | | Essai de floculation | | | |
| pH | | | | | | |
| Alcalinité | | | Date du prélèvement: | | | |
| Turbidité | | | Date de l'analyse: | | | |
| Couleur apparente | | | | | | |
| Couleur réelle | | | Origine de l'eau: | | | |
| Oxydabilité au KMnO ₄ | | | | | | |
| UV ₂₅₄ | | | But des essais: | | | |
| Fe | | | | | | |
| Mn | | | | | | |
| Al dissous | | | | | | |
| Particules | | | | | | |
| | | | | | | |
| Doses de réactifs (mg/l) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Durée d'agitation rapide (min) | | | | | | |
| Durée d'agitation lente (min) | | | | | | |
| Temps d'apparition du floc (min) | | | | | | |
| Note de floculation à 10 min | | | | | | |
| Note de floculation à 20 min | | | | | | |
| pH de floculation | | | | | | |
| Elements résiduels dans l'eau après min de décantation | | | | | | |
| Alcalinité | | | | | | |
| Turbidité | | | | | | |
| Couleur apparente | | | | | | |
| Oxydabilité au KMnO ₄ | | | | | | |
| % Elimination | | | | | | |
| Particules | | | | | | |
| Autres analyses | | | | | | |
| | | | | | | |
| Elements résiduels dans l'eau décantée et filtrée | | | | | | |
| Turbidité | | | | | | |
| Couleur réelle | | | | | | |
| Aluminium | | | | | | |
| Autres analyses | | | | | | |
| | | | | | | |
| % de boues en 10 min de décantation | | | | | | |
| conclusions | | | | | | |

Chapitre VI: Interprétation des résultats expérimentaux et modélisation

VI-1-Introduction :

Le but de cette étude étant l'automatisation de l'étape de coagulation floculation d'une station de traitement d'eau potable (exemple de la station de traitement des eaux potables de Boudouaou : dimensionnée pour traiter 570 000 m³/j, compte tenu d'une demande potentielle moyenne de 320 000 – 430 000 m³/j, pouvant monter à 540 000 m³/j en période estivale).

Nous avons procédé donc à la collecte de données relatives au traitement d'eaux brutes par le sulfate d'aluminium afin de relier par le modèle mathématique recherché le taux optimum de coagulant aux variables caractéristiques de l'eau de cette station (données de 2002 à 2008).

Le modèle mathématique recherché devait répondre à deux caractéristiques essentielles :

- Etre le plus simple possible ;
- Faire appel aux facteurs influençant la coagulation floculation les plus informatifs.

Pour cela nous avons procédé à deux méthodes de recherche de modèle mathématique (méthode de modélisation en utilisant le logiciel OriginPro et la deuxième méthode est la méthode des plans d'expériences).

VI-2-Interprétation des résultats :

Les résultats des analyses obtenues après l'essai de coagulation floculation par le jar test, sont représentés par les graphes ci-dessous. On a choisis les paramètres suivants: la température de l'eau brute, le pH, la conductivité de l'eau, la turbidité de l'eau brute, et TAC, sachant que:

- SA = [mg/l]
- T = [°C], noté par la suite **T**.
- pH = [unité pH], noté par la suite **P**.
- Conductivité = [Us/cm], noté par la suite **C**.
- Turbidité = [NTU], noté par la suite **TU**.
- TAC = [°F], noté par la suite **TA**.

L'étude de l'évolution des paramètres étudiés avec l'évolution de la dose du coagulant au cours du temps, donne les courbes suivantes :

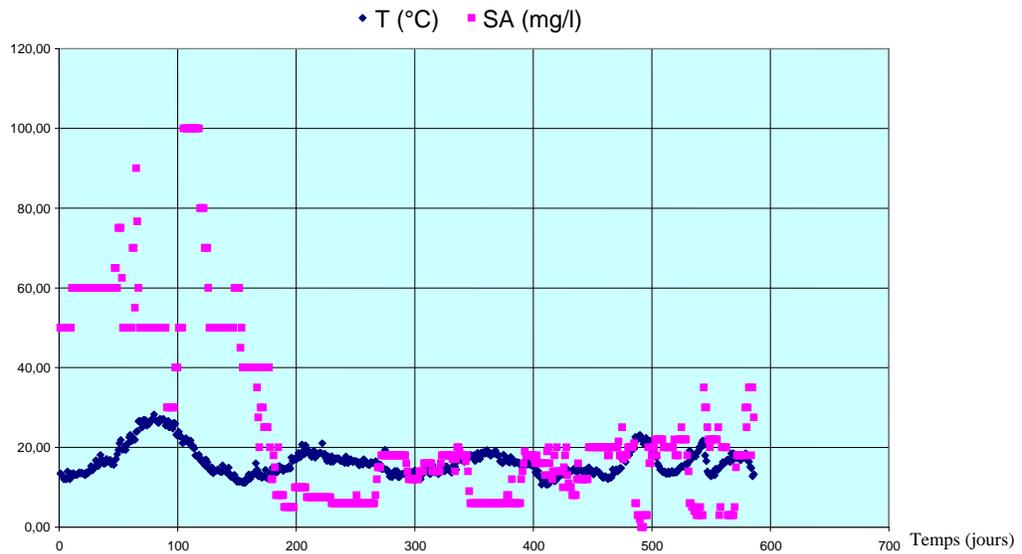


Fig VI-1 : Evolution de la **température** et de la dose du coagulant en fonction du temps.

Pour la température, on a constaté que la diminution de la température entraîne une nette augmentation du taux du coagulant, et l'augmentation de la température est suivie de son abaissement (résultat apparent sur toutes les années).

Toute diminution de la température est suivie d'une augmentation de la viscosité de l'eau et par conséquent le taux de formation des floes se trouve réduit. De plus, l'abaissement de la température ralentit la cinétique des réactions chimiques et nous avons les deux problèmes suivants: -La solubilité des coagulants se trouve plus faible; -L'augmentation de la viscosité de l'eau freine la décantation des floes.

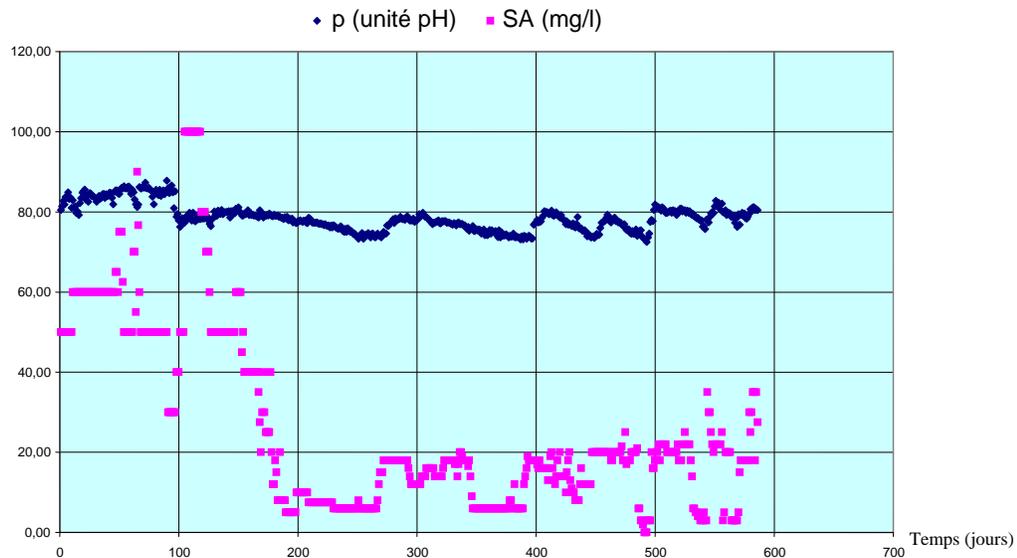


Fig VI-2 : Evolution du **pH (x10)** et de la dose du coagulant en fonction du temps.

La molécule de l'eau est partiellement dissociée en ions H^+ et OH^- qui sont issus d'atomes d'hydrogène et d'oxygène auxquels ont été enlevés ou rajoutés un ou plusieurs électrons.

L'équilibre de dissociation de l'eau est représenté par la formule suivante:



Cet équilibre étant très fortement déplacé vers la gauche, la quantité d' H^+ et d' OH^- est très faible dans une eau à l'équilibre. L'acidité ou la basicité d'une eau sont définies à partir des concentrations respectives d' H^+ et d' OH^- couramment mesurées par la concentration en ions H^+ .

Plus la concentration en ions H^+ est grande et plus l'acidité est forte. Cette acidité se mesure grâce à l'opposé du logarithme décimal de la concentration en ions H^+ aussi appelé pH.

$$pH = \log^{-1} [H^+] = \text{colog} [H^+]$$

Une eau neutre, ni acide ni basique, a un pH de 7 correspondant à une concentration $[H^+] = [OH^-]$ de 10^{-7} ions g/l alors qu'un pH de 5 signifie qu'on est en présence d'une eau légèrement acide $[H^+] = 10^{-5}$ ions g/l et qu'à l'opposé un pH de 9 caractérise une eau basique $[H^+] = 10^{-9}$ ions g/l.

Dans nos résultats : Nous avons une plage de pH dans laquelle il y'avait une meilleure coagulation (pH 7.50-pH 7.99). Ceci peut être expliqué par dire que l'utilisation du sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$ déclenche une hydrolyse, chaque Al^{3+} nécessite pour passer à l'état de l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$, trois ions OH^- provenant des bicarbonates et de l'eau elle-même. Les protons H^+ sont ainsi libérés et dans ce cas là nous avons une solubilité minimale du coagulant ce qui permet une meilleure précipitation.

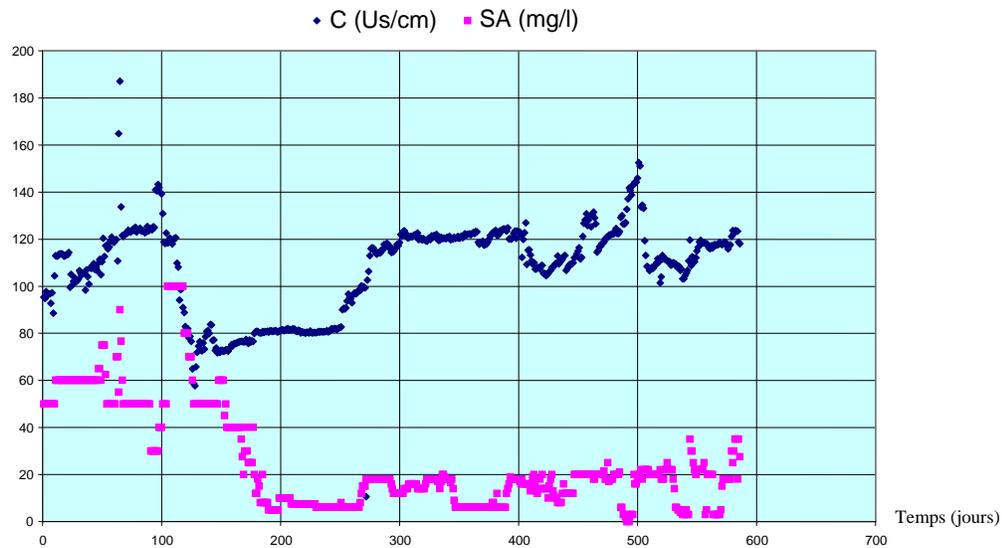


Fig VI-3 : Evolution de la **conductivité** (/10) et de la dose du coagulant en fonction du temps.

Les ions présents dans l'eau assurent suivant leur concentration une certaine aptitude au passage d'un courant électrique. On dit que l'eau est plus ou moins conductrice et la conductivité se chiffre en $\mu S/cm$ (micro-siemens par centimètre). L'inverse de la conductivité est la résistivité de l'eau et se chiffre en ohm.cm.

Il existe une corrélation entre la résistivité d'une eau et sa minéralisation totale, c'est-à-dire la concentration en espèces dissoutes. Il s'agit d'une loi empirique, la loi de Doroschewski:

Suivant le graphe de l'évolution de la conductivité et de la dose du coagulant en fonction du temps (fig VI-3), nous avons constaté que l'augmentation de la conductivité de l'eau (l'augmentation de la teneur en ions) favorise la coagulation. Donc nous avons une diminution de la dose du coagulant. On peut dire que l'augmentation de la teneur en ions entraîne une diminution des forces de répulsion interparticulaires par compression de la double couche.

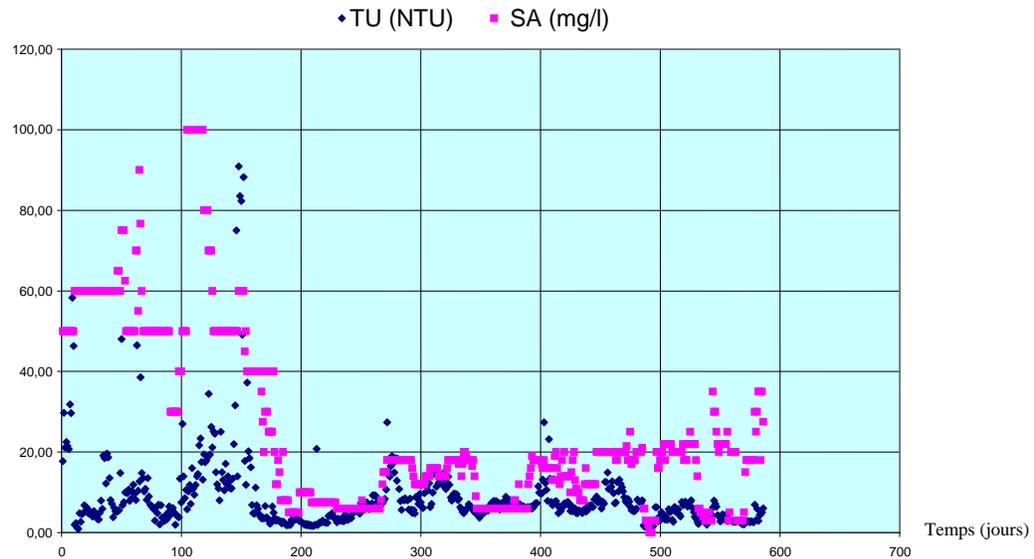


Fig VI-4 : Evolution de la **turbidité** et de la dose du coagulant en fonction du temps.

En plus des espèces chimiques en solution, une eau peut contenir un certain nombre d'espèces non dissoutes, comme la silice par exemple, qui restent en suspension. On chiffre la quantité d'éléments en suspension par une grandeur appelée turbidité de l'eau qui se mesure grâce à la plus ou moins grande capacité de l'eau au passage de la lumière.

On remarque qu'il ya une relation proportionnelle entre la turbidité et la dose de coagulant qui est élevée ce qui explique que la turbidité de cette eau est constituée des acides humiques et que nous avons des particules de petite taille.

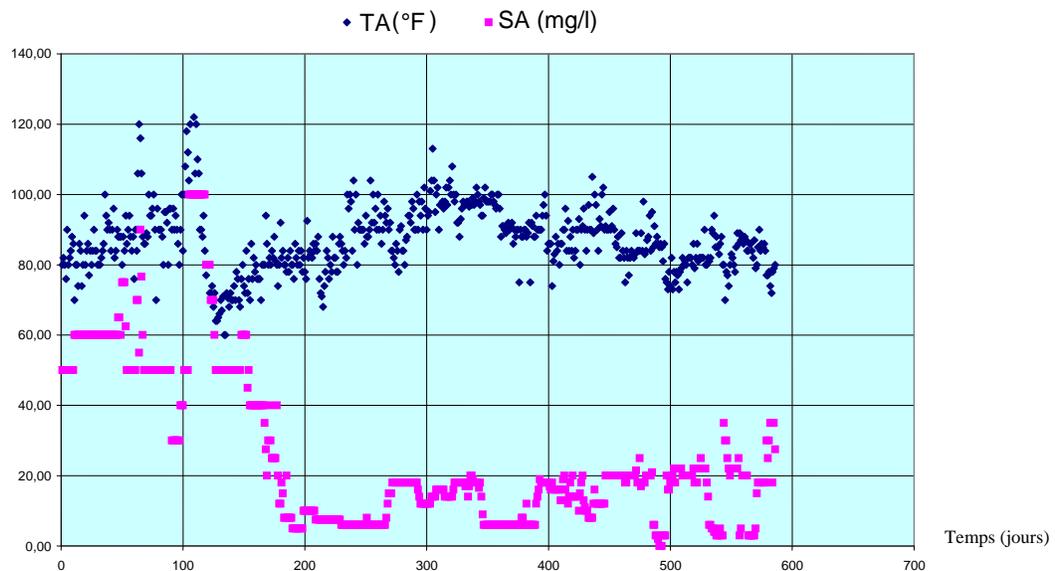


Fig VI-5 : Evolution de **TAC (x5)** et de la dose du coagulant en fonction du temps

L'alcalimétrie d'une solution est caractérisée par la présence d'espèces basiques (par opposition aux espèces acides). Le TA et le TAC respectivement titre alcalimétrique et titre alcalimétrique complet permettent de déterminer précisément les concentrations en espèces alcalines, hydrogénocarbonates HCO_3^- , carbonates CO_3^{2-} et hydroxydes OH^- .

$$\text{TA} = \frac{1}{2} [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$$

$$\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$$

Des valeurs respectives de TA et de TAC, on peut déduire par calcul la répartition des trois grandes catégories de corps qui constituent l'alcalinité de l'eau : hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates.

Les valeurs usuelles du TAC vont de 2.5 °F jusqu'à 35 °F pour des eaux dures.

Le titre alcalimétrique (TAC) exprime l'alcalinité totale de l'eau. Il a une importance fondamentale dans la connaissance de la capacité d'entartrage de l'eau. C'est la teneur de l'eau en hydroxydes, carbonates, et bicarbonates. On le rencontre souvent dans les textes sous la forme de dureté carbonatée. Il représente les taux de calcium et de magnésium liés aux seuls ions carbonates et bicarbonates. Cette notion de dureté carbonatée est importante pour prévoir la manière dont va se comporter le pH (acidité de l'eau).

Dans nos résultats nous avons un minimum de TAC pour lequel nous avons obtenu un meilleure coagulation (TAC=15.20 °F correspond à SA=3 PPM).

L'alcalinité naturelle de l'eau réagit avec l'alun pour former le précipité d'hydroxyde d'aluminium. Il faut donc un minimum d'alcalinité pour que l'alun agisse correctement. Ce minimum permet aussi de stabiliser le pH dans la plage optimale de coagulation.

VI-3-Modélisation:

VI-3-1-Première méthode: Modélisation en utilisant le logiciel OriginPro :

Notre but résulte dans l'obtention d'un modèle mathématique à l'aide duquel on peut estimer la concentration du coagulant à injecter dans l'eau brute sachant les valeurs des différents paramètres physico-chimiques de celle-ci. Nous avons calé les résultats obtenus à un modèle polynomial de degré 2 de la forme : $Y = A + B X + C X^2$ pour chaque paramètre.

On va traiter chaque paramètre individuellement et voir son impact parce que ce logiciel ne permet d'avoir que les équations d'une seule entrée et une seule sortie.

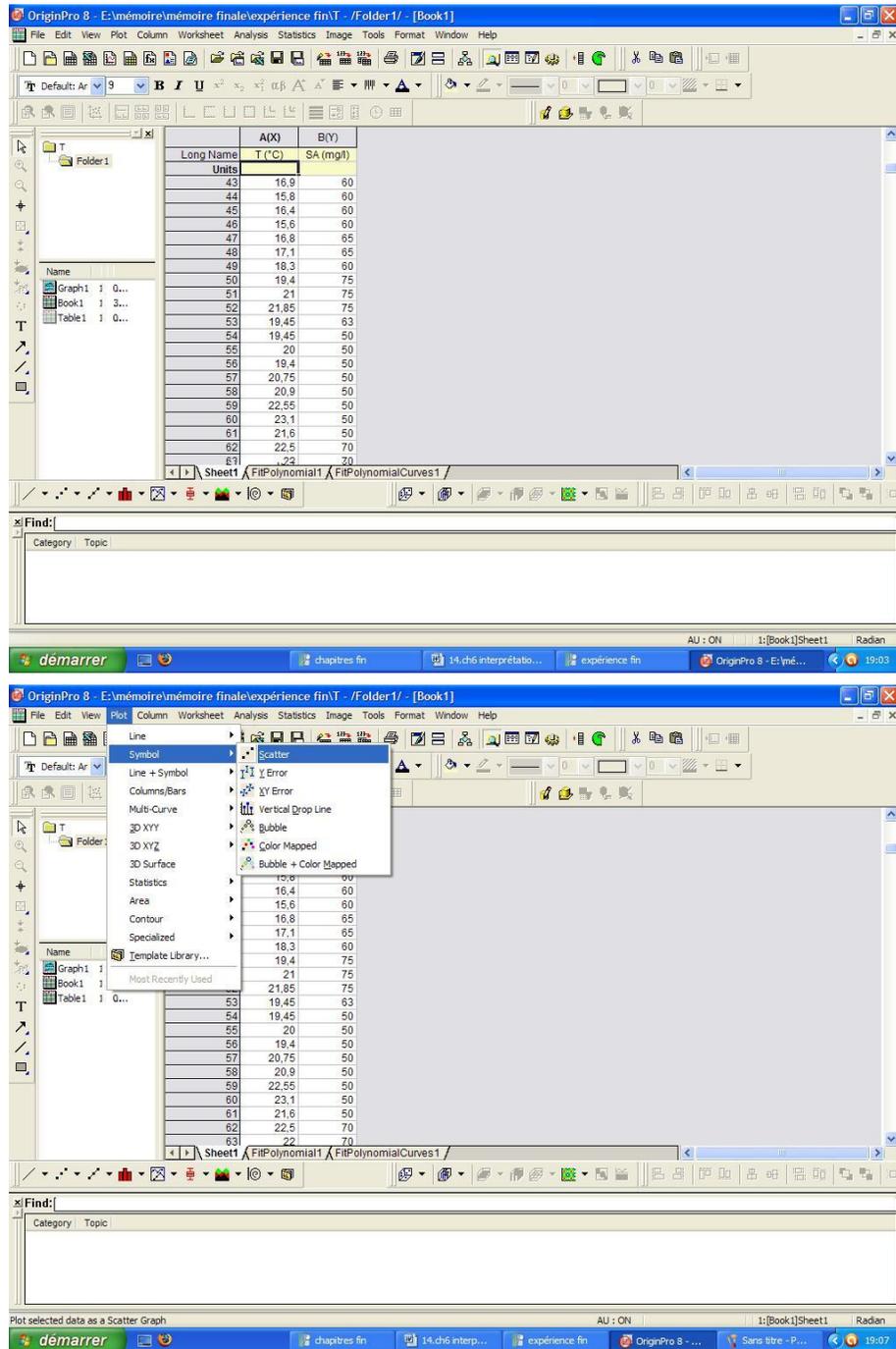


Fig VI-6 : Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (introduction des données et établissement des courbes).

Ce logiciel permet d'obtenir des différents formats de graphes.

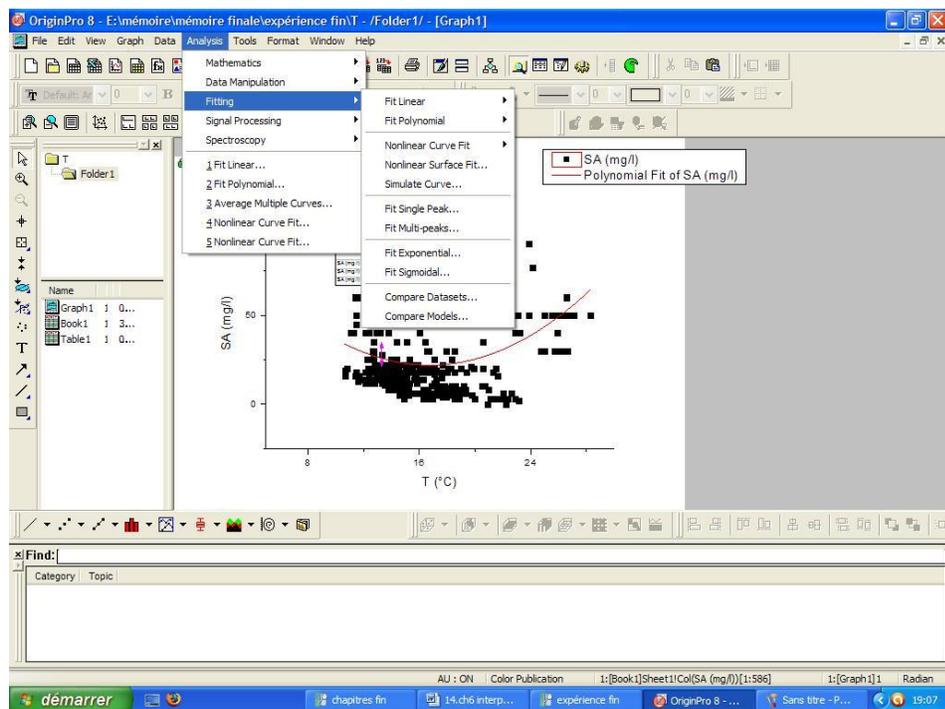
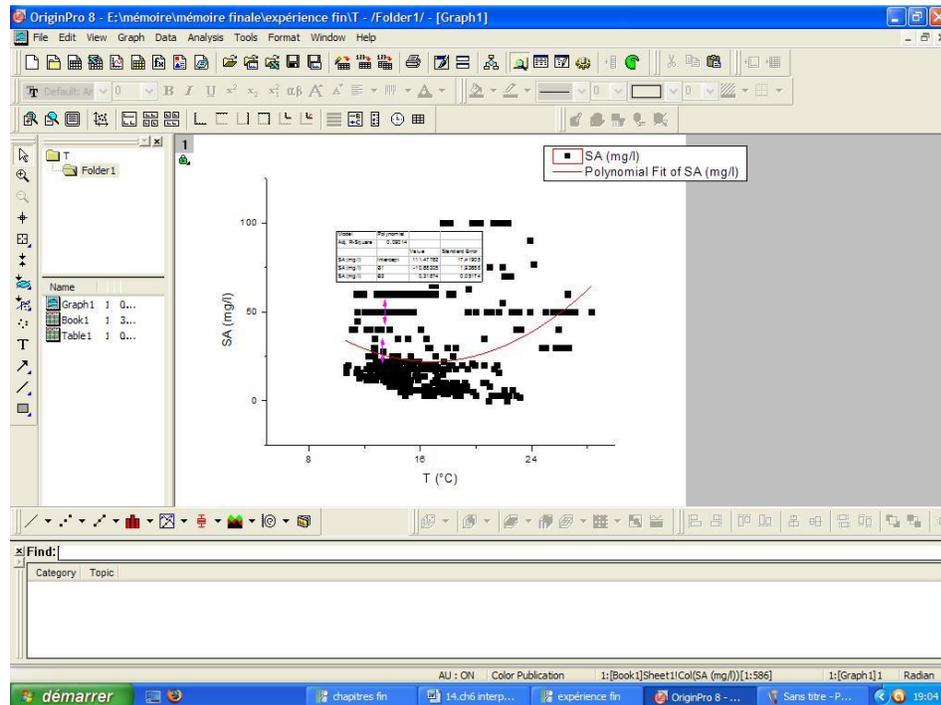


Fig VI-7 : Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (modélisation à partir des données et courbes établies).

OriginPro donne les résultats de modélisation sous forme des tableaux avec tous les paramètres des modèles obtenus.

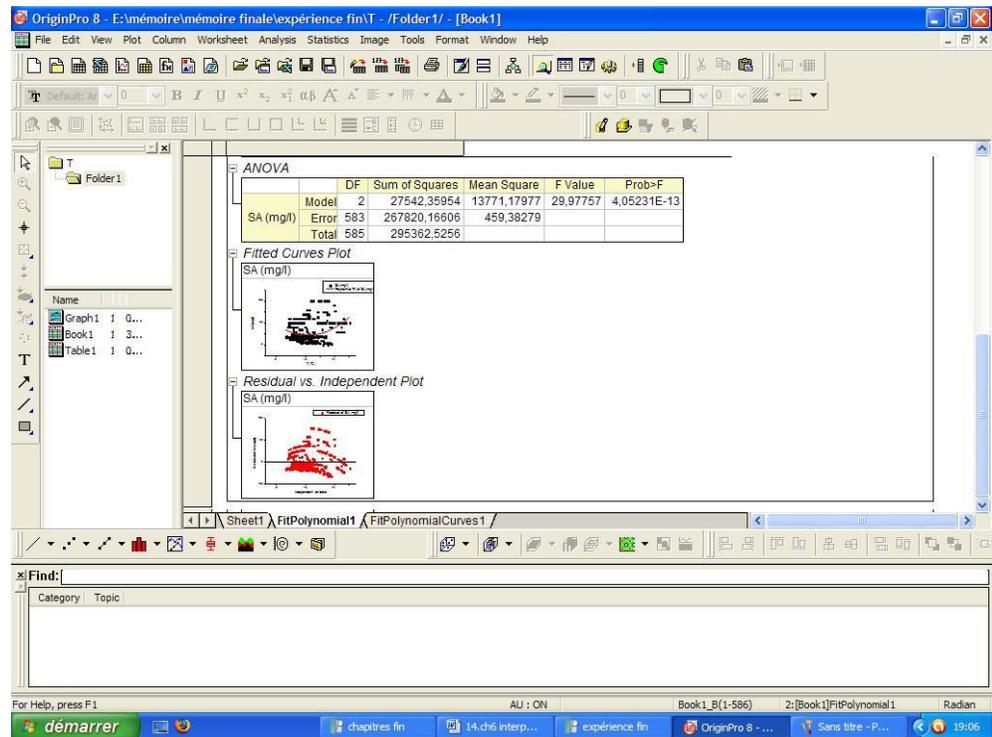
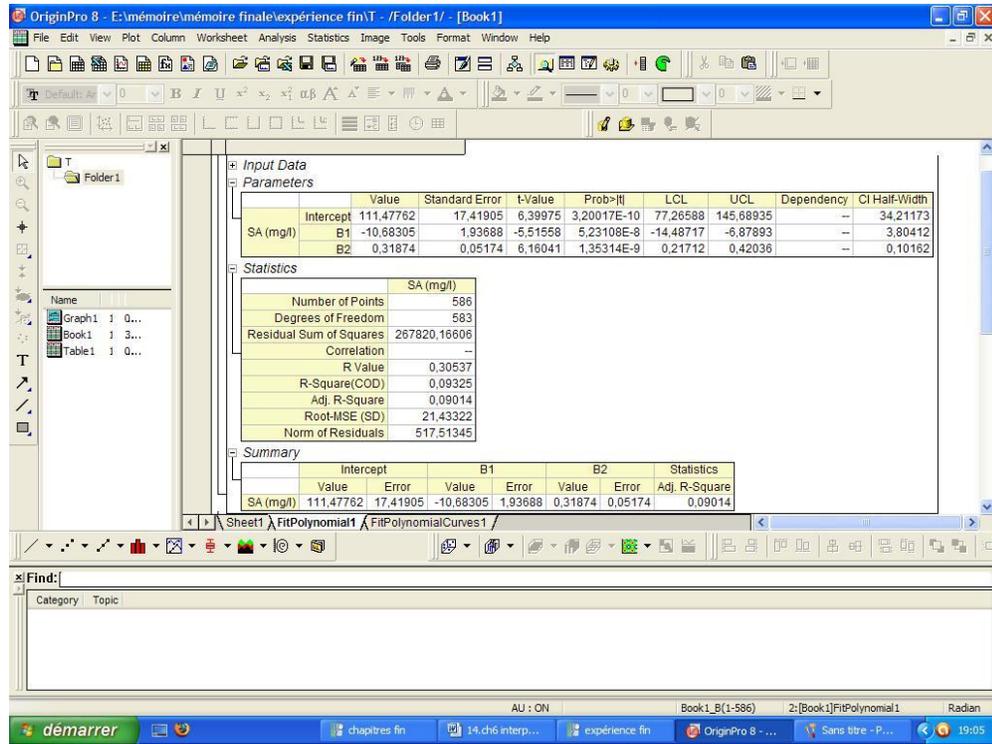


Fig VI-8 : Quelques images lors de la modélisation par OriginPro (visualisation des résultats).

Les résultats obtenus sont les suivants :

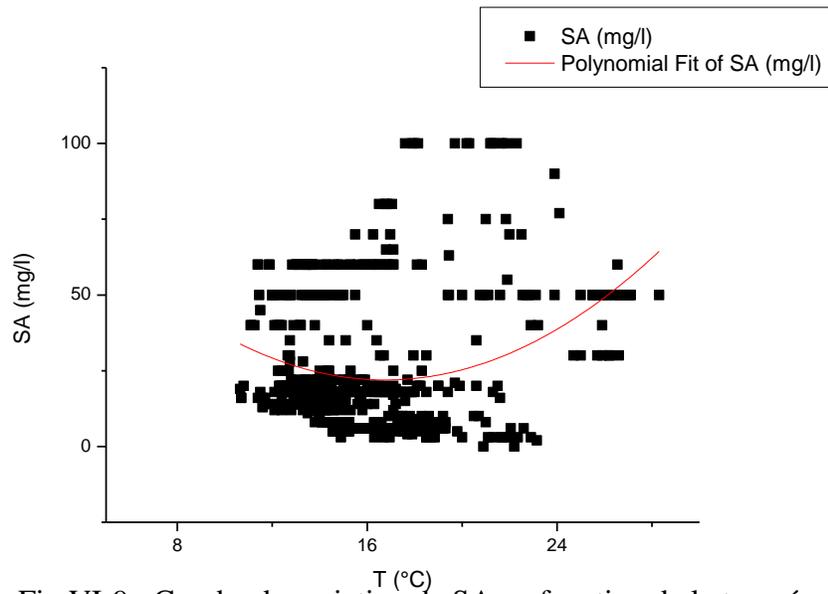


Fig VI-9 : Courbe de variation de SA en fonction de la température.

Le modèle de SA en fonction de la température est donné par :

$$SA = 111.48 - 10.68 T + 0.32 T^2.$$

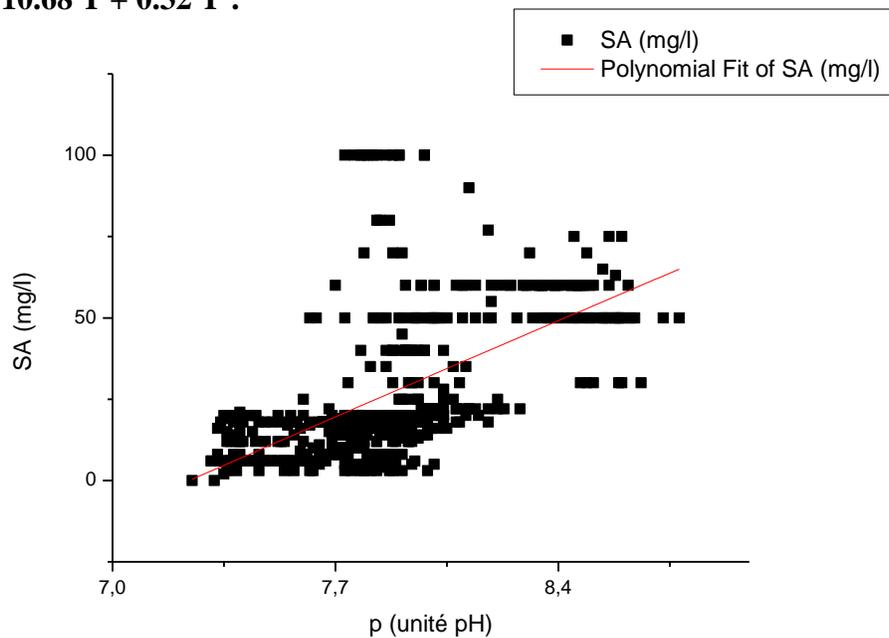


Fig VI-10 : Courbe de variation de SA en fonction du pH.

Le modèle de SA en fonction du pH est donné par :

$$SA = -331.41 + 48.68 P - 0.40 P^2.$$

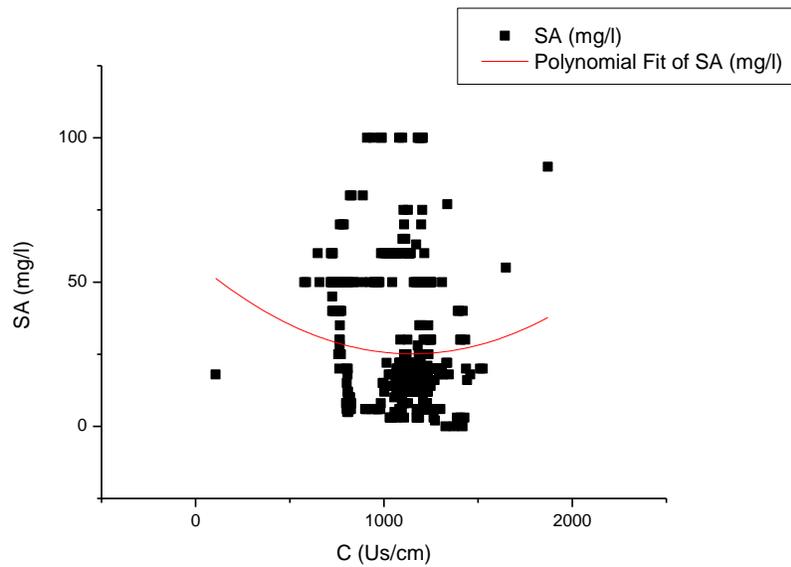


Fig VI-11 : Courbe de variation de SA en fonction de la conductivité.

Le modèle de SA en fonction de la conductivité est donné par :

$$SA = 56.97 - 0.06 C + 2.41 C^2.$$

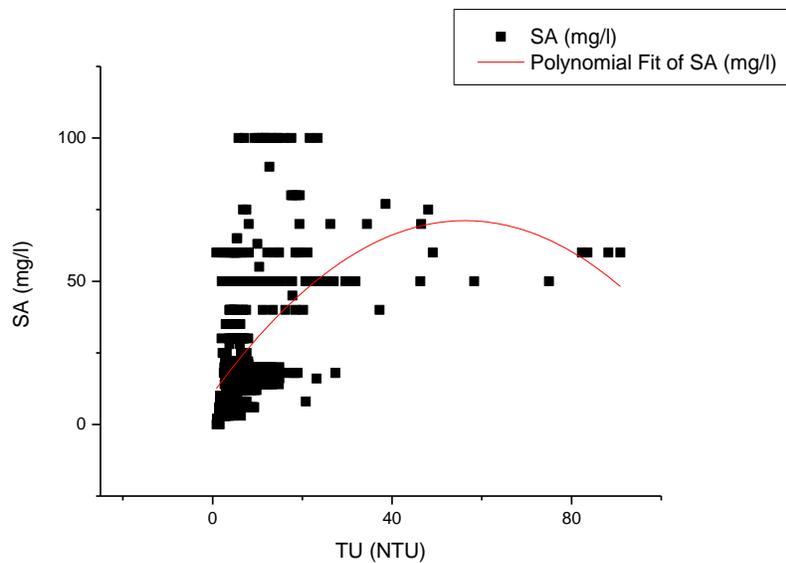


Fig VI-12 : Courbe de variation de SA en fonction de la turbidité.

Le modèle de SA en fonction de la turbidité est donné par :

$$SA = 10.69 + 2.15 TU - 0.02 TU^2.$$

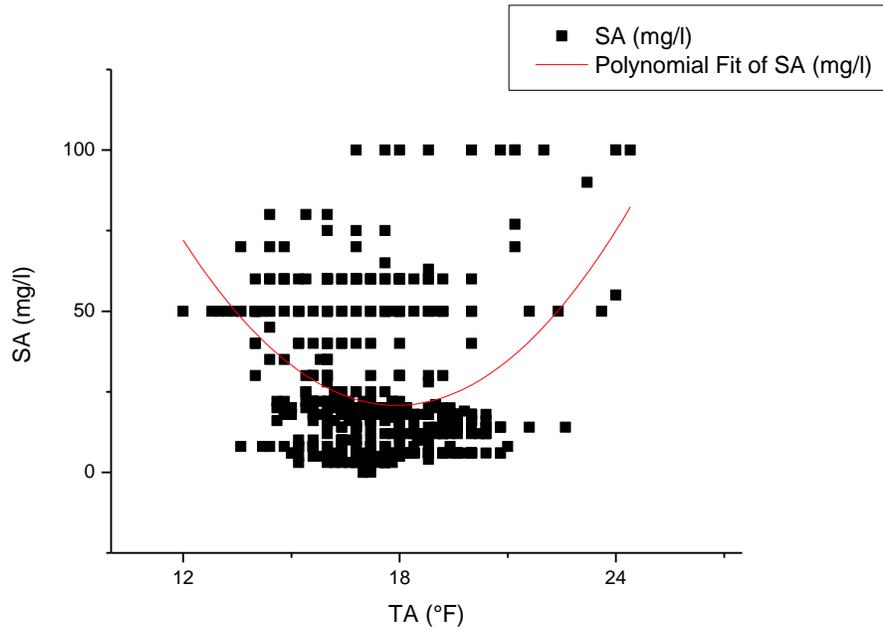


Fig VI-13 : Courbe de variation de SA en fonction de TAC.

Le modèle de SA en fonction de TAC est donné par :

$$SA = 490.88 - 52.48 TA + 1.46 TA^2.$$

Les résultats de calcul des paramètres des modèles obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VI-1 : Coefficients de corrélation pour chaque modèle.

| Paramètres | Coefficient de corrélation |
|------------|----------------------------|
| T | 0.09 |
| P | 0.38 |
| C | 0.003 |
| TU | 0.21 |
| TA | 0.14 |

On constate que la modélisation des paramètres physico-chimiques a donné des coefficients de corrélation loin de 1. Il convient donc de chercher un modèle qui prend en considération les interactions entre paramètres.

On va traiter dans la méthode suivante la modélisation des paramètres physico-chimiques par un modèle polynomial de degré 2 en faisant intervenir les interactions entre les paramètres, par la méthode des plans d'expériences.

VI-3-2-Deuxième méthode: Méthode des plans d'expériences:

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche-développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels.

On peut notamment citer :

- Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Industries mécaniques et automobiles
- Industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- Optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure
- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y , et des variables x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $Y = f(X_i)$.

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt (dans notre cas c'est la dose du coagulant). La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure VI-14). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

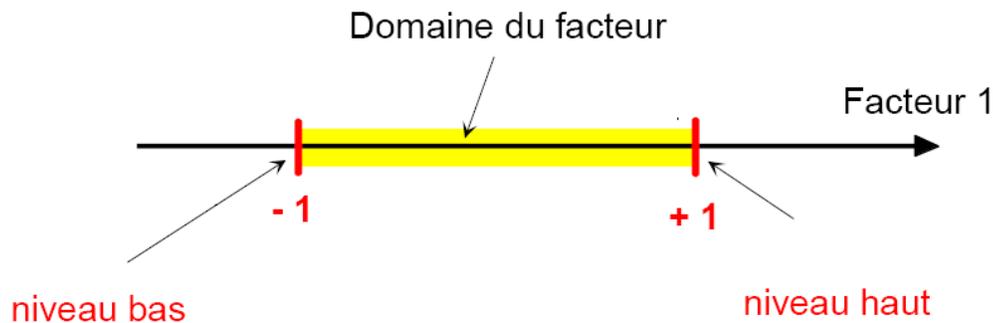


Fig VI-14 : Domaine de variation d'un facteur.

A/Notion de modélisation mathématique (plans d'expériences):

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2$$

- Y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai (variable codée). 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 facteurs sur la réponse.
- a_0, a_i, a_{ij} , sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. (a_0 est la valeur de la

réponse au centre du domaine d'étude, a_i est l'effet du facteur i , a_{ij} est l'interaction entre les facteurs i et j).

La transformation d'une variable réelle u_i en variable codée x_i s'obtient à partir de la relation suivante :

$$X_i = \frac{U_i - U_i^\circ}{\Delta u}$$

Si u_{sup} et u_{inf} représentent respectivement les limites supérieures et inférieures de variables d'un facteur alors :

$$U_i^\circ = \frac{U_{sup} + U_{inf}}{2} \quad \Delta u = \frac{U_{sup} - U_{inf}}{2}$$

u_i° représente la variable réelle au centre du domaine expérimental et Δu l'écart maximal.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

Ce modèle est appelé "**modèle postulé**" ou "**modèle a priori**".

B/Calcul des coefficients :

L'expérimentateur peut présenter une étude sous forme d'un tableau.

A chaque essai, il mesure la réponse qu'il a choisie. Par exemple, la réponse de l'essai n° 1 est y_1 . Celle de l'essai n° 2 est y_2 , et ainsi de suite. Ces réponses sont indiquées en face de chaque essai et sont rassemblées dans la colonne «Réponse».

C/Application simple de calcul des coefficients

Une application simple est fournie par le plan d'expériences suivant où les calculs peuvent s'effectuer manuellement. On examine l'influence de la pression et de la température (deux facteurs) sur le rendement y d'une réaction chimique (réponse). Le modèle choisi a priori est le suivant :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2$$

Où x_1 et x_2 représentent respectivement les variables codées représentatives des facteurs pression et température.

On utilise un tableau nommé **matrice d'expériences** pour récapituler l'ensemble des essais.

Elle comprend plusieurs colonnes; la première identifie les essais, les suivantes indiquent les états des facteurs exprimés en "variables codés", chaque colonne étant représentative d'un facteur.

La dernière colonne indique les réponses obtenues pour chaque essai. Les lignes inférieures rappellent les valeurs des niveaux en variables naturelles.

Tableau VI-2 : Exemple de présentation de plans d'expériences de trois facteurs à deux niveaux :

| N° | x_1 | x_2 | x_{12} | Rép Y |
|-----------|--------|-------|----------|----------|
| 1 | -1 | -1 | +1 | $Y_1=60$ |
| 2 | +1 | -1 | -1 | $Y_2=78$ |
| 3 | -1 | +1 | -1 | $Y_3=63$ |
| 4 | +1 | +1 | +1 | $Y_4=89$ |
| Niveau -1 | 2 bars | 50 °C | | |
| Niveau +1 | 4 bars | 70 °C | | |

Les quatre points d'expériences apportent quatre équations.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_0 + a_1 x_{1,-1} + a_2 x_{2,-1} + a_{12} x_{1,-1}x_{2,-1} \\ Y_2 &= a_0 + a_1 x_{1,+1} + a_2 x_{2,-1} + a_{12} x_{1,+1}x_{2,-1} \\ Y_3 &= a_0 + a_1 x_{1,-1} + a_2 x_{2,+1} + a_{12} x_{1,-1}x_{2,+1} \\ Y_4 &= a_0 + a_1 x_{1,+1} + a_2 x_{2,+1} + a_{12} x_{1,+1}x_{2,+1} \end{aligned}$$

La résolution de ce système donne la valeur des coefficients :

$$\begin{aligned} a'_0 &= \frac{1}{4} (+60+78+63+89) \\ a'_1 &= \frac{1}{4} (-60+78-63+89) \\ a'_2 &= \frac{1}{4} (-60-78+63+89) \\ a'_{12} &= \frac{1}{4} (+60-78-63+89) \end{aligned}$$

Sous la forme :

$$a' = (x' x)^{-1} x' Y$$

Formule dans laquelle la matrice x' est la matrice transposée de x . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients.

Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information $x' x$.
- La matrice de dispersion $(x' x)^{-1}$.

Le modèle s'écrit donc sous la forme :

$$y = 72.5 + 11 x_1 + 3.5 x_2 + 2 x_1 x_2$$

D/Les plans pour surfaces de réponse :

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs, on a :

$$Y' = a'_0 + a'_1 X_1 + a'_2 X_2 + a'_{11} X_1^2 + a'_{22} X_2^2 + a'_{12} X_1 X_2$$

A la fin des essais, on a un système d'équations dont les coefficients sont obtenus toujours grâce à la relation :

$$a' = (x' x)^{-1} x' y.$$

Plusieurs types des plans pour surfaces de réponses peuvent être établis. Nous avons par exemple les plans composites centrés.

Ces plans composites centrés comprennent 3 catégories d'essais établis de telle sorte qu'à chaque facteur, sont assignés 3 niveaux. On trouvera donc :

- Les essais du plan factoriel (2^n pour un plan complet).
- Des essais dits « en étoile » par rapport aux essais précédents (en nombre égal à $2n$).
- Des essais au centre du domaine expérimental, dont le nombre de répétitions est fonction du nombre de facteurs étudiés, et qui constituent le 3^{ème} niveau de chaque facteur.

Dans le cas de deux facteurs nous avons le plan composite centré suivant :

Tableau VI-3 : Plan composite centré pour deux facteurs :

| X ₁ | X ₂ |
|----------------|----------------|
| -1 | -1 |
| +1 | -1 |
| -1 | +1 |
| +1 | +1 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| 0 | 0 |
| -1.414 | 0 |
| +1.414 | 0 |
| 0 | -1.414 |
| 0 | +1.414 |

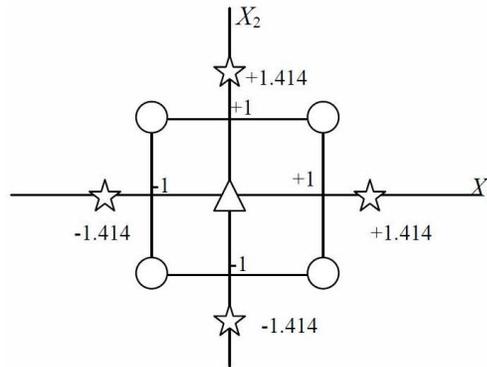


Fig VI-15 : Différents essais effectués pour l'établissement de plans d'expériences.

Dans le schéma, on reconnaît les 4 ($n=2^2$) essais du plan factoriel (cercles) ; il y a aussi 4 essais en étoile : ils sont situés sur les 2 axes à une distance du centre égale à $\alpha = 1,414$ ($\alpha = (2^2)^{0.25}$) en variable réduite. Le plan comporte aussi 5 essais au centre du domaine expérimental (triangle).

VI-3-2-1-Application de la méthode sur la station de Boudouaou:

Nous allons appliquer la méthode des plans d'expériences (surface de réponse) sur les résultats obtenus de la station de traitement de Boudouaou. Le choix du modèle est porté sur un modèle polynomial de degré 2 de la forme :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2$$

Rappelons que les facteurs retenus dans cette modélisation sont les suivants :

- La température (T).
- Le pH (P).
- La conductivité de l'eau (C).
- La turbidité (TU).
- Le titre alcalimétrique (TA).

La présentation des plans d'expériences s'est fait manuellement. Les résultats de cette présentation sont donnés dans le tableau suivant.

Tab VI-4 : Présentation des plans composites centrés

| X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₁₂ | X ₁₃ | X ₁₄ | X ₁₅ | X ₂₃ | X ₂₄ | X ₂₅ | X ₃₄ | X ₃₅ | X ₄₅ | SA |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|
| +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 40 |
| +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 8 |
| +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 28 |
| +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 50 |
| +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 60 |
| +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 6 |
| +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 20 |
| +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 30 |
| +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 40 |
| +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 50 |
| +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 60 |
| +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 50 |
| +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 60 |
| +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 8 |
| +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 16 |
| +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 18 |
| +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 6 |
| +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 6 |
| +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 50 |
| +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | 6 |
| +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 18 |
| +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | 40 |
| +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 14 |
| +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | 30 |
| +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 100 |
| +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | 50 |
| +1 | -1 | 1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 14 |
| +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | 70 |
| +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 6 |
| +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 90 |
| +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 14 |
| +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 77 |
| +1 | -2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| +1 | +2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| +1 | 0 | -2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| +1 | 0 | +2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| +1 | 0 | 0 | -2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| +1 | 0 | 0 | +2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | -2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | +2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 75 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2.378 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 |
| MAX | 28,30 | 8,78 | 1871 | 1039,00 | 24,40 | | | | | | | | | | | |
| MIN | 10,65 | 7,25 | 106 | 0,86 | 12,00 | | | | | | | | | | | |
| MOY | 16,41 | 7,86 | 1077 | 11,62 | 17,40 | | | | | | | | | | | |

Pour le modèle de cinq paramètres avec trois niveaux chacun, 586 échantillons recueillis entre 2002 et 2008, ont été utilisés. Le tableau suivant présente le domaine de variation des différents variables réelles (la présentation des plans composites centrés est donnée en annexe).

Tab VI-5: Répartition statistique des données dans le domaine expérimental étudié :

| VARIABLES | MOYENNE | MIN | MAX | CENTRE |
|-------------------|---------|-------|---------|--------|
| Température (T) | 16.41 | 10.65 | 28.30 | 19.48 |
| pH (P) | 7.86 | 7.25 | 8.78 | 8.02 |
| Conductivité (C) | 1076 | 106 | 1871 | 988 |
| Turbidité (TU) | 11.62 | 0.86 | 1039.00 | 519.93 |
| TAC (TA) | 17.40 | 12.00 | 24.4 | 18.20 |
| Taux optimum (SA) | 35 | 6 | 100 | 53 |

Le calcul des paramètres du modèle s'est fait à l'aide du logiciel MATLAB. Nous avons aboutit enfin au modèle ci-dessous (exprimé en variables codées):

$$\begin{aligned} SA = & 28.67 - 0.65 T - 0.28 P - 6.09 C + 11.13 TU + 0.87 TA \\ & + 1.57 T^2 - 0.38 P^2 + 4.22 C^2 + 2.28 TU^2 - 1.79 TA^2 \\ & + 5.84 T.P + 4.34 T.C + 5.09 T.TU + 7.84 T.TA \\ & - 3.03 P.C - 4.03 P.TU - 1.28 P.TA - 5.28 C.TU \\ & + 2.97 C.TA + 5.97 TU.TA \end{aligned}$$

Les résultats donnés par ce modèle sont proches de celles enregistrés dans la station de traitement avec une certaine marge d'erreurs. Nous avons obtenu un coefficient de corrélation de l'ordre de **0.68**.

Cet écart entre les concentrations du coagulant mesurées et celles calculées aurait pu être minimisé en faisant la réalisation des expériences sur une eau synthétique et maîtriser les niveaux des paramètres, ou bien faire le bon choix des paramètres influençant la coagulation floculation, ou encore avoir une série d'expérience complète sans manque (qui est le cas contraire dans notre série).

Chapitre VII: Recommandations

VII-1-Recommandations:

Le procédé de coagulation floculation est très complexe. Il est très difficile de déterminer la concentration du coagulant à injecter dans l'eau brute, parce que cela dépend de plusieurs paramètres qui sont eux-mêmes très complexes et très variables dans le temps et ils ne varient pas tous avec la même manière.

La modélisation de ce procédé demande un savoir faire très avancé qui touche plusieurs branches de la science à coté de l'hydraulique, à savoir l'informatique, la chimie, la biologie...

Notre étude sur la modélisation des paramètres physico-chimiques de la coagulation floculation pour les eaux potables, nous a permis de donner les recommandations suivantes:

- Dans le cadre d'un traitement de potabilisation, la coagulation-floculation peut être utilisée pour éliminer la turbidité de l'eau (microparticules comme l'argile responsable d'un trouble de l'eau). Pour potabiliser de l'eau, le procédé de coagulation floculation doit s'accompagner d'une décantation et d'une élimination rigoureuse des floes. De plus, les quantités de réactifs doivent être précisément évaluées pour ne pas en ajouter de trop (la nécessité du jar test);
- Dans la recherche du meilleur résultat possible (qui doit également tenir compte des considérations économiques), l'expérience de l'homme doit être secondée par l'essai de floculation en laboratoire (jar test), et éventuellement par la mise en oeuvre d'un pilote de traitement qui sont des auxiliaires précieux.
- Il est très recommandé d'étudier le procédé de coagulation floculation et son environnement physico-chimique pour pouvoir le maîtriser;
- La nécessité de noter toutes les valeurs et les variations des différents paramètres influençant la coagulation floculation avant et après traitement de l'eau, chose qui va servir au développement des codes de calcul des concentrations des coagulants et des adjuvants de floculation;
- Notre étude nous a ramené à se rapprocher des concentrations du coagulant trouvées par le jar test. Donc si on fait introduire plus de paramètres qui peuvent influencer le procédé de coagulation floculation, cela va permettre de se rapprocher plus et mener à bien ce procédé et aider l'industrie à le maîtriser et faciliter cette tâche de traitement des eaux potables;
- Il est recommandé de tenir compte des autres facteurs liés aux conditions de traitement influençant la coagulation floculation (nature de coagulant, le mélange...). Ceci va permettre d'obtenir plus de précision lors la modélisation de ce phénomène.

VII-2-Pilotage du traitement de coagulation floculation:

VII-2-1-Automatisation du taux de coagulant:

L'intérêt est évident : être au taux optimum de floculation quelles que soient les variations de la qualité des eaux à floculer et en particulier lorsque ces variations peuvent être rapides et importantes.

En réalité, la mise en oeuvre d'un système automatique permet :

- Une qualité meilleure et constante de l'eau traitée,
- Un gain en réactifs (floculants, réactifs d'ajustement du pH),
- Une réduction des coûts de traitement, par la réduction globale des taux de réactifs et l'amélioration des performances de la filtration (en particulier la "perte en eau") donné par de meilleurs résultats sur les qualités d'eaux décantées avant filtration.

Actuellement, aucun système ne peut, à priori, être installé dans une usine de traitement, sans une étude préalable, avec :

- Qualité d'eaux brutes et ses variations,
- Meilleur réactif coagulant à utiliser et taux de traitement,
- Durées des phases de coagulation/floculation,
- Energies mises en place.

Différentes méthodes peuvent être utilisables :

1. Système informatique permettant le calcul de la dose optimum. Ces systèmes reposent sur l'établissement d'un "modèle de floculation", établie à partir d'expérimentation. Ceci demande, pour une eau donnée, de nombreux essais en JAR-TESTS, sur les différentes qualités d'eau, en mesurant plusieurs paramètres des eaux (pH, turbidité, conductivité, etc...).
2. Systèmes utilisant des appareils de mesure des charges colloïdales : Zêtamètre, ...

Conclusion générale

Conclusion générale:

Cette recherche visait à trouver un modèle mathématique pouvant aider à prévoir la concentration du coagulant à injecter dans l'eau brute au niveau de l'opération de coagulation floculation dans le cas d'un traitement de l'eau potable.

La littérature effectuée lors de cette étude, nous a donné une idée sur ce procédé et l'influence de certains paramètres physico-chimiques rendant ce procédé très complexe.

Nous avons essayé deux méthodes différentes l'une vise à avoir un modèle pour chaque paramètre et qui a aboutit à un résultat non significatif et l'autre méthode qui a donné de bons résultats pour d'autres chercheurs nous a donné un modèle qui englobe tous les paramètres et prend en considération les interactions entre eux. Il est très significatif donnant un coefficient de corrélation de l'ordre de **0.68**.

Au terme de ce travail, nous pouvons résumer les paramètres qui peuvent influencer la coagulation floculation:

- La température;
- Le pH;
- La conductivité de l'eau;
- La turbidité;
- Le TAC.

Il fallait pour cela construire une série de résultats expérimentaux pour déterminer la relation qui lie la concentration du coagulant avec chaque paramètre. Pour cela, on a travaillé sur les résultats des analyses effectuées au niveau de la station de traitement des eaux potables de Boudouaou (sept années d'expériences journalières).

Nous avons répondu à notre problématique par l'élaboration d'un modèle mathématique.

Dès lors, la maîtrise de ce procédé n'est plus seulement la modélisation avec un certain nombre de paramètres physico-chimiques, c'est aussi et surtout, la généralisation de la modélisation sur tous les autres paramètres et la connaissance de leurs influences, et la connaissance aussi du milieu environnant le procédé (comme l'hydrologie par exemple).

De plus, cette étude offre en conséquence plusieurs intérêts théoriques et pratiques.

De manière très synthétique, nous présentons en conclusion ce qui suit:

- La nécessité du procédé de coagulation floculation dans la chaîne de traitement des eaux potables;
- La nécessité de la modélisation des procédés physiques et chimiques et l'introduction des mathématiques et l'informatique pour le développement de l'industrie.
- Pour le modèle qu'on a trouvé, on peut arriver à des résultats plus précis si on introduit plus de paramètres avec plus de précision, et si on prend en compte d'autres conditions de traitement.

Bibliographie

Bibliographie:

- [1]: Sekiou Fateh: (Effets de la nature des particules solides dispersées et des conditions de formation du floc sur l'efficacité de la floculation). Mémoire de magister de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique. Blida 2001.
- [2]: Christian Desjardins: (Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (ACTIFLO) à l'aide d'une procédure modifiée de Jar test). Mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de maîtrise en sciences appliquées. Université de Montréal. Juin 1999.
- [3]: Mr Kettab Ahmed, Professeur, LRS-Eau ENSP, Alger: (Le traitement des eaux T1, les eaux potables). Edition OPU 1992.
- [4]: Hamidia Abdelkrim: (Modélisation mathématique et étude statistique des produits chimiques pour le traitement des eaux potables en diverses stations en Algérie). Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique. Blida 1998.
- [5]: Aouabed.A, chargé de cours à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique de Blida: (La coagulation floculation). Polycope de cours Année universitaire 2003-2004.
- [6]: Noual Mohamed Zineddine: (Essai de modélisation de l'étape de coagulation). Mémoire de fin d'études de l'université des sciences et technologie. Boumerdes 2008.
- [7]: Sadeddine Mahdi: (Etude sur la décoloration de l'eau par procédé de coagulation floculation). Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique. Alger 1997.
- [8]: Makhloufi.Noureddine: (Etude des performances épuratoires du lagunage naturel et l'effet du cadmium sur ces performances). Mémoire de fin d'études de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique. Blida 2005.
- [9]: Hadjazi Sabiha et Hadjazi Salima: (Etude et modélisation des paramètres physico-chimiques de la cinétique de fermentation de l'oxytétracycline). Mémoire de fin d'études du centre universitaire de Médéa). 2003.
- [10]: Michel Dysli: (Introduction aux éléments finis). Département de génie civil, laboratoire de mécanique des sols (Ecole polytechnique fédérale de Lausanne) deuxième édition, juin 1997.
- [11]: Office international de l'eau: (Impact de l'abaissement de la norme sur la turbidité au niveau du traitement de potabilisation). Janvier 2001.
- [12]: Achour et N Guesbaya: (Coagulation floculation par le sulfate d'aluminium de composés organiques phénolique et de substances humiques). Larhyss journal n° 4 (juin 2005).
- [13]: Héctor Ricardo Hernandez De Leon : (Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable). Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.
- [14]: Mouni Lotfi (Etude et caractérisation physico-chimique des rejets dans l'oued Soummam) Mémoire de magister en génie des procédés université de Bejaia 2003/2004.

[15]: A. Bazer-Bachi, E. Puech-Coste, R. Ben Aim et J. L. Probst (Modélisation mathématique du taux de coagulant dans une station de traitement d'eau). Revue des sciences de l'eau vol. 3, n° 4, 1990, p. 377-397.

[16]: Jacques Goupy (Les plans d'expériences) Revue MODULAD. 2006. N° 34.

[17]: Stéphane vivier (stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis) Thèse de Doctorat. Ecole centrale de Lille.

[18]: Claude Hoinard (les méthodes d'optimisation. Cours et énoncés d'exercices) Faculté des sciences pharmaceutiques de Tours. Laboratoire de biophysique et mathématiques. Mai 2009.

[19]: Philippe TRIBOULET (Notions de base sur les plans d'expériences) Lycée Niepce – Chalon sur Saône. 09/09/2008.

[20]: Monique Tardat-Henry, avec la collaboration de Jean Paul Beaudy (Chimie des eaux).

[21]: Aouabed.A (Réduction de la turbidité de l'eau de surface. Application à l'eau de barrage de Keddara).

[22]: Afoufou Fateh (incidence de traitement d'oxydation sur l'élimination de la matière organique des eaux naturelles par coagulation floculation). Mémoire de magister de l'école nationale polytechnique d'Alger 2002.

[23]: H.MASCHELEIN (Processus unitaires du traitement de l'eau potable).

[24]: Raymond Desjardins (Le traitement des eaux).

[25]: Claude Cardot (Génie de l'environnement. Le traitement de l'eau).

Sites Web

Sites Web:

[W1]: [http:// www.hmf.enseeiht.fr](http://www.hmf.enseeiht.fr)

[W2]: [http:// www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)

[W3]: <http://www.lenntech.com>

[W4]: <http://wawawa.emse.fr>

[W5]: <http://www.malverninstruments.fr>

[W6]: <http://www.agr.gc.ca>

[W7]: <http://www.ville.rouyn-noranda.qc.ca>

[W8]: <http://www.sde.sn>

[W9]: <http://www.emse.fr>

[W10]: <http://www.ile-perrot.qc.ca>

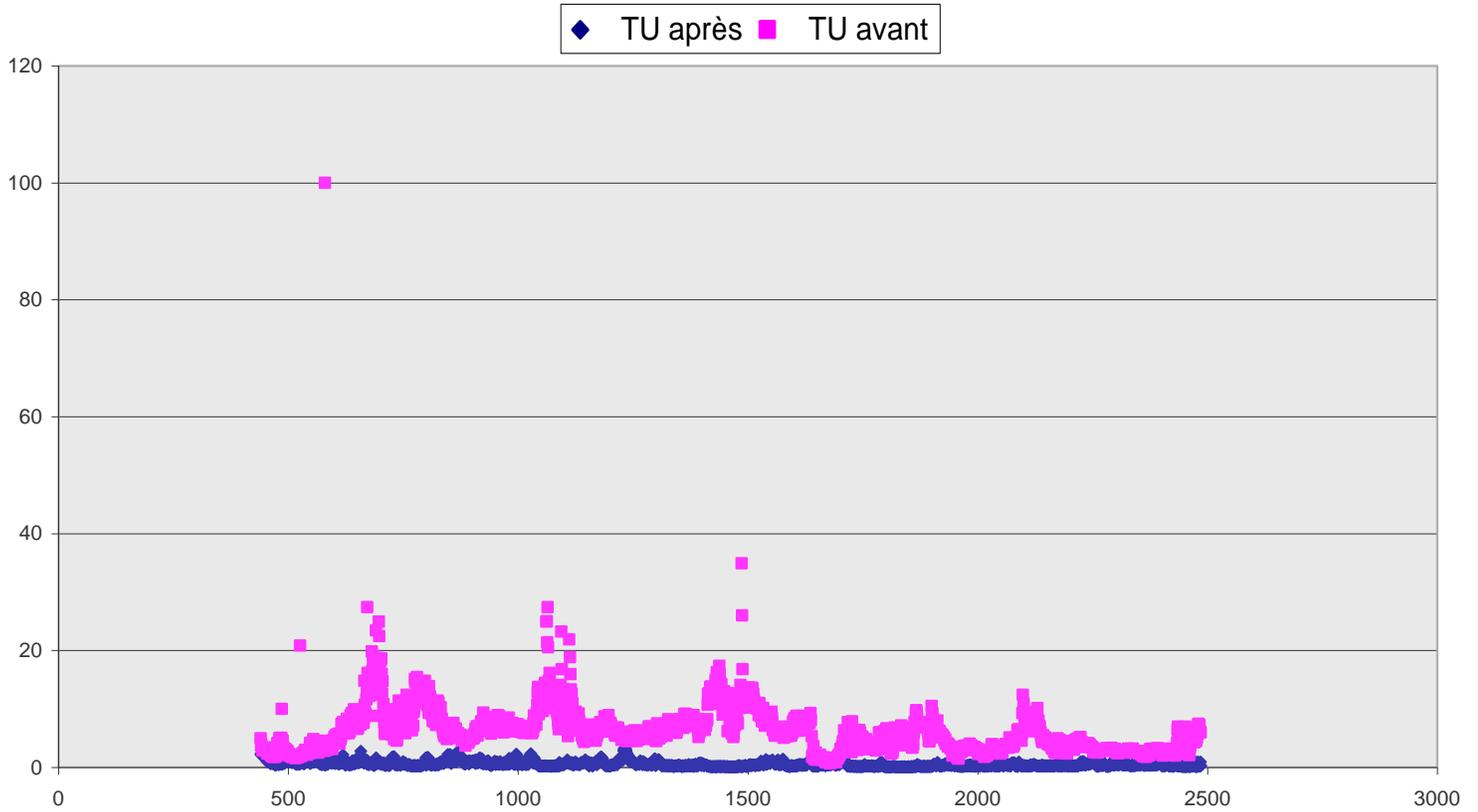
[W11]: [http:// www.pravarini.free.fr](http://www.pravarini.free.fr)

[W12]: <http://www.vaselli.free.fr>

[W13]: <http://www.users.swing.be>

Annexes

Annexe 1:
Courbe d'élimination de la turbidité.



Annexe 2:
Références des figures.

Fig III-1 : Héctor Ricardo Hernandez De Leon : (Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable). Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.

Fig III-2 : Héctor Ricardo Hernandez De Leon : (Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable). Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.

Fig III-4 : Christian Desjardins: (Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (ACTIFLO) à l'aide d'une procédure modifiée de Jar test). Mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de maîtrise en sciences appliquées. Université de Montréal. Juin 1999.

Fig III-5 : Christian Desjardins: (Simulation et étude en laboratoire de la floculation lestée (ACTIFLO) à l'aide d'une procédure modifiée de Jar test). Mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de maîtrise en sciences appliquées. Université de Montréal. Juin 1999.

Fig III-6: <http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0304/optsee/bei/5/binome4/coag.htm>

Fig III-7 : Achour et N Guesbaya: (Coagulation floculation par le sulfate d'aluminium de composés organiques phénolique et de substances humiques). Larhyss journal n° 4 (juin 2005).

Fig IV-1: Achour et N Guesbaya: (Coagulation floculation par le sulfate d'aluminium de composés organiques phénolique et de substances humiques). Larhyss journal n° 4 (juin 2005).

Annexe 3:**Résultats mensuels des différents paramètres (station Boudouaou).**

| mois | Eau Brute (2002) | | | | | Eau Traitée (2002) | | | | |
|------|------------------|------|---------|--------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 12,86 | 8,25 | 1000,13 | 22,69 | 16,28 | 12,07 | 7,69 | 1008,84 | 0,12 | 14,74 |
| F | 13,39 | 8,27 | 1107,14 | 4,40 | 16,38 | 12,96 | 7,68 | 1127,07 | 0,19 | 13,58 |
| M | 15,83 | 8,36 | 1038,06 | 8,16 | 17,20 | 15,47 | 7,80 | 1054,29 | 0,19 | 14,43 |
| A | 17,27 | 8,44 | 1084,67 | 14,71 | 17,54 | 17,09 | 7,81 | 1110,80 | 0,19 | 14,97 |
| M | 21,22 | 8,54 | 1176,40 | 31,69 | 17,73 | 20,95 | 8,00 | 1194,30 | 0,28 | 15,58 |
| J | 24,43 | 8,34 | 1527,80 | 214,19 | 20,64 | 24,65 | 7,88 | 1660,05 | 0,57 | 17,17 |
| J | 26,37 | 8,58 | 1232,72 | 8,49 | 18,14 | 26,21 | 8,12 | 1253,64 | 0,33 | 16,07 |
| A | 26,85 | 8,49 | 1235,60 | 5,13 | 18,13 | 27,01 | 8,07 | 1273,90 | 0,54 | 16,28 |
| S | 25,47 | 8,33 | 1341,23 | 5,90 | 16,93 | 25,95 | 7,84 | 1373,04 | 0,24 | 16,70 |
| O | 21,98 | 7,48 | 1211,38 | 10,59 | 22,17 | 22,17 | 7,37 | 1280,77 | 0,36 | 18,18 |
| N | 18,01 | 7,85 | 948,69 | 18,01 | 17,18 | 17,49 | 7,38 | 1007,21 | 0,32 | 15,37 |
| D | 14,72 | 7,87 | 701,81 | 18,22 | 13,32 | 14,52 | 7,28 | 720,99 | 0,23 | 11,67 |

| mois | Eau Brute (2003) | | | | | Eau Traitée (2003) | | | | |
|------|------------------|------|---------|-------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 13,34 | 7,96 | 754,40 | 30,61 | 14,38 | 12,89 | 7,38 | 783,73 | 0,24 | 12,97 |
| F | 11,71 | 7,98 | 732,77 | 54,28 | 15,50 | 11,41 | 7,50 | 758,82 | 0,84 | 13,57 |
| M | 13,36 | 7,93 | 763,84 | 4,72 | 16,09 | 12,99 | 7,53 | 781,94 | 0,82 | 14,60 |
| A | 13,72 | 7,90 | 795,77 | 3,01 | 16,29 | 13,87 | 7,70 | 806,80 | 1,80 | 15,12 |
| M | 15,50 | 7,82 | 808,88 | 3,19 | 16,22 | 15,42 | 7,87 | 819,03 | 0,75 | 15,49 |
| J | 18,61 | 7,77 | 816,20 | 2,04 | 16,64 | 18,48 | 7,75 | 826,77 | 0,98 | 15,58 |
| J | 18,35 | 7,70 | 806,70 | 3,42 | 15,62 | 18,81 | 7,83 | 820,06 | 0,88 | 15,05 |
| A | 17,39 | 7,63 | 804,16 | 3,63 | 16,90 | 17,97 | 7,79 | 814,32 | 0,96 | 15,98 |
| S | 16,84 | 7,55 | 811,10 | 13,21 | 18,60 | 17,34 | 7,80 | 823,30 | 0,79 | 17,52 |
| O | 16,28 | 7,41 | 877,74 | 6,27 | 18,46 | 16,40 | 7,66 | 889,13 | 0,85 | 17,08 |
| N | 15,88 | 7,41 | 978,57 | 8,33 | 18,53 | 15,64 | 7,62 | 986,30 | 1,07 | 17,13 |
| D | 14,42 | 7,58 | 1060,87 | 15,78 | 16,87 | 14,04 | 7,52 | 1098,23 | 0,81 | 15,92 |

| mois | Eau Brute (2004) | | | | | Eau Traitée (2004) | | | | |
|------|------------------|------|---------|-------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 13,16 | 7,82 | 1155,35 | 10,18 | 17,95 | 13,02 | 7,55 | 1168,06 | 0,67 | 16,10 |
| F | 13,49 | 7,82 | 1176,97 | 7,13 | 19,13 | 17,36 | 7,69 | 1189,31 | 0,66 | 17,88 |
| M | 13,57 | 7,83 | 1210,94 | 11,30 | 19,90 | 13,53 | 7,68 | 1227,42 | 0,31 | 19,18 |
| A | 14,24 | 7,75 | 1200,17 | 11,18 | 19,91 | 14,19 | 7,60 | 1212,17 | 0,71 | 19,25 |
| M | 14,82 | 7,70 | 1206,58 | 7,62 | 19,17 | 14,80 | 7,49 | 1218,23 | 0,87 | 18,36 |
| J | 16,96 | 7,60 | 1204,35 | 5,87 | 19,52 | 16,95 | 7,49 | 1217,08 | 1,66 | 18,86 |
| J | 17,88 | 7,53 | 1209,35 | 5,04 | 19,80 | 17,81 | 7,69 | 1220,32 | 0,92 | 19,13 |
| A | 18,57 | 7,49 | 1222,77 | 7,29 | 18,76 | 18,75 | 7,62 | 1190,97 | 0,87 | 18,48 |
| S | 17,53 | 7,44 | 1181,67 | 7,42 | 17,98 | 18,05 | 7,65 | 1191,70 | 0,66 | 17,65 |
| O | 17,01 | 7,40 | 1222,06 | 6,94 | 17,51 | 17,82 | 7,58 | 1231,32 | 0,84 | 17,08 |
| N | 15,89 | 7,36 | 1230,87 | 6,32 | 17,80 | 15,67 | 7,53 | 1239,53 | 0,98 | 17,31 |
| D | 15,19 | 7,62 | 1221,94 | 12,96 | 18,16 | 14,41 | 7,50 | 1234,71 | 0,44 | 17,24 |

Suite résultats mensuels des différents paramètres (station Boudouaou).

| mois | Eau Brute (2005) | | | | | Eau Traitée (2005) | | | | |
|------|------------------|------|---------|-------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 12,64 | 7,86 | 1196,77 | 12,93 | 16,40 | 11,89 | 7,63 | 1208,94 | 0,25 | 15,32 |
| F | 11,17 | 7,97 | 1115,11 | 11,39 | 17,04 | 10,46 | 7,71 | 1126,25 | 0,65 | 16,20 |
| M | 11,62 | 7,96 | 1081,74 | 6,52 | 18,10 | 11,89 | 7,65 | 1093,23 | 0,73 | 17,36 |
| A | 12,91 | 7,90 | 1129,10 | 6,22 | 17,32 | 13,63 | 7,62 | 1143,27 | 0,86 | 16,52 |
| M | 13,34 | 7,83 | 1051,52 | 7,00 | 17,56 | 15,39 | 7,67 | 1064,48 | 0,45 | 17,28 |
| J | 13,94 | 7,71 | 1078,93 | 5,64 | 17,85 | 16,11 | 7,55 | 1084,53 | 1,73 | 17,05 |
| J | 14,06 | 7,64 | 1099,71 | 5,36 | 18,05 | 16,86 | 7,57 | 1111,87 | 0,78 | 17,15 |
| A | 14,42 | 7,64 | 1112,35 | 5,78 | 18,96 | 16,87 | 7,57 | 1123,58 | 0,64 | 18,16 |
| S | 14,35 | 7,53 | 1094,45 | 6,31 | 18,20 | 16,48 | 7,56 | 1104,03 | 0,37 | 18,25 |
| O | 14,14 | 7,41 | 1099,26 | 7,40 | 18,96 | 15,54 | 7,54 | 1109,74 | 0,24 | 18,04 |
| N | 13,59 | 7,40 | 1136,30 | 7,53 | 18,25 | 13,64 | 7,42 | 1145,30 | 0,35 | 17,65 |
| D | 13,95 | 7,54 | 1181,39 | 10,10 | 18,15 | 13,43 | 7,48 | 1189,65 | 0,28 | 17,45 |

| mois | Eau Brute (2006) | | | | | Eau Traitée (2006) | | | | |
|------|------------------|------|---------|-------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 12,84 | 7,82 | 1274,71 | 12,54 | 17,04 | 12,35 | 7,54 | 1284,74 | 0,12 | 15,80 |
| F | 12,50 | 7,80 | 1304,79 | 9,46 | 16,25 | 12,10 | 7,55 | 1317,25 | 0,12 | 15,15 |
| M | 12,90 | 7,79 | 1182,65 | 12,33 | 16,25 | 12,90 | 7,52 | 1196,35 | 0,30 | 15,40 |
| A | 14,06 | 7,73 | 1183,43 | 8,65 | 16,85 | 14,72 | 7,49 | 1195,13 | 0,64 | 16,25 |
| M | 16,51 | 7,63 | 1211,68 | 6,37 | 17,00 | 16,05 | 7,47 | 1222,00 | 0,82 | 16,28 |
| J | 17,49 | 7,47 | 1225,43 | 6,58 | 17,60 | 16,56 | 7,37 | 1236,93 | 0,25 | 16,75 |
| J | 19,44 | 7,44 | 1231,87 | 7,41 | 17,84 | 18,15 | 7,37 | 1244,00 | 0,60 | 16,96 |
| A | 22,19 | 7,43 | 1277,16 | 1,60 | 17,55 | 21,25 | 7,53 | 1285,45 | 0,32 | 17,00 |
| S | 21,75 | 7,36 | 1380,00 | 1,36 | 16,85 | 21,68 | 7,58 | 1388,17 | 0,52 | 16,95 |
| O | 21,81 | 7,79 | 1422,76 | 4,40 | 15,50 | 22,12 | 7,76 | 1420,52 | 0,61 | 15,35 |
| N | 19,98 | 8,08 | 1487,62 | 4,64 | 15,35 | 19,71 | 7,72 | 1506,38 | 0,18 | 15,15 |
| D | 16,31 | 8,03 | 1279,80 | 3,73 | 15,40 | 15,95 | 7,69 | 1274,73 | 0,20 | 15,30 |

| mois | Eau Brute (2007) | | | | | Eau Traitée (2007) | | | | |
|------|------------------|------|---------|------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 14,01 | 7,99 | 1073,58 | 4,55 | 15,68 | 13,68 | 7,72 | 1081,48 | 0,20 | 15,84 |
| F | 13,43 | 8,00 | 1083,19 | 5,52 | 15,90 | 13,35 | 7,76 | 1091,52 | 0,10 | 15,50 |
| M | 13,77 | 8,01 | 1078,79 | 6,07 | 16,50 | 13,61 | 7,76 | 1086,82 | 0,17 | 15,70 |
| A | 14,47 | 8,04 | 1111,55 | 7,10 | 16,40 | 14,56 | 7,73 | 1121,94 | 0,21 | 15,43 |
| M | 15,57 | 8,01 | 1097,17 | 5,20 | 16,70 | 16,20 | 7,68 | 1104,83 | 0,38 | 15,15 |
| J | 16,95 | 7,93 | 1094,65 | 2,68 | 16,25 | 17,69 | 7,85 | 1100,58 | 0,33 | 15,50 |
| J | 17,77 | 7,83 | 1073,37 | 3,34 | 17,90 | 18,83 | 7,91 | 1081,80 | 0,26 | 17,20 |
| A | 18,89 | 7,76 | 1034,26 | 2,44 | 17,30 | 19,95 | 7,86 | 1041,13 | 0,27 | 17,20 |
| S | 20,15 | 7,64 | 1051,39 | 3,29 | 17,13 | 20,86 | 7,82 | 1057,13 | 0,31 | 16,73 |
| O | 21,72 | 7,82 | 1133,13 | 4,35 | 16,00 | 21,63 | 7,76 | 1139,43 | 0,45 | 15,60 |
| N | 18,09 | 7,89 | 1126,90 | 7,23 | 14,80 | 17,50 | 7,58 | 1139,68 | 0,29 | 14,10 |
| D | 15,30 | 7,92 | 1108,29 | 7,16 | 14,60 | 14,76 | 7,48 | 1119,38 | - | - |

Suite résultats mensuels des différents paramètres (station Boudouaou).

| mois | Eau Brute (2008) | | | | | Eau Traitée (2008) | | | | |
|------|------------------|------|---------|------|-------|--------------------|------|---------|------|-------|
| | T | P | C | TU | TA | T | P | C | TU | TA |
| J | 13,51 | 8,01 | 1112,30 | 6,22 | 15,10 | 13,08 | 7,68 | 1124,00 | 0,28 | 13,60 |
| F | 13,14 | 8,18 | 1143,55 | 3,66 | 16,30 | 12,49 | 7,86 | 1155,77 | 0,27 | 15,20 |
| M | 13,58 | 8,24 | 1180,28 | 3,23 | 16,00 | 13,46 | 7,91 | 1186,79 | 0,30 | 15,27 |
| A | 14,38 | 8,15 | 1188,87 | 4,18 | 17,40 | 14,63 | 7,85 | 1183,77 | 0,49 | 15,60 |
| M | 14,76 | 8,14 | 1183,43 | 3,01 | 17,50 | 15,38 | 7,94 | 1193,63 | 0,53 | 16,40 |
| J | 15,53 | 8,00 | 1176,87 | 3,01 | 17,40 | 16,35 | 7,91 | 1101,10 | 0,40 | 15,80 |
| J | 16,38 | 7,92 | 1155,53 | 2,70 | 17,15 | 17,98 | 7,83 | 840,43 | 0,44 | 16,35 |
| A | 17,06 | 7,83 | 1176,68 | 2,49 | 16,90 | 18,62 | 7,91 | 858,32 | 0,40 | 16,10 |
| S | 17,22 | 7,85 | 1179,84 | 2,65 | 16,84 | 18,55 | 7,87 | 856,42 | 0,43 | 16,16 |
| O | 17,40 | 7,89 | 1173,35 | 2,55 | 17,05 | 18,25 | 7,76 | 831,67 | 0,34 | 15,73 |
| N | 17,55 | 8,01 | 1217,35 | 3,85 | 15,60 | 17,07 | 7,78 | 906,74 | 0,25 | 14,72 |
| D | 14,32 | 8,06 | 1214,57 | 5,22 | 15,45 | 13,76 | 7,72 | 1003,50 | 0,28 | 14,18 |