

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Hydraulique

Option : Hydraulique et technique des eaux

Présenté par : AOUALMIA Amina

GASMALLAH Khawla

Thème :

Modélisation du système de coagulation-floculation : cas de la station de traitement de l'eau potable Ain Dalia- Souk Ahras

Sous la direction de : Mme BEB Messaouda

Jun 2015

Remerciements

Avant toute personne, nous devons remercier Allah qui nous a donné la foi, le courage, la volonté de réaliser ce travail.

Nous remercions tout d'abord Mme BEB de nous avoir proposé ce sujet, de l'attention qu'elle a portée à notre travail et des moments de discussion précieuse qu'elle nous a réservés. Nous la remercions infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie et son encadrement infaillible et stimulant.

Nous vous témoignons, Madame, notre profonde gratitude pour ta patience, ta sensibilisation à la recherche et à l'innovation, tes critiques constructives pour améliorer la qualité de nos recherches ; mais aussi et surtout pour votre disponibilité la confiance et le temps que vous avez toujours su nous accorder, malgré un emploi du temps bien chargé. Nous avons beaucoup appris sous votre direction. C'est grâce à vous que nous mettons nos premiers pas dans la recherche sur les réseaux de neurones.

C'est pour nous un grand honneur et un réel plaisir de rendre hommage, témoigner notre profonde reconnaissance et formuler des remerciements aux corps professoral de l'université de Guelma et surtout aux enseignants qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à notre formation

Il nous est agréable de remercier les membres de jury pour leur acceptation d'évaluer et juger notre travail.

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le laboratoire de la station de production d'eau potable Ain Dalia. Nous remercions vivement tous les responsables et leur équipe respective pour leurs bienveillances et contributions à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à Mr DJEDDOU Ali (maitre du stage) qui n'a pas manqué de nous partager son expérience passionnante et enrichissante.

Nous tenons à exprimer tout au fond de notre cœur nos reconnaissances à notre famille qui nous offre toujours un appui sûr par leur soutien et leurs encouragements depuis le début de notre cursus jusqu'à maintenant, nous tenons à leur dire merci une fois de plus on vous aime.

Au nom d'Allah le clément et le miséricordieux et de fidélité

Ce modeste travail, n'est pas seulement l'œuvre de cinq années d'études universitaires mais de toute une vie. Il fut des moments où nous avons baissé les bras, des moments où nous avons délaissé notre passion pour les études. Et durant ces moments d'incertitudes nos parents nous ont toujours soutenus ; conseils, soutien financier et moral, ils n'ont cessé de nous en procurer car ils n'ont jamais cessé de croire en nous. Du fond du cœur, merci à vous.

Dédicace spéciale à

- Ma défunte mère ; qu'ALLAH t'ouvres les portes du paradis et que ton âme repose en paix reçois à travers ce travail l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.
- Mon père
- Ma grande sœur Asma et son mari Walid
- Mon bien-aimé frère abdrahmane
- Les fleurs de nos vies Malak et Rimes

Mes cousins et liens, mes amis, collègues d'étude. Et à tous qui ont contribué de près ou loin pour que ce projet soit, je vous dis Merci

A mon binôme Aminata

A tous ceux que j'aime

khawla

Dédicace

Au nom d'Allah le clément et le miséricordieux et de fidélité,

Je dédie ce présent mémoire :

A mes deux êtres les plus précieux et plus chers au monde : PAPPA & MAMA, Sources de mes joies, secrets de ma force - que Allah les protège - ; Vous serez toujours le modèle Papa, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté ; Maman dans ta bonté, ta patience et ton dévouement pour nous.

Merci pour tous vos prières et sacrifices pour que vos enfants grandissent et prospèrent. Merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de la vie, et au bien être de vos enfants. Merci d'être tout simplement mes parents. C'est grâce à vous j'ai pu affronter les difficultés.

C'est à vous que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir.

A mes sœurs, en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, santé et de réussite.

A mes frères, qui m'ont accordé une attention que je n'oublierais jamais.

A mes petits loulous et mes cousins qui me fait sentir la joie (Youcef, Anes, Meriouma, Youyou et Moumen).

A toute ma famille et liens.

A mon binôme Khawkha.

A mes chères amies ; Takwa, Naïma, Rokaya, Babí, Noula, Boutí, Karíma, Imene, Kawthar...avec eux j'ai passé mes superbes moments.

A tous ceux qui me sont chers.

Mina

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nature et origine des particules.....	p 4
Tableau 2 : Les normes de l'eau potable fixées par l'OMS.....	p 5
Tableau 3 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer.....	p 8
Tableau 4 : Aperçu des méthodes de désinfection de l'eau potable.....	p 11
Tableau 5 : Temps de décantation des différentes particules (d'après la loi de Stokes)....	p 14
Tableau 6 : Les différents types de coagulant.....	p 15
Tableau 7 : Choix du coagulant.....	p 16
Tableau 8 : Les fonctions d'activation.....	p 23
Tableau 9 : Les caractéristiques du coagulateur (Flash mixer).....	p 36
Tableau 10 : Les caractéristiques des décanteurs-floculateurs.....	p 37
Tableau 11 : Les caractéristiques des filtres.....	p 38
Tableau 12 : Les caractéristiques des réservoirs.....	p 40
Tableau 13 : Différents paramètres à analyser.....	p 42
Tableau 14 : Résumé statique des variables descriptives de l'eau brute.....	p 45
Tableau 15 : Résultats d'analyse de l'eau brute et traitée.....	p 47
Tableau 16 : Prédiction des analyses statistiques descriptives.....	p 50
Tableau 17 : Performances de la prédiction de la dose du coagulant par les modèles RNA	p 52
Tableau 18 : Coefficients de corrélation.....	p 53
Tableau 19 : Analyse de la sensibilité de la dose du coagulant.....	p 55

Liste des figures

Figure 1 : Classification des particules suivant le diamètre.....	p 4
Figure 2 : Schéma classique d'une station de potabilisation des eaux de surface (DES_97).....	p 6
Figure 3 : Un dégrilleur.....	p 7
Figure 4 : Tambours filtrants (pour tamisage et micro-tamisage).....	p 7
Figure 5 : Stabilité d'une suspension colloïdale.....	p 13
Figure 6 : Explication schématique d'une chaîne « coagulation-floculation ».....	p 14
Figure 7 : Le procédé de Coagulation / Floculation.....	p 19
Figure 8 : Schématisation d'un neurone biologique.....	p 22
Figure 9 : Schématisation d'un neurone formel.....	p 22
Figure 10 : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.....	p 24
Figure 11 : Schéma d'un réseau multicouche.....	p 26
Figure 12 : Réseau à connexions locales.....	p 27
Figure 13 : Réseau à connexions récurrentes.....	p 27
Figure 14 : Réseau à connexions complètes.....	p 28
Figure 15 : Le réseau statique.....	p 28
Figure 16 : Le réseau récurrent ou dynamique.....	p 29
Figure 17 : Vue de haut de la station de traitement des eaux potables ; Ain Dalia wilaya de Souk- Ahras.....	p 33
Figure 18 : Barrage d'Ain Dalia.....	p 34
Figure 19 : La conduite d'arrivée d'eau brute.....	p 35
Figure 20 : Flash mixer.....	p 36

Figure 21 : Le décanteur-floculateur.....	p 37
Figure 22 : Regard de purge des boues.....	p 38
Figure 23 : Bassin des filtres à sable.....	p 39
Figure 24 : Le filtre au cours et après le lavage.....	p 39
Figure 25 : Réservoirs de stockage.....	p 40
Figure 26 : La chambre de pompage.....	p 41
Figure 27 : Tableau synaptique.....	p 41
Figure 28 : Floculateur de 6 agitateurs (Floculateur SELECTA).....	p 43
Figure 29 : Classement des floccs.....	p 44
Figure 30 : Caractéristiques de l'eau brute et traitée.....	p 49
Figure 31 : Schéma général du modèle.....	p 52
Figure 32 : Résultats d'apprentissage, test des modèles.....	p 53
Figure 33 : Résultats d'apprentissage du modèle MLP 9-10-1.....	p 54
Figure 34 : Résultats des erreurs du modèle 9-10-1.....	p 55
Figure 35 : Un pH mètre, Un conductimètre.....	p 58
Figure 36 : Un turbidimètre.....	p 58
Figure 37 : Un thermomètre.....	p 59
Figure 38 : Spectrophotomètre UV/VIS 2005 SELECTA.....	P 61

Liste des abréviations

ADALINE :	adaptive linear element
ADE :	Algérienne des eaux
AOX :	organohalogéné
CE :	conductivité électrique
CFD :	coagulation-floculation-décantation
CO₂ :	dioxyde de carbone
CW 19 A :	chemin wilaya
DC :	dose du coagulant
DN :	diamètre nominal
EB :	eau brute
ET :	eau traitée
GEP :	groupe électropompe
HCO₃⁻ :	bicarbonate ou hydrogénocarbonate
HS :	hors service
JT :	essai jar-test
pH :	potentiel hydrogène
MADALINE :	multiple adaptive linear element
MES :	matière en suspension
MLP :	multi layer perceptron
MO :	matière organique
NF :	nano filtration
NH₄⁺ :	ammonium
OMS :	organisation mondiale de la santé
PMC :	perceptron multi -couches
Qn :	débit nominal
R² :	coefficient de corrélation
RBF :	réseau de neurones à fonction de base radiale
RMSE :	racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
RNA :	réseau de neurone artificiel
UTE :	usine de traitement des eaux
UV :	ultra-violet

T : température
TA : titre alcalimétrique
TAC : taux d'alcalinité complet
TH : taux hydrotimétrique (la dureté)
THM : les trihalométhanes

Les unités

NGA :	nivellement général d'Algérie
m :	mètre
mm :	millimètre
cm :	centimètre
m/h :	mètre par heure
m/s :	mètre par seconde
m³/h:	mètre cube par heure
m³/j :	mètre cube par jour
m³ :	mètre cube
m³/m²/j :	mètre cube par mètre carré par jour
m³/h/m² :	mètre cube par heure par mètre carrée
g :	gramme
mg /l:	milligramme par litre
g/m³ :	gramme par mètre cube
g/l :	gramme par litre
l/s :	litre par seconde
μS :	millisiemens
μS/cm :	millisiemens par centimètre
tr/min :	tour par minute
KPa :	kilo-Pascal
NTU :	nephelometrie turbidity unites
°F :	degré français
°C :	degré Celsius
mV :	millivolt
s :	seconde
min :	minute
h :	heure
j :	jour
mol/l :	mole par litre
mmol/l :	milli-mole par litre

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Table des matières	
Résumé	
Introduction générale.....	1

1-Etude bibliographique

Chapitre 1 : Généralités sur le traitement de l'eau potable

1.1. Introduction.....	3
1.2. Les particules existantes dans l'eau.....	3
1.3. Les critères de potabilité.....	4
1.4. Traitement de l'eau.....	5
1.5. Les procédés de traitement.....	6
1.5.1. Prétraitement.....	6
1.5.2. Préoxydation.....	7
1.5.3. Clarification.....	7
1.5.4. Affinage.....	9
1.5.5. Désinfection.....	10
1.6. Conclusion.....	11

Chapitre 2 : Traitement Physico-chimique (CFD)

2.1. Introduction.....	12
2.2. Généralités sur les particules colloïdales.....	12
2.3. Phénomène de coagulation.....	14
2.3.1. La coagulation.....	14
2.3.2. Les coagulants utilisés.....	15
2.4. Phénomène de floculation.....	17

2.4.1. Les adjuvants de floculation.....	18
2.4.2. Cinétique de la floculation.....	18
2.5. Mécanisme de la coagulation-floculation.....	18
2.6. La décantation.....	19
2.7. Conclusion.....	20

Chapitre 3 : Théorie des réseaux de neurones

3.1. Introduction.....	21
3.2. Généralités sur le neurone.....	21
3.2.1. Le modèle neurophysiologique.....	21
3.2.2. Le neurone formel.....	22
3.3. Les réseaux de neurones artificiels (RNA)	24
3.3.1. Définition.....	24
3.3.2. Historique des recherches sur les réseaux de neurones.....	24
3.3.3. Quelques types de réseaux de neurones.....	25
3.4. Structure d'interconnexion.....	27
3.5. Architecture des réseaux de neurones.....	28
3.5.1. Réseaux statiques (non bouclés ou "Feed-Forward").....	28
3.5.2. Les réseaux dynamiques ou récurrents (bouclés ou Feed-Back).....	29
3.6. Les différentes procédures et les lois d'apprentissage d'un réseau de neurones.....	29
3.7. Mise en œuvre des modèles de réseaux de neurones.....	30
3.8. Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones.....	31
3.9. Applications.....	32
3.10. Conclusion.....	32

2-Partie expérimentale

Chapitre 4 : Protocole expérimental

4.1. Introduction	33
4.2. Les ouvrages de la station.....	34
4.3. Les procédés de traitement.....	35
4.3.1. La phase de prétraitement.....	35
4.3. 2. La phase de coagulation.....	35
4.3. 3. La phase de décantation -floculation	37
4.3. 4. La phase de filtration sur lit de sable.....	38
4.3.5. Le stockage.....	40
4.3. 6. Station de pompage.....	40
4.4. Méthode d'étude.....	41
4.5. Conclusion.....	45

Chapitre 5 : Résultats et discussions

5.1. Introduction.....	46
5.2. Analyse des résultats.....	46
5.2.1. Construction du modèle RNA.....	49
5.2.2. Apprentissage des Réseaux de Neurones.....	50
5.2.3. Paramètres de validation des modèles.....	51
5.3. Prédiction du taux du coagulant du procédé de traitement.....	51
5.4. Validation du modèle.....	52
5.5. Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Annexe.....	58

Références bibliographiques

Résumé

La coagulation est une étape très importante dans la production de l'eau potable à partir d'eau brute; elle permet d'éliminer les particules colloïdales, source de contamination par la suite. La consommation d'agent coagulant fait de cette étape, l'opération la plus coûteuse dans la chaîne de traitement. Généralement la dose du coagulant est déterminée par les essais de Jar-Test. Ce type d'approche a également le désavantage d'avoir un temps de retard relativement long. En effet, on ne modifie la dose du coagulant qu'une fois l'événement apparu. De plus, elle ne permet pas de suivre finement l'évolution de la qualité de l'eau brute. Notre objectif est de prouver que la dose du coagulant est une variable expliquée par différentes variables. Cette étude décrit une nouvelle méthode de détermination de la dose du coagulant en adoptant l'approche neuronale qui repose sur la modélisation des données à travers un réseau de neurones.

Mots clés : traitement eau potable, coagulation, floculation, dose du coagulant, modélisation.

Abstract

Coagulation is a very important step in the production of drinking water starting from raw water; it allows the elimination of the colloidal particles, source of contamination thereafter. The consumption of coagulant agents makes this process, the most costly operation in the treatment chain. Usually the coagulant dosage is determined by the Jar-Test tests. This approach has also the disadvantage of having a relatively long time. Indeed, we only change the coagulant dosage once the event appears. Moreover, it doesn't allow monitoring the evolution of the raw water quality. Our objective is to prove that the dose of coagulant is a variable explained by different variables. This study describes a new method of the determining the coagulant dosage by adopting the neuronal approach which is based on the modelling of the data through a neural network.

ملخص

يعتبر التخثر الخطوة الهامة في انتاج الماء الشروب ابتداء من الماء الغير معالج. انه يسمح بإزالة الجسيمات الغروية مصدر التلوث فيما بعد. استهلاك عامل التخثر في هذه الخطوة يجعلها الاكثر تكلفة في سلسلة المعالجة. بصفة عامة يتم تحديد جرعة التخثر عن طريق "اختبار الجرعة". هذا النوع من المقاربة له سلبية أخذ وقت معتبر. بحيث انه لا يتم تغيير الجرعة الا في حال ظهور حدث ما. علاوة على ذلك فانه لا يسمح برصد تطور نوعية الماء الغير معالج بدقة. هدفنا هو اثبات العلاقة بين جرعة التخثر ومختلف المتغيرات. هذه الدراسة تصف منهجية جديدة لتحديد جرعة التخثر بالاعتماد على المقاربة العصبية التي تركز بدورها على نمذجة المعطيات من خلال الشبكة العصبية.

Introduction générale

En Algérie, la consommation en eau augmente considérablement et la pénurie se fait sentir dans de nombreuses régions du pays. Ceci risque d'avoir des répercussions sur le développement socio-économique ainsi que la préservation de l'environnement. Cette forte demande résulte de la croissance démographique et de l'amélioration des conditions de vie. Devant ces contraintes, l'Algérie a déployé d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique en vue de faire face à ces enjeux. Les stations de traitement de l'eau potable figurent parmi les infrastructures auxquelles une grande importance a été donnée. Deux principaux objectifs sont ciblés lors de la gestion et l'exploitation d'une station de traitement des eaux : Un objectif de qualité et un objectif de coût.

Les progrès importants réalisés au cours des dernières années dans le domaine de l'intelligence artificielle ont permis de réduire les difficultés et de s'affranchir les limitations des modèles linéaires. Des modèles basés sur la technique des réseaux de neurones artificiels ont été mis au point. Cette modélisation a été intégrée dans le but de déterminer la dose optimale de coagulant en fonction de différentes caractéristiques de la qualité de l'eau brute telles que la turbidité, le pH, la conductivité... etc.

Notre objectif dans ce projet de fin d'études, est d'une part maximiser la déstabilisation des particules et des colloïdes organiques pour faciliter leur agglomération et leur enlèvement subséquent, par un procédé de séparation solide-liquide et, d'autre part, à minimiser la concentration du coagulant résiduel. La minimisation des coûts de l'opération se fait par une coagulation que l'on juge optimale. Elle correspond au dosage du coagulant qui assure l'atteinte de tous les objectifs de qualité. Afin d'évaluer les conditions optimales de coagulation et de floculation, des essais dits de « Jar-Test » (JT) sont conduits à l'échelle de laboratoire. Ceux-ci, menés dans une large gamme de conditions opératoires, permettent de déterminer le type de coagulant, son dosage, le pH et les conditions d'agitation qui maximisent la réduction de la turbidité.

Ce type d'approche (essai Jar-Test) a l'inconvénient d'avoir un temps de réponse relativement long. En effet, on ne modifie la dose de coagulant qu'une fois un événement apparu. De plus elle ne permet pas de suivre finement l'évolution de la qualité de l'eau brute. D'où l'intérêt de disposer d'un contrôle automatique et efficace de ce procédé pour un meilleur rendement de traitement et une réduction des coûts d'exploitation.

La détermination du dosage optimal de coagulant à appliquer est relativement complexe puisqu'elle requiert l'atteinte simultanée de plusieurs objectifs. Il est donc pertinent de développer des outils d'aide à la décision pour assister les opérateurs dans le choix de la dose du coagulant.

Au cours des dernières années une nouvelle approche a été développée, qui est la régulation du procédé de coagulation basée sur les variables descriptives de la qualité de l'eau brute. Cette technique impose de trouver un modèle reliant la dose optimale du coagulant à ces différentes variables. Nous proposons une méthodologie de prédiction de la dose du coagulant en fonction des variables descriptives caractérisant l'eau brute, complète et explicite pour l'estimation des paramètres (processus d'apprentissage) et pour le choix du modèle (sélection d'architecture).

Dans cette contribution nous allons tenter de faire une construction d'un modèle neuronal qui intègre les différents paramètres physico-chimiques de l'eau brute en utilisant un réseau de neurones de type (MLP) ou (RBF) pour estimer la dose optimale du coagulant en vue d'une meilleure qualité et de service au niveau de la station de traitement Ain Dalia (Wilaya de Souk-Ahras) alimentée à partir du barrage Ain-Dalia à l'Est Algérien, tout en faisant restriction au cas de faible turbidité de l'eau brute.

Cette étude se présente en deux parties :

La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique comporte trois chapitres. Dans le premier chapitre, les différents procédés de traitement d'eau potable ; Le deuxième chapitre : les procédés les plus importantes dans la chaîne de production c'est la coagulation-floculation-décantation (CFD), Le dernier chapitre de l'étude bibliographique concerne les réseaux neurones.

La seconde partie de l'étude est axée sur l'expérimentation et la modélisation, et elle sera présentée en deux chapitres. Le premier consiste à la description détaillée de notre zone d'étude (UTE Ain Dalia Wilaya de Souk-Ahras) ensuite les résultats des analyses effectuées dans le laboratoire pour déterminer les paramètres d'entrées des réseaux de neurones, on construira les modèles de prédiction de la dose du coagulant avec des discussions et interprétations sur les résultats des modèles obtenus dans le second chapitre enfin une conclusion générale.

1.1. Introduction :

Presque 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 réceptacle. L'eau est ainsi le vecteur de transmission privilégié de nombreuses maladies (choléra, typhoïde, saturnisme (plomb), moustiques transmettant différentes maladies, diarrhées, ... etc). Pour pouvoir être consommée sans danger, l'eau doit donc être traitée.

La filière de traitement d'une station de potabilisation de l'eau dépend d'une part de l'eau brute elle-même (provenance, substances contenues, qualité intrinsèque) et, d'autre part, du cadre législatif et réglementaire régissant l'eau de boisson de leur côté, les procédés doivent répondre chacun à des conditions particulières qui assureront leur bon fonctionnement. Tous ces éléments doivent être pris en compte dans le choix des procédés d'une chaîne de traitement. Cette approche globale s'applique aussi bien à la conception des nouvelles stations qu'à l'agrandissement ou à la modernisation des anciennes.

Les procédés de potabilisation de l'eau peuvent se classer, selon leur fonction :

- Prétraitement.
- Clarification.
- Désinfection/oxydation

1.2. Les particules existantes dans l'eau :

Les composés retrouvés dans l'eau sont généralement regroupés dans trois catégories : les matières en suspension, les matières colloïdales et les matières dissoutes (voir figure1).

- Les matières en suspension sont d'origine minérale ou organique. Leur temps requis pour décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes, plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité. Les matières colloïdales sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1micron. Leur vitesse de décantation est faible.
- Les matières colloïdales d'origine minérale ont une densité faible peuvent nécessiter théoriquement jusqu'à 666000années pour décanter de un mètre. [DES_97].
- Les matières dissoutes, quant à elles, sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre, elles décantent donc encore plus lentement.

Tableau 1 : Nature et origine des particules

Forme	Nature et origine
Solides en suspension	Débris de roches, sable, argiles, débris végétaux et animaux
Matières en émulsion	Hydrocarbures, corps gras
Matières colloïdales	Argiles, silice, composés organiques plus ou moins dégradés
Matières organiques dissoutes	Végétaux et animaux décomposés, matières de synthèse, pesticides
Matières minérales dissoutes	Roches solubilisées, rejets industriels et agricoles, gaz de l'air
Gaz dissous	CO2 de décomposition des végétaux, pollution atmosphérique
Organismes vivants du règne végétal ou animal	Vers, larves, insectes, algues, planctons, champignons, moisissures, bactéries, virus

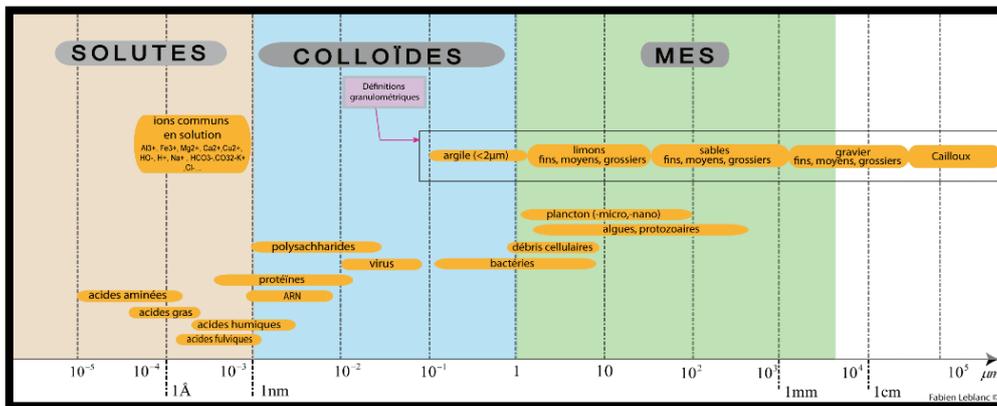


Figure 1 : Classification des particules suivant le diamètre

1.3. Les critères de potabilité :

Pour être consommée, l'eau doit répondre à des critères de qualité très stricts fixés par le ministère de la santé. Les critères d'une eau "propre à la consommation" portent sur :

- * **La qualité microbiologique** : L'eau ne doit contenir ni parasite, ni virus, ni bactérie pathogène.
- * **La qualité chimique** : Les substances chimiques autres que les sels minéraux font l'objet de normes très sévères. Ces substances sont dites "indésirables " ou " toxiques".
- * **La qualité physique et gustative** : L'eau doit être limpide, claire, aérée et ne doit présenter ni saveur ni odeur désagréable.
- * **Les substances "indésirables"** : Leur présence est tolérée tant qu'elle reste inférieure à un certain seuil (le fluor et les nitrates par exemple).

* **Les substances aux effets toxiques** : Le plomb et le chrome en font partie. Les teneurs tolérées sont extrêmement faibles.

* **Les eaux adoucies ou déminéralisées** : Les eaux traitées par un adoucisseur d'eau doivent contenir une teneur minimale en calcium ou en magnésium, de même qu'en carbonate ou en bicarbonate.

1.4. Traitement de l'eau :

L'objectif du traitement est d'assurer à la population la distribution d'une eau potable d'une bonne qualité hygiénique, les procédés de traitement nécessaires à la transformation de l'eau brute en une eau potable doivent répondre à des normes de qualités recommandées par des organismes tels que l'OMS.

Tableau 2 : Les normes de l'eau potable fixées par l'OMS

Elément/ substance	Symbole/ formule	Concentration	Lignes directrices fixées par l'OMS
Aluminium	Al		0,2 mg/l
Ammonium	NH ₄ ⁺	< 0,2 mg/l	Pas de contraintes
Arsenic	As		0,01 mg/l
Amiante			Pas de valeur guide
Chlore	Cl		Pas de valeur mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/l
Chrome	Cr ⁺³ , Cr ⁺⁶	< 2 µg/l	chrome total : 0,05 mg/l
Couleur			Pas de valeur guide
Cuivre	Cu ²⁺		2 mg/l
oxygène dissous	O ₂		Pas de valeur guide
Fluorure	F ⁻	< 1,5 mg/l	1,5 mg/l
Dureté	mg/l CaCO ₃		200 ppm
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S		0.05 à 1 mg/L
Fer	Fe	0,5 - 50 mg/l	Pas de valeur guide
Plomb	Pb		0,01 mg/l
Manganèse	Mn		0,4 mg/l
Mercure	Hg	< 0,5 µg/l	inorganique : 0,006 mg/l
Nickel	Ni	< 0,02 mg/l	0,07 mg/l
Nitrate et nitrite	NO ₃ , NO ₂		50 et 3 mg/l (exposition à court terme) 0.2 mg/l (exposition à long terme)
Turbidité			Non mentionnée
pH			un optimum entre 6.5 et 9.5
Sodium	Na	< 20 mg/l	Pas de valeur guide
Sulfate	SO ₄		500 mg/l
TDS			optimum en dessous de 1000 mg/l
Uranium	U		0.015 mg/l
Zinc	Zn		3 mg/l

1.5. Les procédés de traitement :

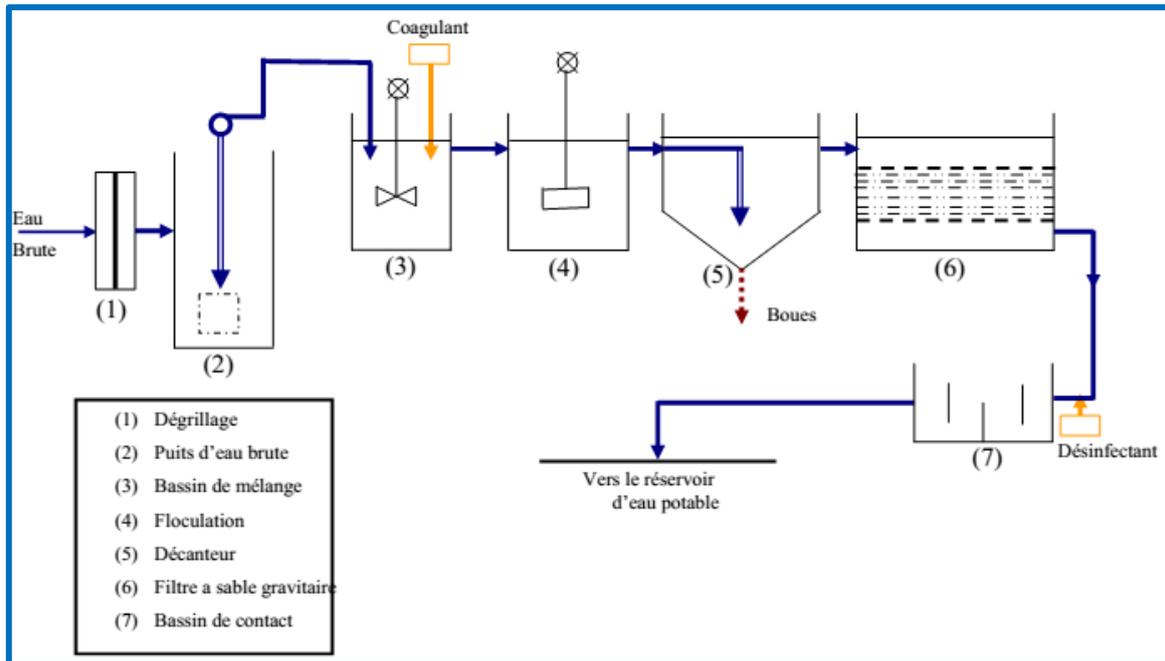


Figure 2 : Schéma classique d'une station de potabilisation des eaux de surface. [DES_97]

1.5.1. Prétraitement :

Une eau, avant d'être traitée, doit être débarrassée de la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs. Pour cela, on effectue des prétraitements de l'eau de surface. Dans le cas d'une eau potable, le prétraitement est principalement de deux types :

- physique : le dégrillage, le tamisage.
- chimique : préoxydation.

1.5.1.1. Le dégrillage :

C'est le premier poste de traitement qui 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 (corps flottants et gros déchets tel que des branchages et des cailloux et même des animaux aquatiques ... etc.), qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution.

L'installation de dégrillage se compose : d'un canal, de la grille du dégrilleur et d'une benne pour les déchets. L'espacement entre les barreaux des grilles est soit plus de 3 cm (dégrillage grossier) ou de moins de 3 cm (fin).



Figure 3 : Schéma d'un dégrilleur

1.5.1.2. Le tamisage :

Le but de ce dispositif est de piéger les particules solides charriées par les eaux et les matières en suspension de granulométrie comprise entre 200 et 500 μm : sables, graviers, feuilles ou de morceaux de plastique etc. brièvement il permet d'éliminer des objets plus fins que ceux éliminés par le dégrillage.



Figure 4 : Tambours filtrants (pour tamisage et micro-tamisage)

1.5.2. Préoxydation :

C'est un procédé chimique qui utilise le chlore (ou l'hypochlorite de sodium), l'ozone, le dioxyde de chlore ou le permanganate de potassium pour l'élimination du fer et du manganèse (notamment pour les eaux souterraines), de la couleur, les matières organiques et les micro-organismes (algues, plancton et bactéries) (essentiellement pour les eaux superficielles).

La quantité de désinfectant est déterminée à l'aide de différentes méthodes expérimentales les plus employées sont des méthodes dites « tests chlore » et « break point ».

1.5.3. Clarification :

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les matières en suspension *MES* (minérales et organiques) d'une eau brute ainsi que les matières organiques dissoutes, suivant les concentrations de l'un et de l'autre des différents polluants, on peut être

amené à pratiquer des opérations de plus en plus complexes qui vont de la simple filtration avec ou sans réactif jusqu'à la coagulation – floculation – décantation ou flottation – filtration.

La clarification comprend les opérations suivantes :

- Coagulation-floculation
- Décantation-flottation
- Filtration

1.5.3.1. Coagulation- Floculation :

La coagulation et la floculation se définissent par : le processus comportant en premier lieu, la déstabilisation d'une suspension colloïdale et en second lieu, l'agrégation des particules en petits amas, ou flocons, sous agitation et sous l'action du mouvement brownien (processus de grossissement et d'uniformisation des flocons) sous l'influence d'un brassage modéré en ajoutant un produit chimique nommé « coagulant », le plus souvent des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer. Ils sont cités dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer

Sels d'aluminium et Formule chimique	Sels de fer Formule Chimique
Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$	Chlorure ferrique $FeCl_3$
Chlorure d'aluminium $(AlCl_3)$	Chlorosulfate ferrique $Fe(SO_4)Cl$
Aluminate de sodium $NaAlO_2$	Sulfate ferreux $FeSO_4$

❖ Aides-coagulants (adjuvant de floculation) :

L'utilisation d'un seul coagulant ne permet pas, dans tous les cas, d'obtenir une bonne coagulation-floculation. L'utilisation d'un aide-coagulant permet d'améliorer les performances. Les adjuvants les plus utilisés sont la silice activée et les polyélectrolytes. Ils agissent par adsorption et pontage entre les particules.

❖ Paramètres affectant la coagulation :

La température, pH et de l'alcalinité, la dose du coagulant, la concentration des particules colloïdales, la présence d'anions et cations, l'intensité du mélange et le potentiel Zêta, turbidité seront détaillés dans le chapitre suivant.

1.5.3.2. Décantation-flottation :

Ces procédés sont des méthodes de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en flocs, après l'étape de coagulation-floculation. Si la densité de ces flocs est supérieure à celle de l'eau, il y a décantation. L'eau clarifiée située près de la surface

est dirigée vers des filtres à sable. Dans le cas de particules de densité inférieure à celle de l'eau, le procédé de flottation doit être appliqué.

L'efficacité de la flottation et de la décantation peut être évaluée par le pourcentage de boues retenues, la quantité de matières organiques éliminées et par la mesure de la turbidité.

1.5.3.3. Filtration :

La filtration est un procédé destiné à clarifier un liquide qui contient des *MES* en le faisant passer à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire [CAR_99]. Elle permet une élimination correcte des *MES* non éliminées dans le décanteur, de la couleur et de la turbidité et indirectement, certains goûts et odeurs.

Tout filtre est composé de trois parties : on retrouve le fond, le gravier support et le matériau filtrant. Son lavage est réalisé en inversant le sens d'écoulement de l'eau. C'est pourquoi cette opération est souvent appelée : rétrolavage. Le temps pendant lequel on maintient un filtrant clair (eau filtrée) est proportionnel à cette « hauteur de couche ». Le lavage est une opération très importante : lorsqu'il est insuffisant, il entraîne rapidement le colmatage permanent de certaines zones, ne laissant à l'eau qu'un passage réduit ; la perte de charge s'accroît alors plus vite, la filtration devient localement plus rapide et moins efficace.

Pour laver le matériau filtrant, on le soumet à un courant d'eau, circulant de bas en haut est réparti uniformément sur toute la surface du fond du filtre. Ce courant d'eau est destiné à détacher les impuretés (pour ce faire, le matériau doit recevoir une énergie suffisante) puis à les entraîner dans une goulotte d'évacuation.

Pour le traitement des eaux potables, on utilise principalement :

- Des filtres à sable lents ($2.5 \text{ à } 20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$).
- Des filtres à sable rapide.
- Des filtres sous pression (support des pressions de l'ordre de 1000 KPa).
- Des filtres à terre diatomée (on utilisant des algues brunes unicellulaires, microscopiques).

1.5.4. Affinage :

L'affinage se fait en milieu fermé pour préserver l'eau clarifiée de toute altération afin d'éliminer les matières organiques et de certains micropolluants. Il améliore les qualités organoleptiques de l'eau (saveur, odeur, limpidité) par :

- L'adsorption (phénomène par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces) sur charbon actif : les charbons actifs sont capables de fixer les composés organiques dissous qui ont échappé aux traitements physico-chimiques ainsi que certains micropolluants (hydrocarbures, pesticides, métaux lourds...). On les obtient

par traitement spécial de charbons naturels (anthracite, tourbe) ou de végétaux (bois, noix de coco) ;

- Le stripping : pour extraire les gaz dissous dans l'eau, on applique un contre-courant de gaz d'entraînement. Le stripping retient les composés volatils (benzène, trihalométhane, composés soufrés responsables d'odeurs.

L'opération est possible grâce à différents systèmes d'affinage tels que :

- L'adsorption sur charbon actif;
- L'ozonation et filtration biologique;
- La nano filtration (NF).

1.5.5. Désinfection :

La désinfection est l'étape ultime du traitement de l'eau. Elle est indispensable car elle permet d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes de l'eau.

La désinfection comporte deux étapes aux effets différents :

- l'effet germicide, c'est-à-dire la destruction de germe.
- l'effet rémanent qui garantit la qualité bactériologique en ajoutant des petites quantités de chlore dans l'eau produite pour éviter un développement bactérien plus en aval, dans le réseau d'eau.

Elle est possible grâce à différents systèmes de désinfection tels que :

- la chloration
- Le dioxyde de chlore
- L'ozonation
- le rayonnement UV

Le choix du procédé de désinfection doit être parfaitement adapté aux exigences afin de garantir une sécurité maximale de désinfection, tout en réduisant au maximum les risques liés aux sous-produits de désinfection. En outre, les dispositions législatives locales, n'autorisant parfois que l'utilisation de certains désinfectants dans le traitement de l'eau potable, doivent être respectées.

Tableau 4 : Aperçu des méthodes de désinfection de l'eau potable

	Chlore	ClO₂	Ozone	UV
Puissance de désinfection	moyenne	forte	la plus forte	moyenne
Action rémanente	heures	jours	Minutes	aucune
Relation avec le pH	extrême	aucune	Moyenne	aucune
Sous-produits de désinfection	THM, AOX	chlorite	évt. Bromate	évt. nitrite
Investissement	faible-élevé	moyen	moyen-élevé	moyen
Entretien	moyen	moyen	Faible	faible

1.6. Conclusion :

L'eau potable est une eau qui est apte à être consommée par l'être humain, cette dernière peut contenir des substances polluantes, c'est pourquoi, elle a besoin d'être protégée, traitée et économisée.

Au cours de ce chapitre, nous pouvons conclure des catégories sont définies, pour s'assurer que la matière première de l'eau potable est de qualité suffisante et nous avons décrit brièvement les étapes conventionnelles de potabilisation d'une eau de surface dans une station de traitement. Parmi les procédés de traitement exposés, la coagulation-floculation paraît comme une étape de clarification très importante ; elle vise essentiellement à éliminer les MES mais aussi divers polluants minéraux et organiques par ajout d'un réactif coagulant souvent accompagné par des adjuvants chimiques. La chloration, pratiquée en prétraitement ou en désinfection est un procédé qui est également largement utilisé et a un impact important sur la qualité de l'eau et la réactivité de la matière organique aquatique.

2.1. Introduction :

Dans une filière classique de traitement de l'eau potable, on a recours à un procédé de coagulation-floculation-décantation (CFD) afin d'éliminer les particules très petites dites colloïdales. Ces particules peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Elles sont responsables de la turbidité et de la couleur d'une eau.

Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. Le mot coagulation vient du latin "coagulare" qui signifie « agglomérer » [MAS_99]. 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.

Il reste à instaurer un régime hydraulique qui permet à ces floes, très légers, de se déposer dans un ouvrage d'où l'on pourra les évacuer facilement, c'est le rôle de la décantation. Le contrôle de cette opération est donc essentiel pour trois raisons :

- ↳ La maîtrise de la qualité de l'eau traitée en sortie (diminution de la turbidité).
- ↳ Le contrôle du coagulant résiduel en sortie (réglementation de plus en plus stricte de la présence du coagulant résiduel dans l'eau traitée).
- ↳ La diminution des contraintes et des coûts de fonctionnement (coûts des réactifs et des interventions humaines).

2.2. Généralités sur les particules colloïdales :

L'origine des colloïdes est très diverse. On peut citer l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricoles. Dans une eau de surface, les colloïdes portent des charges négatives situées à leur surface, comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus faciles à éliminer. Ces charges négatives attirent les ions positifs en solution dans l'eau. Ceux-ci sont étroitement collés au colloïde et forment la couche liée ou de Stern (théorie émise en 1879 par Holmoltz et développé ensuite par plusieurs chercheurs dont Huckel, Stern et Gouy), qui attire à son tour des anions accompagnés d'une faible quantité des cations : c'est la couche diffuse ou de Gouy (théorie de Gouy-Chapman). Il y a donc formation d'une double couche ionique, l'une accompagnant la particule lors de ses déplacements, l'autre se déplaçant indépendamment ou avec un certain retard.

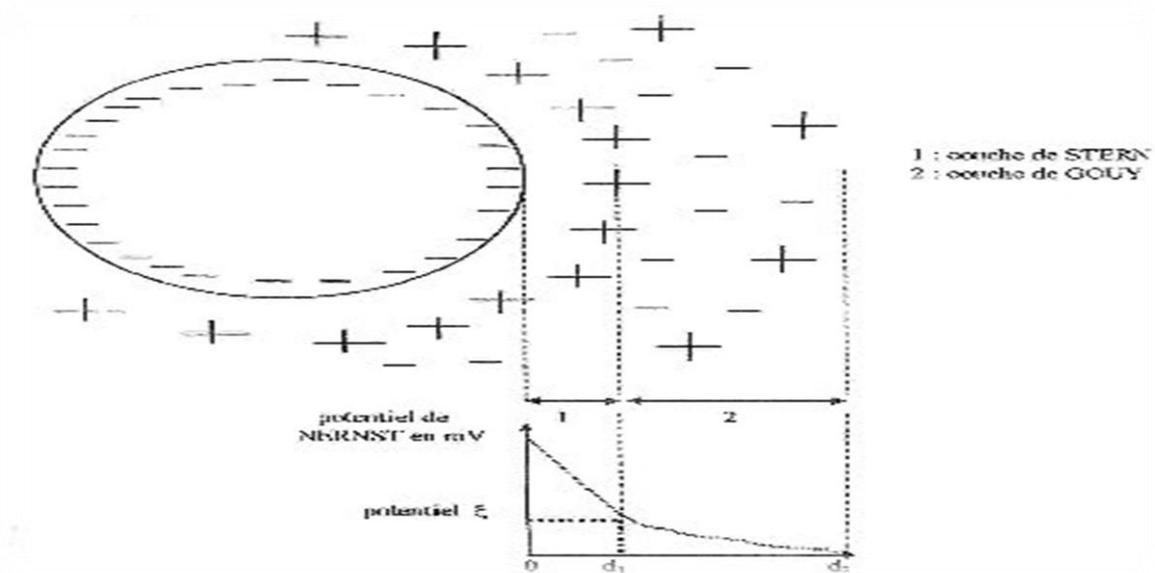


Figure 5 : Stabilité d'une suspension colloïdale

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

Pour annuler le potentiel zêta, on peut :

- ↪ ajuster le pH pour atteindre le point de charge nulle des particules colloïdales
- ↪ augmenter la salinité pour comprimer la couche diffuse
- ↪ neutraliser la charge de surface par des cations polyvalents
- ↪ piéger les colloïdes dans des précipités
- ↪ adsorber les colloïdes sur des polymères chargés à longue chaîne.

Vue les quantités à traiter, les deux premières possibilités ne sont pas applicables au niveau industriel. La coagulation chimique, est donc la meilleure solution.

Tableau 5 : Temps de décantation des différentes particules (d'après la loi de Stokes)

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

2.3. Phénomène de coagulation :

2.3.1. La coagulation :

La coagulation est l'une des étapes les plus importantes dans le traitement des eaux de surface, 90% des usines de production d'eau potable sont concernées. La difficulté principale est de déterminer la quantité optimale de réactif à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire la neutralisation de leurs charges négatives et facilite leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion de produits chimiques nommés coagulants. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on pourra facilement éliminer par décantation. Pour permettre l'adhésion des particules, il faut donc vaincre la barrière énergétique de répulsion :

- soit en augmentant l'énergie cinétique des particules : il faudrait augmenter l'agitation des particules par élévation de température, ce qui est impossible pour les volumes d'eau à traiter.
- soit en abaissant la barrière de répulsion : il faut annuler les forces de répulsion électrostatiques, donc le potentiel zêta.

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

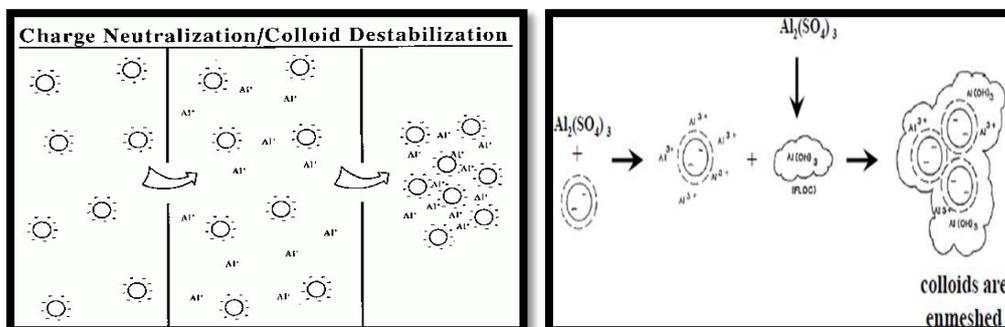


Figure 6 : Explication schématique d'une chaîne « coagulation-floculation »

2.3.2. Les coagulants utilisés :

Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau. Ils sont surtout des composés minéraux (cités dans le tableau 6).

Tableau 6 : Les différents types de coagulant

Nom	Formule	Phase	prix (dollars/tonne)	quantité (g/m ³)	Remarques
Sulfate d'Aluminium	Al ₂ (SO ₄) ₃ , 18 H ₂ O	Solide	260 à 305	10 à 150 pour les eaux de surface 50 à 300 pour les eaux résiduaires	obtention d'une eau de très faible turbidité poudre irritante, corrode les métaux ferreux
Aluminate de Sodium	NaAlO ₂			5 à 50 pour les eaux de surface	irritant pour les yeux et les muqueuses corrode les métaux ferreux
Chlorure Ferrique	FeCl ₃ , 6 H ₂ O	Solide	300 à 350	5 à 150 pour les eaux de surface 50 à 300 pour les eaux résiduaires	pour les eaux chargées en matière organique réactif acide, oxydant corrosif, dissolution exothermique
Sulfate Ferrique	Fe(SO ₄) ₃ , 9 H ₂ O	Solide		10 à 250 pour les eaux de surface	oxydant corrosif produit tachant
Sulfate Ferreux	FeSO ₄ , 7 H ₂ O	Solide	150	5 à 150 pour les eaux de surface 100 à 400 pour les eaux résiduaires	corrode les métaux ferreux, produit tachant conservation à T > 10°C

2.3.2.1. Choix du coagulant :

Les coagulants doivent répondre à plusieurs impératifs. Ils doivent être :

- Peu coûteux.
- Inoffensifs (eux-mêmes et tous leurs sous-produits de décomposition).
- Permettre, par eux-mêmes ou leurs sous-produits, une coagulation efficace.
- Permettre, par eux-mêmes ou leur sous-produit, une floculation efficace.

Peu de produits répondent à la fois à toutes ces conditions.

2.3.2.2. Facteurs influençant la coagulation :

Influence du pH

Les floes sont des précipités d'hydroxyde de métaux. Leur formation et leur stabilité dépendent donc du pH. Il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est en fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité.

Les zones de prédominance des hydroxydes de fer et d'aluminium sont présentées sur le tableau suivant :

Tableau 7 : Choix du coagulant

Forme prédominante	Ph
Al(OH) ₃	5,8 à 7,2
Fe(OH) ₃	5,5 à 8,3

Influence des sels dissous

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

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

Influence de la température de l'eau

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité ; c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc.

Influence du coagulant

Le choix du coagulant peut influencer sur la coagulation. Ainsi, même L'alun est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimale plus large que celle due à l'alun. De plus, pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais.

Influence du mélange

Au cours de la coagulation et de la floculation, on procède au mélange des produits chimiques en deux étapes.

- la première étape : le mélange est énergique et de courte durée (2 à 3 minutes) : c'est le mélange rapide. Ce mélange a pour but principal de disperser les produits dans la totalité du volume d'eau à traiter. On effectue un mélange rapide en injectant les produits chimiques dans une zone de forte turbulence ou en utilisant des équipements de mélange mécanique. Un mélange rapide inadéquat entraîne en général un accroissement de la quantité de produits chimiques nécessaires.
- la deuxième étape : le mélange est lent et il a pour but de favoriser les contacts entre les particules de floc, de turbidité et de couleur. Cependant, le mélange doit être suffisamment énergique pour engendrer des différences de vitesse de l'eau dans le bassin, mais pas trop. En effet, si tel est le cas, les forces de cisaillement qui s'exercent

sur les particules de floc risquent de briser ce dernier, même si la durée du mélange dans un bassin de floculation peut n'être que de 10 min (elle varie en général de 30 à 60 min).

Influence de la turbidité

La turbidité des eaux de surface est en grande partie due à la présence des particules de glaise, il s'agit donc là de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement. La coagulation de ces particules est assez facile à réaliser lorsqu'on maintient le pH dans sa plage optimale. On peut faire par ailleurs les constatations générales suivantes :

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

2.4. Phénomène de floculation :

La floculation, étape suivante dans le processus de clarification de l'eau, consiste en deux phénomènes de transport successifs :

- la floculation péri cinétique. N'intervenant que sur les particules colloïdales, elle favorise la formation du micro floc. Elle est liée à la diffusion brownienne, c'est-à-dire à l'agitation thermique. Le mouvement brownien correspond au déplacement désordonné des colloïdes par le bombardement de chaque molécule d'eau.

- la floculation ortho cinétique. Elle permet d'obtenir le floc volumineux séparable. Elle est liée à l'énergie dissipée.

La vitesse d'agitation agit sur la probabilité de rencontre des particules. Mais, il n'est pas possible de l'augmenter exagérément. En effet, si elle est trop élevée, les floes formés subissent un cisaillement mécanique entraînant leur destruction et ils se reforment rarement eux-mêmes. La floculation est donc favorisée par une vitesse d'agitation assez faible qui amène doucement les floes à se réunir.

2.4.1. Les adjuvants de floculation :

La floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif supplémentaire appelé floeculant en quantité sensiblement plus faible que le réactif coagulant.

On utilise :

- ↳ des polymères minéraux tels que la silice activée (SiO_2), 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), sont les premiers à avoir été utilisés.
- ↳ 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.

2.4.2. Cinétique de la floculation :

Le phénomène de floculation est décrit par la théorie de Smoluchowski dont les hypothèses sont les suivantes :

- régime permanent
- mélange parfait
- pas d'attrition, ni de fragmentation
- chaque collision conduit à une agrégation.

2.5. Mécanisme de la coagulation-floculation :

On peut considérer qu'il existe quatre grands mécanismes qui agissent individuellement ou ensemble dans la coagulation floculation.

- ↳ Réduction de l'épaisseur de la couche ionique : transportée par les particules, par augmentation de la force ionique de la solution.
- ↳ Neutralisation des charges ioniques : par ajout d'un réactif chimique contenant des contre ions du colloïde.
- ↳ Pontage entre les particules : par utilisation des polymères de haut poids moléculaire.

- ↳ Piégeage des particules : par formation de polymères d'hydroxydes minéraux volumineux.



Figure 7 : Le procédé de Coagulation / Flocculation

❖ **Avantages de la Coagulation-flocculation :**

- Très économique.
- Particulièrement efficace.
- Dimensions des installations réduites.
- Les rendements sont excellents sur les matières en suspension et bons sur les matières oxydables.
- Exploitation très facile.
- Mise en service et arrêt instantané.
- Peu de mécanique et électricité.

2.6. La décantation :

La décantation est la méthode de séparation la plus fréquente des MES et des colloïdes (rassemblés sous forme de floccs après une étape de coagulation flocculation). Il est bien connu que les particules en suspension sédimentent en fonction de leur taille par les forces gravitaires, pour qu'il puisse y avoir séparation effective faut-il encore que les forces de gravité soient suffisamment élevées par rapport aux effets antagonistes : effet de frottement, champ de turbulence, répulsion électrostatique courant de convection, etc. ... donc pour obtenir une bonne décantation, il est nécessaire d'augmenter le diamètre des particules d'où l'utilité impérieuse du phénomène de coagulation-flocculation [DEG_89]. La technique de décantation a évolué depuis les décanteurs statiques (circulaires ou rectangulaires, raclés ou non raclés avec des fonds inclinés de 45° à 60° pour permettre l'évacuation continue ou intermittente des boues au point le plus bas...) jusqu'aux appareils modernes qui possèdent

une zone de réaction où l'on met en contact l'eau brute et ses réactifs avec les boues déjà existantes : on trouve là les appareils à circulation des boues et les appareils à lits de boues.

2.6.1. Types de décantation :

Selon la concentration en solide et la nature des particules (densité et forme) on distingue 4 types de décantation :

Type 1 : décantation de particules discrètes

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

Type 2 : Décantation des particules floculantes

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

Type 3 : Décantation freinée (en piston)

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

Type 4 : Décantation en compression de boue

Les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures, dans cette zone le phénomène de consolidation est relativement lent, on retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues par gravité.

2.7. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous pouvons conclure que la coagulation-floculation-décantation est l'étape la plus importante dans la chaîne de production d'eau potable, mais assurer le bon fonctionnement il faut respecter diverses conditions et les facteurs tel que le PH, la température, la dose du coagulant au niveau de la coagulation, l'ajout du bon adjuvant pour accélérer la floculation jusqu'à l'évacuation de ces floes au niveau des décanteurs.

3.1. Introduction :

Au cours des deux dernières décennies, nous avons pu constater un développement fulgurant des réseaux de neurones qui sont apparus lors des recherches sur l'intelligence artificielle, avec pour but de répliquer la tolérance à la faute et la "faculté d'apprendre" que l'on rencontre dans les systèmes biologiques de neurones, en modélisant la structure intrinsèque du cerveau. Nous expliquons ici, à partir de principes simples, ce que sont réellement les réseaux de neurones, et nous délimitons leurs domaines d'excellence.

3.2. Généralités sur le neurone :

Le développement des connaissances de la structure interne du cerveau, et la compréhension d'une partie de son fonctionnement a contribué de façon remarquable à l'émergence des réseaux de neurones artificiels.

3.2.1. Le modèle neurophysiologique :

Le cerveau est en réalité constitué d'un très grand nombre de *neurones* (de l'ordre de cent milliards), étroitement connectés entre eux par plusieurs milliers d'interconnexions pour chaque neurone. Chaque neurone est une cellule spécialisée, capable de créer, envoyer et recevoir des signaux électrochimiques. On peut le décomposer en trois régions principales:

Le corps cellulaire :

Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale de quelques microns de diamètre ; a un noyau qui contient des informations sur les caractéristiques héréditaires, et un plasma qui contient le matériel moléculaire utilisée pour produire le matériau nécessaire par le neurone.

Les dendrites :

Ce sont de fines extensions tubulaires qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence. Les signaux envoyés au neurone sont captés par les dendrites. Sa surface totale de réception des dendrites d'un neurone typique est environ 0.25 mm.

L'axone:

C'est le long de l'axone que les signaux partent du neurone. Contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité ou il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres. La jonction entre deux neurones, et généralement entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre neurone est appelée : synapse.

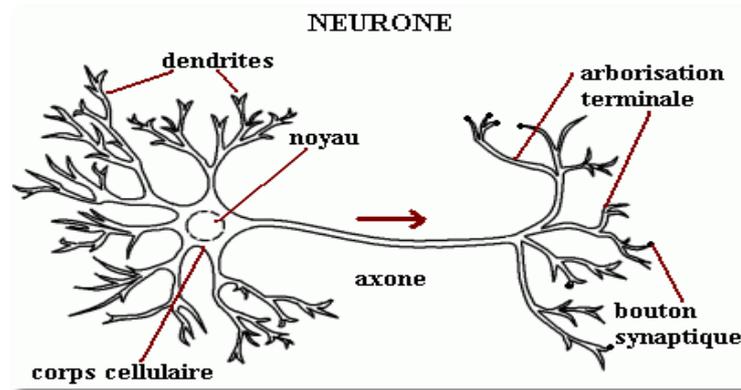


Figure 8 : Schématisation d'un neurone biologique.

Lorsqu'un neurone est activé, il envoie un signal électrochimique au travers de l'axone. Cette impulsion traverse les synapses vers des milliers d'autres neurones, qui peuvent à leur tour, envoyer et donc propager le signal à l'ensemble du système neuronal (c'est-à-dire, le cerveau biologique) [CLA_92]. Un neurone ne va émettre une impulsion que si le signal transmis au corps cellulaire par les dendrites dépasse un certain seuil appelé seuil de déclenchement.

3.2.2. Le neurone formel :

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend des paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie". Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure 9.

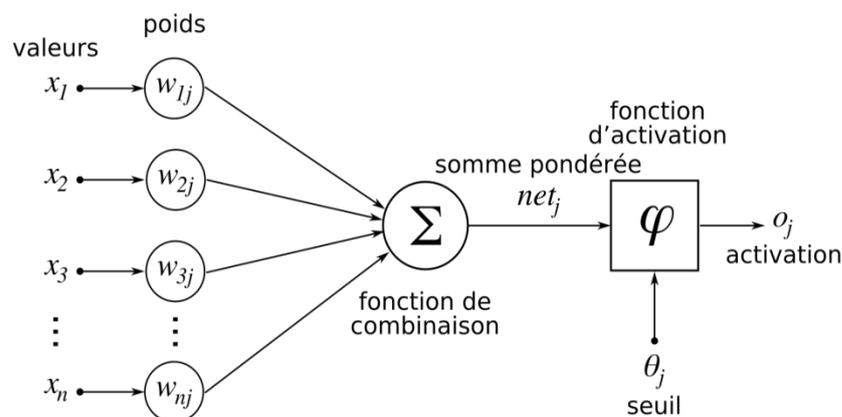


Figure 9 : Schématisation d'un neurone formel

Le neurone reçoit des signaux en provenance de différentes sources. Ces sources proviennent généralement des données sont appelées les variables d'entrée x , ou plus simplement les entrées (peuvent être: Booléennes, Binaires (0, 1) ou bipolaires (-1, 1) et Réelles). Les entrées arrivent au neurone par l'intermédiaire d'une connexion avec une certaine force, connue sous le nom de *poids*. L'importance d'un poids est représentée par une valeur. Plus la valeur d'un poids w est importante, plus l'intensité du signal entrant est forte, et donc, plus l'entrée correspondante est influente.

Lors de la réception des signaux, une somme pondérée des entrées est calculée pour constituer la fonction d'activation f (ou fonction de seuillage ou de transfert) du neurone. L'activation du neurone est une fonction mathématique qui convertit la somme pondérée des signaux afin de produire la *sortie* du neurone. Les différents types des fonctions sont cités ci-dessous:

Tableau 8 : les fonctions d'activation [KOU_08]

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
linéaire	$a = n$	
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$	
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
compétitive	$a = 1$ si n maximum $a = 0$ autrement	

La sortie d'un neurone est en réalité la prévision du modèle à un seul neurone pour une variable du jeu de données, et que nous appelons la cible : (Binaire (0, 1) ou bipolaire (-1, 1) et Réelle ...etc). Nous considérons qu'il existe une relation entre les entrées x et les cibles t , et c'est au réseau de neurones que revient la tâche de modéliser cette relation en reliant les entrées aux cibles par une fonction mathématique adaptée qui peut être prise sur la base d'exemples issus du fichier de données.

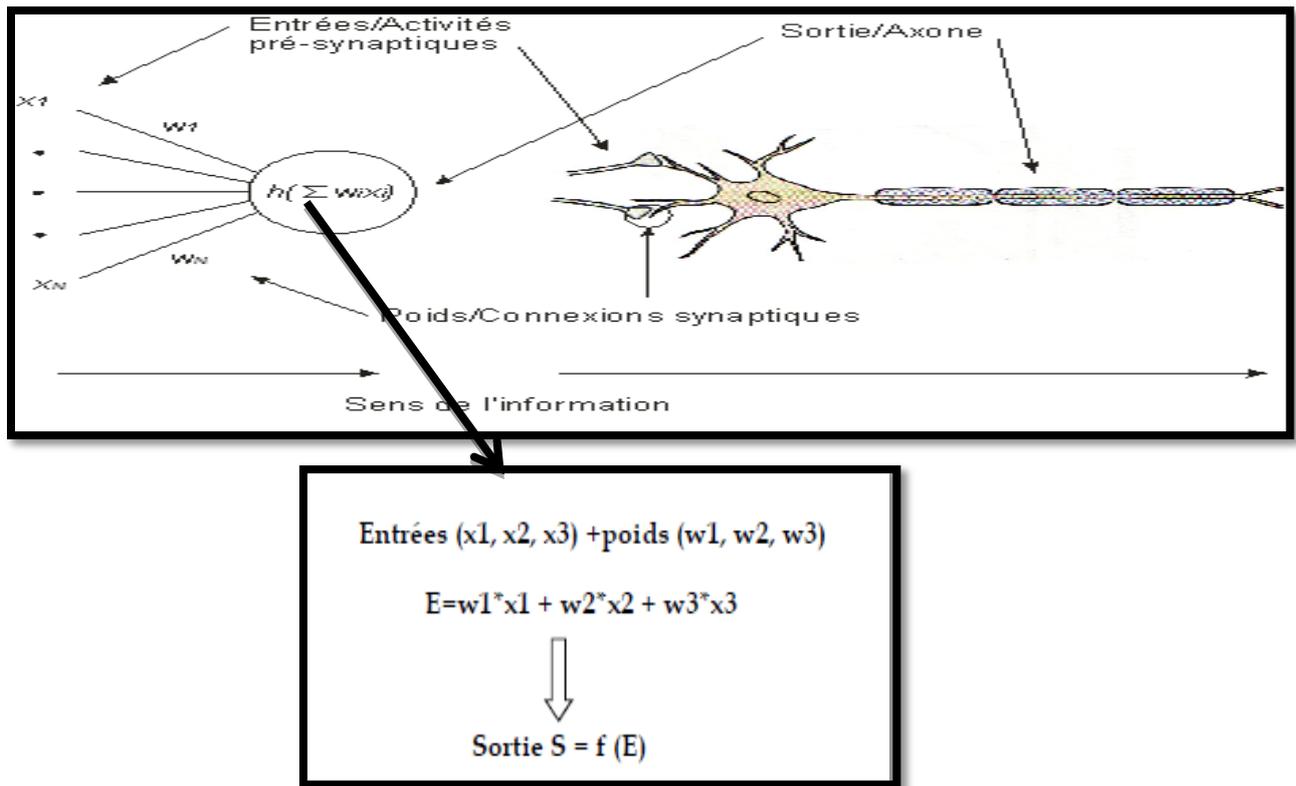


Figure 10 : Mise en correspondance d'un neurone biologique / neurone artificiel

3.3. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) :

3.3.1. Définition :

Les modèles de réseau de neurones artificiels sont des fonctions d'approximations universelles entre les valeurs prédites et les valeurs observées utilisées pour schématiser une fonction non linéaire entre les vecteurs d'entrées et les vecteurs de sorties qui ont une relation inconnue donc difficile à adapter durant la phase d'apprentissage sans les hypothèses prioritaires sur les données d'origine.

3.3.2. Historique des recherches sur les réseaux de neurones :

Les premiers à proposer un modèle sont deux biophysiciens de Chicago, Mc Culloch et Pitts, qui inventent en 1943 le premier neurone formel qui portera leurs noms (neurone de Mc Culloch-Pitts). [CLA_92]

Quelques années plus tard, en 1949, Hebb propose une formulation du mécanisme d'apprentissage, sous la forme d'une règle de modification des connexions synaptiques (règle de Hebb). Cette règle, basée sur des données biologiques, modélise le fait que si des neurones, de part et d'autre d'une synapse, sont activés de façon synchrone et répétée, la force de la connexion synaptique va s'accroître.

Le premier réseau de neurones artificiels apparaît en 1958, grâce aux travaux de Rosenblatt qui conçoit le fameux Perceptron [MAR_04]. Le Perceptron est inspiré du système visuel (en terme d'architecture neurobiologique) et possède une couche de neurones d'entrée ("perceptive") ainsi qu'une couche de neurones de sortie ("décisionnelle"). Ce réseau parvient à apprendre à identifier des formes simples et à calculer certaines fonctions logiques. Il constitue donc le premier système artificiel présentant une faculté jusque là réservée aux êtres vivants : la capacité d'apprendre par l'expérience.

Malgré tout l'enthousiasme que soulève le travail de Rosenblatt dans le début des années 60, la fin de cette décennie sera marquée en 1969, par une critique violente du Perceptron par Minsky et Papert. Ils montrent dans un livre (« Perceptrons ») toutes les limites de ce modèle, et soulèvent particulièrement l'incapacité du Perceptron à résoudre les problèmes non linéairement séparables. Il s'en suivra alors, face à la déception, une période noire d'une quinzaine d'années dans le domaine des réseaux de neurones artificiels.

Il faudra attendre le début des années 80 et le génie de Hopfield pour que l'intérêt pour ce domaine soit de nouveau présent. En effet, Hopfield démontre en 1982 tout l'intérêt d'utiliser des réseaux récurrents (dits "feed-back") pour la compréhension et la modélisation des différents processus. Les réseaux récurrents constituent alors la deuxième grande classe de réseaux de neurones, avec les réseaux type perceptron (dits "feed-forward").

En parallèle des travaux de Hopfield, Werbos conçoit son algorithme de rétropropagation de l'erreur, qui offre un mécanisme d'apprentissage pour les réseaux multicouches de type Perceptron (appelés MLP pour Multi-layer Perceptron), fournissant ainsi un moyen simple d'entraîner les neurones des couches cachées. Cet algorithme de "back-propagation" ne sera pourtant popularisé qu'en 1986 par Rumelhart.

3.3.3. Quelques types de réseaux de neurones :

3.3.3.1. Les réseaux monocouches :

A- Le perceptron :

Le perceptron, le premier type de réseau proposé et encore très largement utilisé, c'est une couche de neurone ou les poids et les biais peuvent être formés pour produire un vecteur cible (TARGET) correct c'est-à-dire plus proche de l'output.

B- Adaline et Madaline :

Introduit par Widrow et M. Hoff en 1960, le modèle d'Adaline (Adaptive Linear Element) a la même architecture que le perceptron. Une couche d'entrée est connectée à une plusieurs sorties. Dans ce dernier cas, il est appelé Madaline (Multiple Adaptive Linear Element). La différence entre ce réseau et le perceptron est que l'Adaline est une extension du

Perceptron (simple), est qu'il est destiné à l'approximation des fonctions. Sa sortie est linéaire, l'idée est de remplacer la fonction seuil sur les neurones de sortie par la fonction identité ($f(x)=x$). L'avantage de cette approche est de ne plus être restreinte à une réponse binaire, et d'offrir tout l'éventail de valeurs possibles.

3.3.3.2. Les réseaux multicouches :

Les réseaux multicouches sont constitués de plusieurs couches disposées l'une après l'autre. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales et chaque unité d'entrée est suivie par une succession de couches cachées et chaque unité d'une couche donnée reçoit son entrée à partir de la couche précédente seulement. La fonction d'activation utilisée dans ce type de réseau est généralement de type sigmoïde, ce qui les donne un caractère non linéaire. On distingue généralement deux types : le perceptron multicouche (**MPL**) et les réseaux à fonction de base radiale (**RBF**).

A. le perceptron multicouche (MPL) :

La famille de réseau majoritairement employé, A lui seul ce type recouvre plus de 95% des applications scientifiques et industrielles. MLP ont d'abord été introduits pour résoudre des problèmes complexes de classification. Mais en raison de leur propriété d'approximation universelle [HOR_90] ils ont été rapidement utilisés comme modèles de régression non linéaire, et ensuite pour la modélisation des séries temporelles et la prévision.

Lors de la conception de PMC il est important de bien spécifier le nombre de couches cachées ainsi le nombre d'unités dans ces couches [BIS_95] mais il est également important de bien choisir la fonction d'activation et les méthodes d'apprentissage.

B. Fonction à base de radial RBF :

Le type de réseau le plus utilisé après le PMC, L'architecture est la même que pour les PMC cependant, les fonctions de base utilisées ici sont des fonctions Gaussiennes.

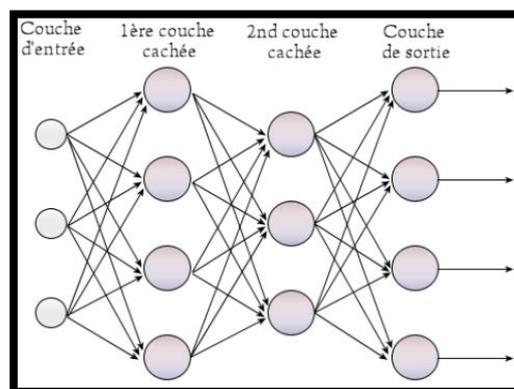


Figure 11 : Schéma d'un réseau multicouche.

3.4. Structure d'interconnexion :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité :

A- Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale.

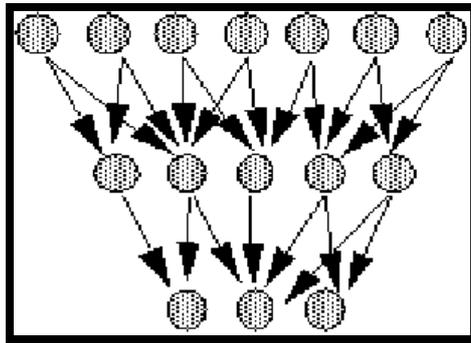


Figure 12 : Réseau à connexions locales

B- Réseau à connexions récurrentes :

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

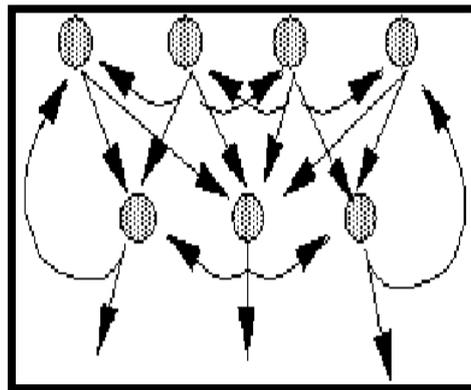


Figure 13 : Réseau à connexions récurrentes

C- Réseau à connexion complète :

C'est la structure d'interconnexion la plus générale. Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même)

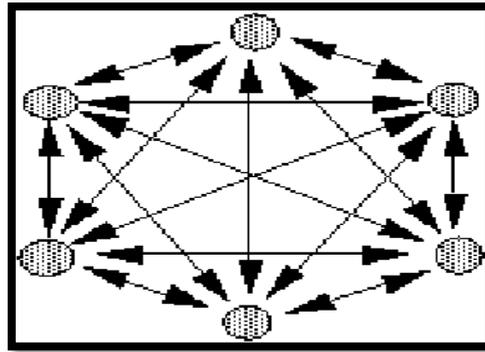


Figure 14 : Réseau à connexions complète

3.5. Architecture de réseaux de neurones

Selon la topologie de connexion des neurones, on peut les classer en deux grandes catégories:

- réseaux statique
- réseaux dynamique ou récurrents

3.5.1. Les réseaux statiques (non bouclé ou "FEED-FORWARD") :

L'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière c.-à-d. dans un sens unique. Ce type de réseaux est utilisé pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire, de la classification ou de la modélisation de processus statiques non linéaires.

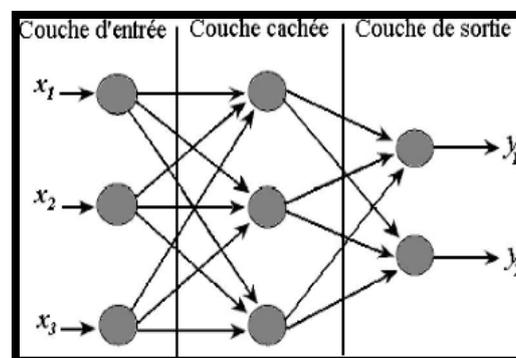


Figure 15 : Le réseau statique

3.5.2. Les réseaux dynamiques ou récurrents (bouclés ou Feed-Back)

On parle de réseau de neurones récurrent lorsqu'il existe une boucle au moins dans l'ensemble des connexions. Il y a alors au minimum un retour d'information d'une couche sur la précédente. La figure 16 présente un exemple très simple : un neurone de la couche de sortie renvoie sa sortie sur la couche d'entrée avec un délai. Cela permet d'utiliser une des sorties à l'instant (t) comme entrée à l'instant ($t + 1$). Les réseaux récurrents sont souvent utilisés pour la modélisation et la prévision des systèmes dynamiques.

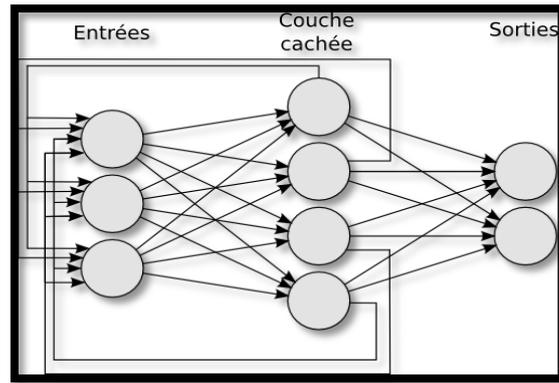


Figure 16 : Le réseau récurrent ou dynamique

3.6. Les différentes procédures et les lois d'apprentissage d'un réseau de neurones :

3.6.1. Les différentes procédures d'apprentissage :

L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimuli qu'il reçoit de son environnement. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètre surviennent. L'apprentissage se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre.

A. Apprentissage supervisé (prédictif) :

L'apprentissage supervisé est le type d'apprentissage le plus utilisé. C'est un ensemble d'entrées et de sorties adéquates sont utilisées pour former le réseau. Le réseau produit ensuite ses propres sorties. Ces sorties sont comparées avec les sorties correctes et la différence (erreur) est utilisée pour modifier le poids. Ce type est utilisé dans notre travail en raison de la nature des données disponibles.

B. Apprentissage non supervisé (exploratoire) :

L'apprentissage auto-organisation est l'endroit où un réseau développe ses propres règles de Classification par l'extraction d'informations à partir des entrées présentées au réseau. C'est à dire on ne fournit pas au réseau les sorties que l'on désire obtenir. On le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise.

C. L'apprentissage Par Renforcement :

Est un cas particulier de l'apprentissage supervisé où il n'existe pas d'ensemble des entrées et sorties adéquates. Le réseau est juste dit si une sortie produite est « bon » ou « mauvais », selon un critère défini.

D. Le mode hybride :

Le mode hybride reprend en fait les deux approches supervisée et non supervisée, que une partie des poids va être déterminée par apprentissage supervisé et l'autre partie par

apprentissage non-supervisé.

3.6.2. Les lois d'apprentissage d'un réseau de neurones :

A. La loi de Hebb :

Si deux unités connectées, sont activées simultanément, le poids de leur connexion est augmenté. Le poids à l' instant (t+1) est donné par la formule :

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \mu A_i A_j$$

$W_{ij}(t)$: le poids de la connexion entre le neurone J et le neurone I à l' instant t ;

$W_{ij}(t+1)$: le poids de la connexion entre le neurone J et le neurone I à l' instant t+1 ;

μ : est un paramètre d'intensité d'apprentissage ;

A_i : stimulus d'activation du neurone I ;

A_j : stimulus d'activation du neurone J.

B. La loi de Widrow-Hoff :

C'est une règle d'apprentissage qui permet d'ajuster les poids d'un réseau de neurones pour diminuer à chaque étape l'erreur commise par le réseau de neurones (à condition que le facteur d'apprentissage soit bien choisi). Un poids est modifié en utilisant la formule suivante:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \alpha \delta_k x_k$$

Où : $W_{ij}(t)$ est le poids à l'instant t ;

$W_{ij}(t)$ le poids à l'instant t+1 ;

α est le facteur d'apprentissage ;

δ_k caractérise la différence entre la sortie attendue et la sortie effective du neurone à l'instant t;

x_k la valeur de l'entrée avec laquelle le poids w est associé à l'instant t.

3.7. Mise en œuvre des modèles de réseaux de neurones :

Pour réaliser un modèle de réseaux de neurones, trois étapes successives sont nécessaires :

- Déterminer les entrées pertinentes, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- Collecter les données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurone, et choisir l'architecture du réseau, c'est-à-dire le nombre de neurones de la couche cachée. Le réseau ne doit être ni trop souple, ni trop rigide.
- Les poids sont calculés en minimisant l'erreur d'approximation sur les données de l'ensemble d'apprentissage, de telle manière que le réseau réalise la tâche désirée.

Enfin, la qualité du réseau obtenu est estimée à partir d'exemples ne faisant pas partie de l'ensemble d'apprentissage.

3.8. Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones [TAR_98]. :

3.8.1. Les avantages :

Un des intérêts majeurs des réseaux de neurones artificiels (informatiques) est qu'ils sont organisés sous la forme d'une structure massivement parallèle. De plus, ils sont caractérisés par les capacités positives suivantes (similaires à ceux des réseaux de neurones biologiques) :

- ✓ Capacité à généraliser, à savoir la carte entrées semblables aux sorties similaires : les réseaux de neurones sont capables d'interpoler à partir d'une expérience d'apprentissage précédent. Avec une conception soignée, un RNA peut être formé pour donner la bonne réponse à des données qu'il n'a pas préalablement rencontrées.
- ✓ Possibilité de cartographier les fonctions linéaires et non-linéaires : la cartographie non linéaire donne souvent au RNA l'avantage de traiter les problèmes complexes du monde réel.
- ✓ Robuste en présence de bruit (Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données).
- ✓ Capacité multi variables.
- ✓ Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données.
- ✓ Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.
- ✓ Dans le cas d'un problème de classification un réseau de neurones ne se contente pas de faire un choix : il fournit aussi un niveau de confiance sur sa décision. Cela permet de rejeter des motifs ambigus et d'avoir une idée sur la précision du résultat.
- ✓ Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en mathématiques, informatique statistique requise.

3.8.2. Les inconvénients :

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s).
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids sont inintelligibles pour l'utilisateur.

3.9. Applications :

Se trouvant à l'intersection de différents domaines (informatique, électronique, science cognitive, neurobiologie et même philosophie), l'étude des réseaux de neurones est une voie prometteuse de l'Intelligence Artificielle, qui a des applications dans de nombreux domaines:

- ↳ Industrie : contrôle qualité, diagnostic de panne, corrélations entre les données fournies par différents capteurs, analyse de signature ou d'écriture manuscrite.
- ↳ Finance : prévision et modélisation du marché (cours de monnaies...), sélection d'investissements, attribution de crédits.
- ↳ Télécommunications et informatique : analyse du signal, élimination du bruit, reconnaissance de formes (bruits, images, paroles), compression de données.
- ↳ Environnement : évaluation des risques, analyse chimique, prévisions et modélisation météorologiques, gestion des ressources...

3.10. Conclusion :

Les réseaux de neurones offrent une approche prometteuse pour différents problèmes scientifiques comme l'identification des systèmes non linéaires.

Résumons donc les points fondamentaux qu'il convient toujours de garder à l'esprit lorsque l'on cherche à mettre en œuvre des réseaux de neurones :

- les réseaux de neurones sont des outils *statistiques*, qui permettent d'ajuster des fonctions non linéaires très générales à des ensembles de points.
- comme toute méthode statistique, l'utilisation de réseaux de neurones nécessite que l'on dispose de données suffisamment nombreuses et représentatives.
- les réseaux de neurones sont des approximateurs limités.
- les réseaux de neurones permettent de modéliser des phénomènes statiques (réseaux non bouclés) et dynamiques (réseaux bouclés).
- il est toujours souhaitable, et souvent possible, d'utiliser, pour la conception du réseau, les connaissances mathématiques dont on dispose sur le phénomène à modéliser : les réseaux de neurones ne sont pas nécessairement des "boîtes noires".

4.1. Introduction :

La station de traitement concernée par cette étude, est celle de production d'eau potable d'Ain Dalia, wilaya de Souk-Ahras. Au cours de ce chapitre, nous essayons de faire une brève description sur laquelle avec les différents procédés de traitement.

La station est située sur la commune de Hennancha, en rive de l'oued Medjerda à 7,5 km environ de la ville de Souk-Ahras, l'accès se fait par une route communale (CW 19 A) menant vers Sedrata. Selon les informations recueillies, elle a été construite en 1990 par une association d'entreprises (groupement Algéro-Belge) et a été mise en service janvier 1996 (figure 17). Elle possède une capacité nominale de traitement de 1200 l/sec (4320 m³/h). L'enceinte abritant le site est de forme polygonale, elle totalise une superficie de 6 ha. L'eau circule gravitairement vers les différents ouvrages.



Figure 17 : Vue de haut de la station de traitement de l'eau potable ; Ain Dalia wilaya de Souk-Ahras

Cette station est alimentée par le barrage d'Ain Dalia (figure 18) qui a été mis en service le 1er mars 1988. Il possède une capacité théorique de 78 millions de m³. Il est situé à l'extrême Est Algérien, à une dizaine de kilomètre au sud de la ville de Souk-Ahras, destiné à alimenter les différentes communes de la wilaya de Souk-Ahras, ainsi qu'une partie de la ville de Tébessa (Ouenza et El-Ouinet) et Oum El Bouagui. Il est formé d'une digue en terre avec un noyau central en argile et une hauteur de 47 m.



Figure 18 : Barrage d'Ain Dalia

4.2. Les ouvrages de la station :

La superficie des constructions bâties sur le site recouvre une surface de 9730 m²:

- ✓ Ouvrage d'arrivée –Flash Mixer 130 m²
- ✓ Deux décanteurs –Floculateurs (2*1673m²)=3 346 m²
- ✓ Une chambre d'évacuation des boues 24 m²
- ✓ Un bâtiment de réactifs 744 m²
- ✓ Un bâtiment de commande des filtres(HS) 1621 m²
- ✓ Une station de pompage pour lavage des filtres 123 m²
- ✓ Un bâtiment de chloration (HS) 184 m²
- ✓ Chambre de comptage 28,8 m²
- ✓ Deux réservoirs d'eau traitée, semi-enterrés de capacité 2*5000 m³=2116m²
- ✓ Une station de pompage avec 5 GEP 796 m²
- ✓ Un bâtiment administratif et laboratoire 288 m²
- ✓ Voirie, piste intérieures et parkings 3000 m²
- ✓ Protection réalisée en gabions 198 m²
- ✓ Une plate-forme de l'ancienne station monobloc 720 m² Guérites 70 m²

4.3. Les procédés de traitement :

La chaîne de traitement des eaux arrivant du barrage est constituée par les étapes de traitement suivantes :

- Prétraitement (pré-chloration).
- Coagulation-floculation
- Filtration sur sable
- Stockage puis distribution

4.3.1. La phase de prétraitement :

L'eau arrive à la station par une conduite en acier de diamètre $D=1200\text{mm}$ (figure 19), ensuite par une conduite de 900 mm de diamètre jusqu'au bassin où on injecte l'hypochlorite de sodium pour la pré-chloration (sans passer par un tamisage).



Figure 19 : La conduite d'arrivée d'eau brute

4.3.2. La phase de coagulation :

C'est la sulfate d'alumine qui est injectée par des chicanes aux deux ouvrages de mélanges rapides (Flash mixer) dont les caractéristiques sont présentés dans le tableau 9. Cet ouvrage de béton est composé de deux compartiments identiques qui disposent chacun d'un agitateur rapide permettant le mélange des réactifs (Figure 20).

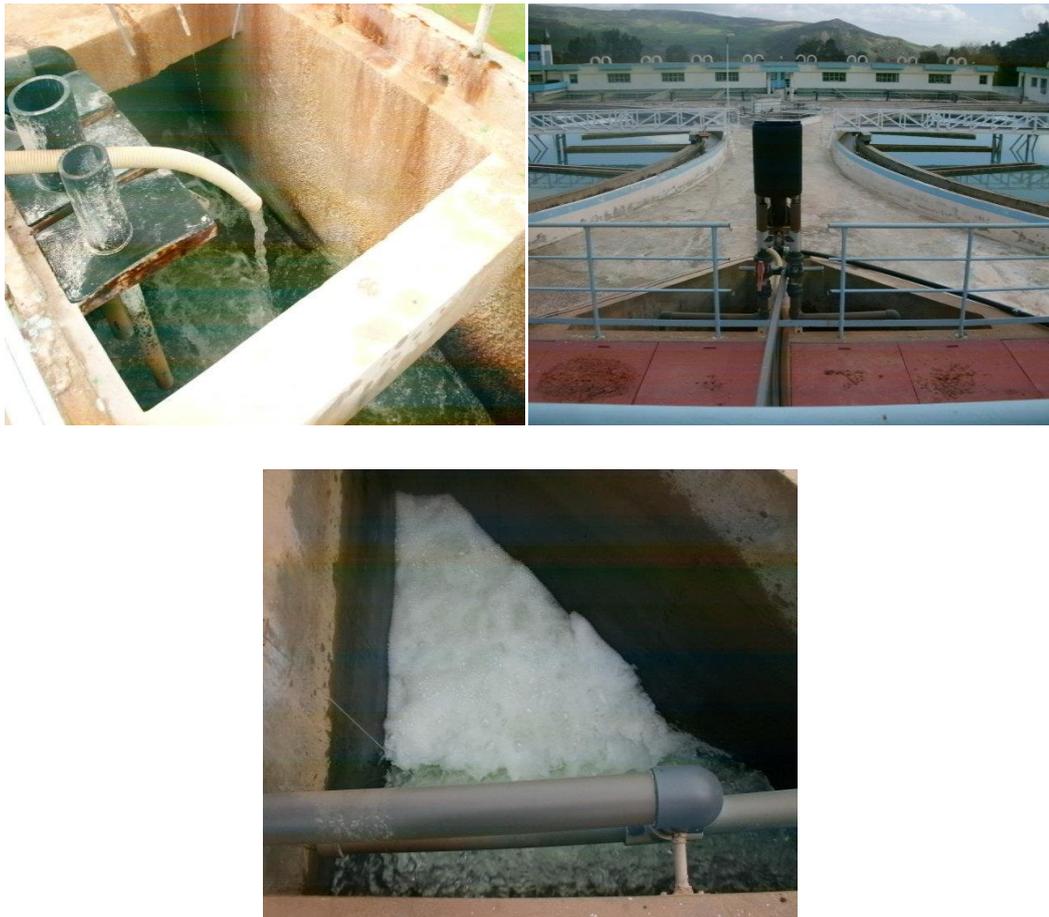


Figure 20 : Flash mixer

Ensuite parvient l'injection ponctuelle du polymère (poly électrolyte anionique) {0,1 à 0, 2 g/m³} (Figure 20).

Tableau 9 : les caractéristiques du coagulateur (Flash mixer)

Forme de cuve	parallélépipède
Nombre	2
Débit unitaire	2160 m ³ /h
Dimensions (L*I*H)	internes 6*4*3.5 m
Hauteur d'eau	3m
Volume mélange	96 m ³
Temps de contact	2.5 mn

4.3.3. La phase de décantation -floculation :

Les deux décanteurs –floculateurs ont une structure en béton armé de coupe cylindro-conique renversée (Figure 21), dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 10. L'alimentation est assurée par une conduite de 700mm (deux conduites).

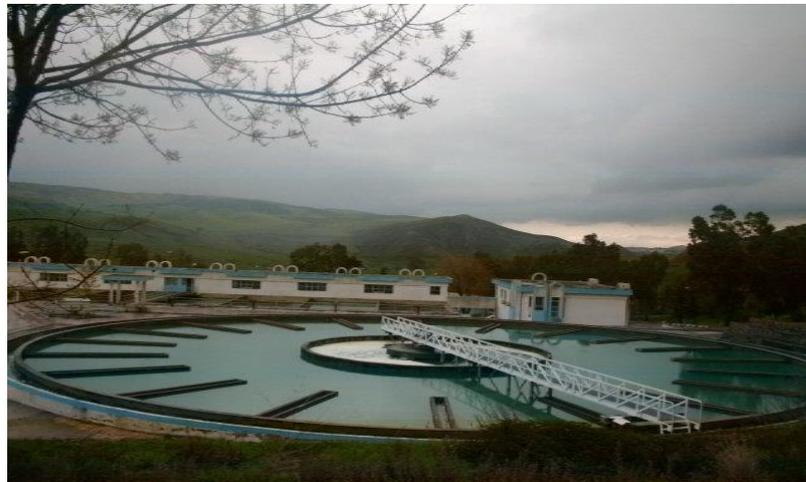


Figure 21 : Le décanteur-floculateur

Tableau 10 : Les caractéristiques des décanteurs-floculateurs

Nombre	2
Diamètre	43 m
Hauteur	7,4m
Dimensions des goulottes	1,1*1,1m
Cote d'implantation	664 m NGA
Débit unitaire (nominale)	2160 m ³ /h
Vitesse ascensionnelle calculé	1,63 m/h
Temps de floculation calculé	22 mn

Le regard de purge des boues (figure 22) contient l'ensemble des organes de vidange des décanteurs, son sol est souvent recouvert d'une fine couche de boue liquide évacuée d'une façon continue par une conduite de D=200mm, toutes les purges sont évacuées dans l'oued gravitairement par une canalisation de D=400 mm.



Figure 22: regard de purge des boues

4.3.4. La phase de filtration sur lit de sable :

Les 8 bassins reposent sur des supports en béton perforés et équipés de petites buses presque 200 (Figure 23) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11 : les caractéristiques des filtres

Nombre	8
Dimensions d'un filtre	18,9*6,2m
Hauteur du filtre	3,6m
Hauteur d'eau	2,9m
Hauteur de lit de sable	1 m
Nombre de lit par filtre	2
Epaisseur du sable (sable fin)	1 mm
Débit unitaire	540 m ³ /h
Vitesse de filtration	4,76 m/h



Figure 23 : bassin des filtres à sable

Les filtres à sable se colmatent au cours de la phase de production et lorsque la perte de charge devient trop élevée il est nécessaire de réaliser un lavage contre-courant (ce lavage est souvent associé à un lavage de surface (balayage) par de l'eau filtrée). Le lavage d'un filtre se fait en plusieurs phases :

- Détassage à l'air (45 à $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$)
- Ajout d'un courant d'eau (8 à $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$)
- Rinçage à l'eau seule :
 - ↳ $15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ s'il ya un balayage de surface à l'eau décantée.
 - ↳ $25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ en absence de balayage de surface.

Le lavage des filtres doit s'arrêter quand l'eau a une turbidité de 10 NTU .



Figure 24 : Le filtre au cours et après le lavage

4.3.5. Le stockage :

Il s'agit de deux réservoirs circulaires semi-enterrés à l'est et dans la partie basse du site (figure 25), alimentés par une conduite de 800 mm de diamètre dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 12.



Figure 25 : Réservoirs de stockage

Tableau 12 : les caractéristiques des réservoirs

Côte radier	655,2mNGA
Cote trop plein	660,2mNGA
Hauteur de remplissage	5 m
Diamètre intérieur des cuves	36 m
Epaisseur des murs cylindriques	0,35 m

4.3.6. Station de pompage :

Le bâtiment est réalisé en béton armé, il est composé d'une salle des GEP semi-enterrée et d'un rez de chaussée où sont installés les pupitres et les armoires électriques (figures 26 et 27). Parmi les 5 pompes qui se trouvent 3 pompes sont utilisées uniquement pour la distribution (les 2 autres restent comme réserve).



Figure 26 : La chambre de pompage

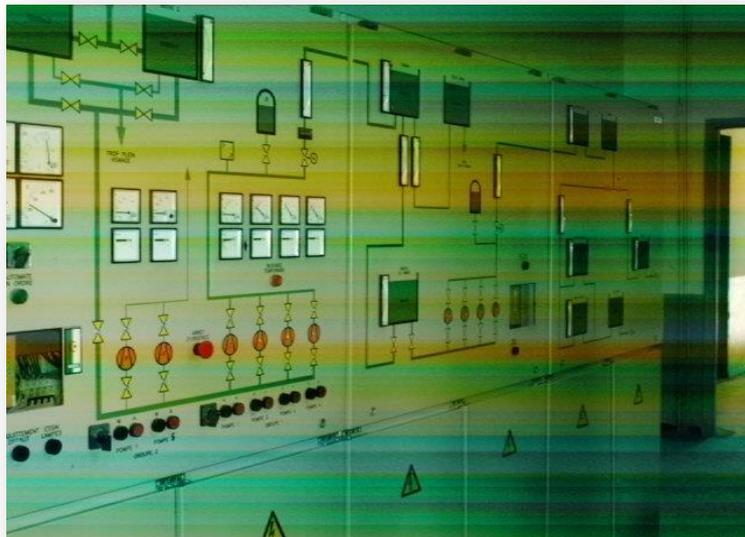


Figure 27 : Tableau synoptique

4.4. Méthode d'étude :

Pour la réalisation de cette étude, nous avons effectué plusieurs analyses pour différents échantillons durant le mois de mars (tableau 13).

Tableau 13 : Différents paramètres à analyser

Analyses	Paramètres effectués	Méthodes
physiques	pH, Température, Conductivité électrique, Turbidité	Appareils
	Chlore résiduel	Méthode de gélule de DBD1
	Ammonium	méthode spectrométrique manuelle
Chimiques	Dureté ($\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$)	M. titrimétrique à l'EDTA)
	Alcalinité, HCO_3^-	M. titrimétrique à Hcl
	Matières organiques	M. par oxydation KMnO_4
	Chlorures	M. titrimétrique à AgNO_3

Les protocoles et les appareils utilisés pour les analyses sont présentés en annexe.

4.4.1. Réactifs utilisées :

↳ Solution du coagulant :

Le réactif coagulant utilisé est le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ pour lequel une solution mère de 10 g/l est préparée périodiquement.

↳ Solution d'adjuvant :

Le réactif utilisé pour la floculation est le polyélectrolyte anionique pour une concentration de 0.2 g/l avec une agitation pendant 1 heure (plus ou moins en fonction de la température d'eau) jusqu'à l'obtention d'une solution.

4.4.2. Essai de coagulation-floculation (Jar test) :

Les essais de coagulation-floculation ont été conduits selon le protocole bien connu du « Jar-Test » sur un flocculateur à 6 agitateurs (Flocculateur SELECTA. 6 postes) avec une vitesse de rotation individuelle variant entre 0 et 200 tr/min. Cet appareil permet d'assurer une agitation rigoureusement identique pendant une même période ; dans une série de béchers contenant 1000 ml d'eau à examiner.

Les essais de floculation comportent trois phases :

- Une phase brève (3 min) d'agitation rapide (200 tr/min), pendant laquelle on procède à l'introduction du coagulant.

- Une phase longue (30 min) d'agitation lente (45 tr/min), pendant laquelle se produit la formation du floc.
- Une phase de décantation (30 min) durant laquelle le floc déstabilisé est entraîné vers le fond des béchers.

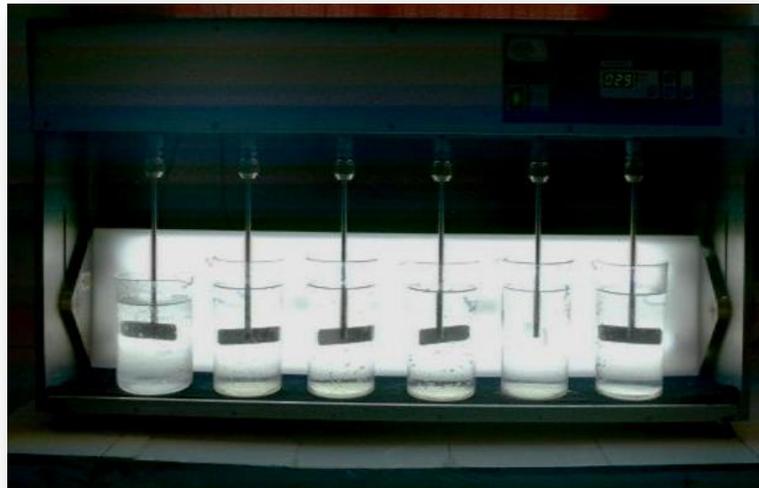


Figure 28 : Flocculateur de 6 agitateurs (Flocculateur SELECTA).

Mode opératoire :

Cette méthode a pour l'objectif de déterminer les doses optimales du coagulant et du polymère en utilisant le matériel suivant :

- ↪ un chronomètre
- ↪ fioles de diverses contenances (1 litre, 100 ml)
- ↪ un flocculateur de laboratoire avec six béchers de flocculation
- ↪ un siphon ($d \sim 0,5$ mm) recourbé vers le haut pour éviter l'aspiration des boues
- ↪ 7 béchers de 0,5 l pour récupérer les échantillons siphonnés
- ↪ des pipettes graduées
- ↪ un pH mètre
- ↪ un turbidimètre
- ↪ un spectrophotomètre
- ↪ un conductimètre
- ↪ une balance analytique

Prélever, à l'aide d'un siphon, 0,5 l dans chaque béccher en veillant à ne pas siphonner la surface de l'eau : Pour les eaux après floculation :

- Turbidité.
- pH après floculation.
- Température.
- Conductivité.
- Taux de la matière organique (au spectrophotomètre UV).

Et éventuellement :

- Alcalinité
- Réactif résiduel (par exemple Al total, chlore...)

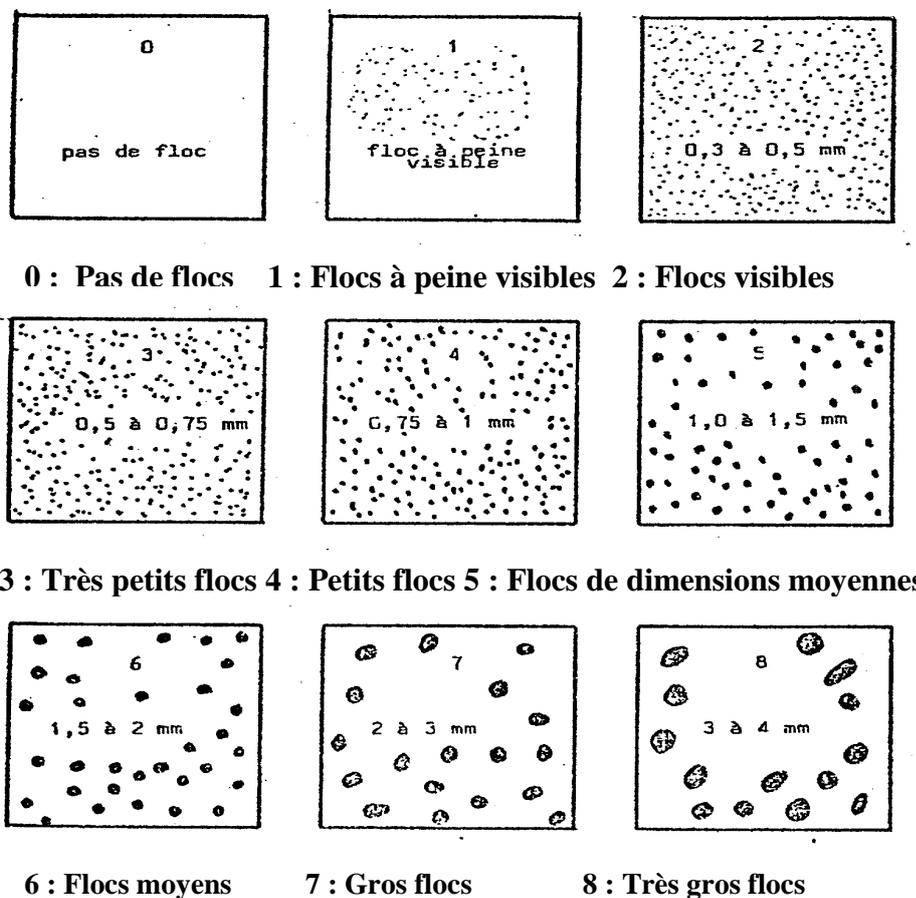


Figure 29 : Classement des floes

4.4.3. Description des données :

L'objectif de notre étude est d'estimer la dose du coagulant à injecter à l'eau au niveau de la station de production d'eau potable Ain Dalia en fonction des paramètres descripteurs de la qualité de l'eau brute. Notre connaissance du procédé est limitée à des données enregistrées pendant le mois de mars lors de notre stage au niveau de la station. Les valeurs moyennes de

la dose du coagulant sont généralement comprises entre 15, 20 et 22mg/l. Les données disponibles proviennent des résultats d'essais de jar-test réalisés quotidiennement. Plusieurs paramètres descripteurs de la qualité de l'eau brute sont mesurés. Nous disposons en continu de 9 paramètres descripteurs: température, PH, Matières organiques, Conductivité, Turbidité, Dureté, TAC, Ammonium, Bicarbonate. Les caractéristiques statistiques des variables retenues sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Résumé statique des variables descriptives de l'eau brute

	MIN	MAX	MOYENNE	ECART-TYPE
Température (°C)	7	12	9.5	2,34520788
pH	6.83	7,83	7,66772727	0,25591911
Turbidité (NTU)	6.5	22.55	15,1931818	5,30499171
Conductivité (µS/cm)	433	563	491,318182	29,7311547
Dureté (°F)	12	19	17	1,51185789
TAC (°F)	11	14	12,5454545	1,18431305
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	134	170	154,227273	13,3164124
MO (mg/l)	2	6,65	4,36363636	1,37279536
Ammonium (mg/l)	0,01	0.095	0,06104545	0,04714161

D'après les analyses effectuées, nous constatons que la qualité des eaux brutes est assez bonne mais elle n'est pas conforme aux normes du point de vue turbidité, la matière organique et la concentration d'ammonium, ce qui nécessite un traitement léger.

4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons d'abord décrit la station de production d'eau potable Ain Dalia ensuite la préparation des solutions nécessaires à nos essais, enfin la technique de Jar-test et les différents appareils et réactifs utilisés.

5.1. Introduction :

Au cours des deux dernières décennies, l'intérêt pour les réseaux de neurones s'est accentué. Cela a commencé par les succès rencontrés par cette puissante technique dans beaucoup de domaines, aussi variés que la finance, médecine, ingénierie, géologie et même physique.

Le succès radical des réseaux de neurones sur presque toutes les autres techniques statistiques peut être attribué à la puissance, polyvalence et facilité d'utilisation. Les réseaux de neurones sont des techniques de modélisation et de prévision très sophistiqués capable de modéliser des fonctions de modélisation et relations extrêmement complexes. Les réseaux de neurones offrent la possibilité de modéliser des données arbitraires d'entrées au moyen de l'ajustement des connexions internes au réseau, de sorte que pour une entrée donnée l'erreur de la différence entre la sortie du réseau et la réponse souhaitée est minimisée. Le processus de l'entraînement du réseau se fait au moyen d'un apprentissage supervisé.

L'objectif principal de ce chapitre est de trouver un modèle RNA peut prédire la dose du coagulant.

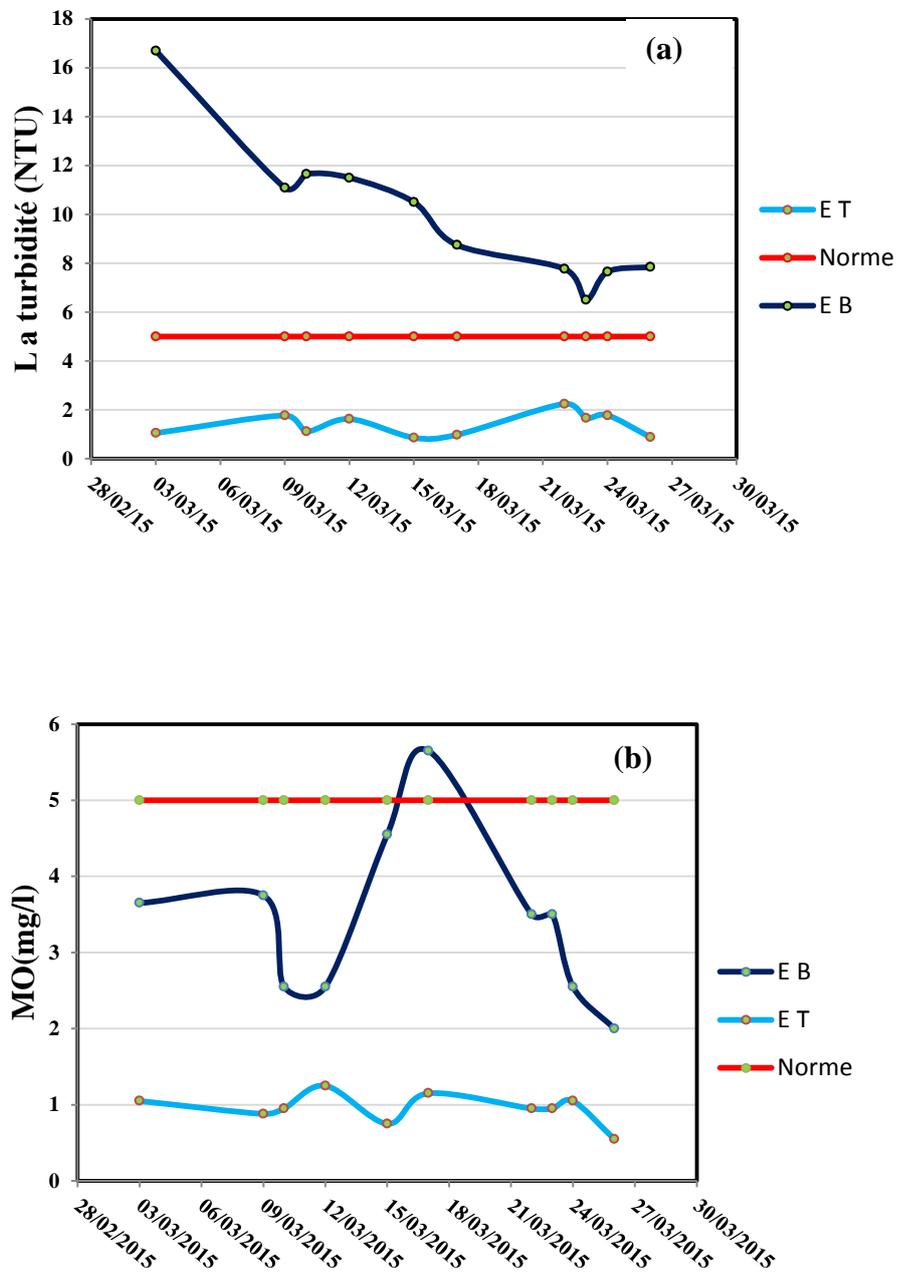
5.2. Analyse des résultats :

Dans le cadre de notre étude qu'il s'agit d'estimer le taux du coagulant à injecter dans l'eau en fonction des paramètres descriptifs. Notre connaissance du procédé est limitée à des données enregistrées en temps réel. Les données disponibles proviennent des résultats d'essais de jar-test réalisés quotidiennement. Nous disposons en continu 9 paramètres descriptifs : pH, température, conductivité, turbidité, la matière organique, la dureté, TAC, HCO_3^- , ammonium. Les données sont composées de 220 valeurs.

Tableau 15 : Résultats d'analyse de l'eau brute et traitée

La date	EAU BRUTE									EAU TRAITEE								
	T	pH	Turbidité	CE	TAC	TH	MO	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	T	pH	Turbidité	CE	TAC	TH	MO	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
03/03/2015	9	7.68	16.7	512	12	18	3.65	149	0.09	8	7.84	1.05	612	12	16	1.05	149	0.001
09/03/2015	10	7.72	11.09	509	13	18	3.75	149	0.09	9	7.68	1.77	625	14	18	0.88	185	0.001
10/03/2015	8	7.61	11.65	463	11	17	2.55	161	0.056	8	7.67	1.12	623	12	18	0.95	149	0.002
12/03/2015	8	6.83	11.5	556	13	18	2.55	136	0.036	8	6.78	1.63	584	14	19	1.25	185	0000
15/03/2015	10	7.73	10.5	563	13	18	4.55	161	0.045	11	7.71	0.86	588	14	16	0.75	185	0000
17/03/2015	11	7.74	8.75	473	13	18	5.65	161	0.075	9	7.63	0.98	579	13	17	1.15	161	0.001
22/03/2015	10	7.77	7.77	482	12	17	3.5	161	0.095	11	7.68	2.25	612	13	18	0.95	161	0.002
23/03/2015	12	6.97	6.5	433	11	17	3.5	149	0.04	10	7.56	1.67	608	14	19	0.95	185	0.005
24/03/2015	10	7.75	7.65	438	11	17	2.55	136	0.04	9	7.63	1.78	559	12	18	1.05	149	0.002
26/03/2015	12	7.62	7.85	483	11	17	2	136	0.036	10	7.68	0.88	587	13	17	0.55	161	0.002

L'évolution des différents paramètres de la qualité de l'eau mesurés au cours du temps (voir figure 30) :



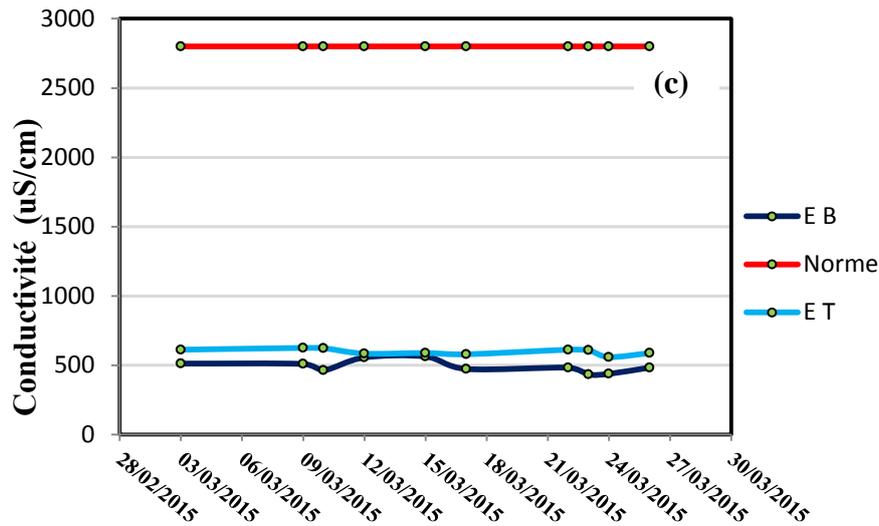


Figure 30 : Caractéristiques de l'eau brute et traitée ; (a) Turbidité, (b) Matière organique et (c) Conductivité.

La figure 30 représente les caractéristiques de l'eau brute et traitée utilisées pour l'apprentissage des données. Les données montrent que la qualité de l'eau brute est caractérisée par une turbidité variable de 6.5 à 16.7 NTU. Les valeurs de la matière organique mesurées dépassent parfois la norme qui est 5mg/l, atteint la valeur maximale 5.65 mg/l le 17/03/2015. On constate aussi que la conductivité est pratiquement stable.

En ce qui concerne les eaux traitées, on remarque que les valeurs de tous les paramètres analysés sont largement inférieures à la norme algérienne [JOU_11]. Cependant, les valeurs des différents paramètres ne présentent pas une forte variation notamment la turbidité et la conductivité, la qualité de l'eau ne nécessite que de faibles taux de coagulant (15 à 22 mg/l).

5.2.1. Construction du modèle RNA :

La principale difficulté de la construction d'un réseau de neurones est de déterminer la configuration qui optimise la modélisation. En effet, on ignore quelle configuration ? :

- ↪ de la fonction d'activation des neurones de la couche cachée
- ↪ fonction d'activation des neurones de la couche de sortie
- ↪ nombre de neurones dans la couche cachée
- ↪ fonction d'erreur
- ↪ type de réseau est optimale à notre problématique.

5.2.2. Apprentissage des Réseaux de Neurones :

Une fois que nous avons choisi l'architecture du réseau de neurones, c'est-à-dire le type de réseau de neurones, les fonctions d'activation, etc..., nous devons déterminer les autres paramètres ajustables du modèle que sont les poids qui permettent de connecter les entrées aux neurones cachées et les neurones cachés aux neurones de sortie. Le processus d'ajustement de ces paramètres de telle sorte que le réseau soit en mesure d'approcher la relation fonctionnelle sous-jacente entre les entrées x et les cibles t est connu sous le nom d'apprentissage. C'est au cours de ce processus que le réseau de neurones va apprendre à modéliser les données par des exemples. Bien qu'il existe différentes manières de réaliser l'apprentissage des réseaux de neurones, la plupart d'entre elles utilisent des algorithmes numériques qui sont en mesure d'effectuer la tâche au cours d'un nombre fini d'itérations. Nous avons recours à ces algorithmes itératifs essentiellement en raison de la nature fortement non-linéaire des modèles de réseau de neurones pour lesquels une solution en forme fermée n'est généralement pas disponible. Un algorithme d'apprentissage itératif va ajuster graduellement les poids du réseau de neurones de telle sorte que pour toute donnée d'entrée x , le réseau de neurones est en mesure de produire une sortie aussi proche que possible de la cible t .

La construction des modèles RNA (tableau 16) est basée sur une combinaison de paramètres d'entrée. Chaque paramètre de qualité étudié est modélisé par la concentration à la sortie de la station, qui servira de données cibles utilisées lors de la phase d'apprentissage et de validation du modèle RNA

Tableau 16 : Prédiction des analyses statistiques descriptives

	RBF 9-13-1	RBF 9-7-1	MLP 9-10-1	RBF 9-9-1	RBF 9-8-1
Min prédiction (apprentissage)	14,58	14,52	14,13	14,67	14,54
Max prédiction (apprentissage)	22,10	19,84	22,60	20,26	20,22
Min prédiction (test)	15,83	15,99	14,05	16,06	15,95
Max prédiction (test)	16,51	16,65	18,91	16,55	16,47
Min prédiction (validation)	15,85	16,16	17,79	15,45	15,32
Max prédiction (validation)	15,85	16,16	17,79	15,45	15,32

5.2.3. Paramètres de validation des modèles :

La validation permet de juger l'aptitude du modèle à reproduire les variables modélisées. Plusieurs critères ont été choisis. Dans notre cas, nous nous sommes basés sur le coefficient de détermination (R^2), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

5.2.3.1. Coefficient de corrélation (R^2) :

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})(Y_{i\text{cal}} - \bar{Y}_{\text{cal}})}{\sigma_{\text{obs}} \cdot \sigma_{\text{cal}}} \right]^2 \quad (1)$$

Avec :

$Y_{i\text{obs}}$ et $Y_{i\text{cal}}$ correspondent respectivement aux valeurs observées et calculées par le modèle de la dose du coagulant pour la journée i ;

\bar{Y}_{obs} et \bar{Y}_{cal} sont les moyennes des valeurs observées et calculées par le modèle ;

σ_{obs} et σ_{cal} les écarts-types des valeurs observées et calculées.

5.2.3.2. Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

La fonction d'erreur permet d'évaluer la performance d'un réseau de neurones au cours de l'apprentissage.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{cal}})^2}{N}} \quad (2)$$

N : représente le nombre de valeurs utilisées. Le modèle est bien optimisé si la valeur du RMSE est proche de zéro.

5.3. Prédiction du taux du coagulant du procédé de traitement :

Dans cette étude, nous avons utilisé un réseau de neurone avec plusieurs couches cachées, différentes fonctions d'activations, avec un nombre variable de neurones, pour chaque modèle testé nous avons varié le nombre de neurones de 1 à 100. La meilleure topologie pour chaque type de modèle à été retenu, la couche de sortie contient un seul neurone avec les différentes fonctions de transfert. Les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle qui inclut les neuf variables descriptives qui sont (température, PH, turbidité et la matière organique...etc). Le modèle donne de très bons résultats.

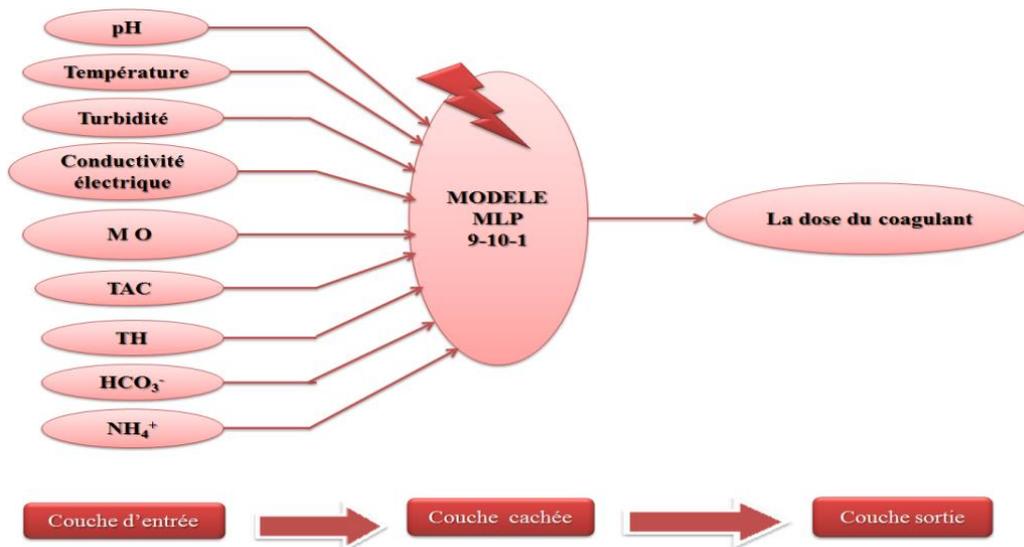


Figure 31 : Schéma général du modèle

5.4. Validation du modèle :

Les performances de la prédiction de la dose du coagulant sont présentées dans le tableau 17. Pour la comparaison des performances des différentes variantes testées, nous avons utilisé deux critères numériques cités précédemment : le coefficient de corrélation (R^2) et la Racine Carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE), calculés respectivement par les deux formules (1) et (2). Les variantes consistent à faire introduire progressivement (une par une) les variables normalisées tout en calculant à chaque fois les critères de qualité.

Rappelons, entre autres, que la racine de la moyenne des erreurs quadratiques (RMSE) décrit la différence moyenne entre les valeurs prédites (simulées) et les valeurs observées, alors que le coefficient de détermination R^2 est une mesure du taux d'explication de la réalité phénoménale par le modèle adopté (tableau 17).

Tableau 17 : Performances de la prédiction de la dose du coagulant par les modèles RNA

Net.name	Trainin g perf. 1*	Test perf 2*	Validation perf 3*	Training error	Test error	Validation error	Hidden activation	Output activation
RBF 9-13-1	0,83	1	0	0,022	0,065	0,007	Gaussian	Identity
RBF 9-7-1	0,48	1	0	0,052	0,062	0,014	Gaussian	Identity
MLP9-10-1	0,98	1	0	0,003	0,010	0,079	Tanh	Identity
RBF 9-9-1	0,62	1	0	0,042	0,066	0,002	Gaussian	Identity
RBF 9-8-1	0,58	1	0	0,045	0,068	0,001	Gaussian	Identity

1* : Apprentissage (85% des données)

2* : Test (10% des données)

3* : Validation (5% des données)

Tableau 18 : Coefficients de corrélation

Nom du modèle	Dose du coagulant DC (Apprentissage)
1. RBF 9-13-1	0,826474
2. RBF 9-7-1	0,483009
3. MLP 9-10-1	0,977240
4. RBF 9-9-1	0,618739
5. RBF 9-8-1	0,577654

Il a été construit une centaine de réseaux dont nous avons conservé le meilleur : celui présentant un bon compromis entre les performances en apprentissage et en test.

La procédure de minimisation de l'erreur permet d'obtenir une architecture de réseau optimal. Le choix de la fonction d'erreur utilisée pour l'apprentissage des réseaux de neurones multicouches a une certaine influence sur la rapidité d'apprentissage et sur la qualité de généralisation du réseau.

Le meilleur modèle en terme d'indices de performance a été visualisé au niveau de l'apprentissage est le (MLP9-10-1) : (neuf entrées normalisées, dix couches cachées et une sortie normalisée). Les données des tests et de la validation seules peuvent ne pas apporter une preuve suffisante du bon pouvoir de généralisation d'un réseau de neurones entraîné. Dans la phase de calage la RMSE est égale à 0.3 mg/l et le R^2 est égal à 0,977240. Les performances graphiques de l'apprentissage et du test sont visualisées dans les figures 32 et 33.

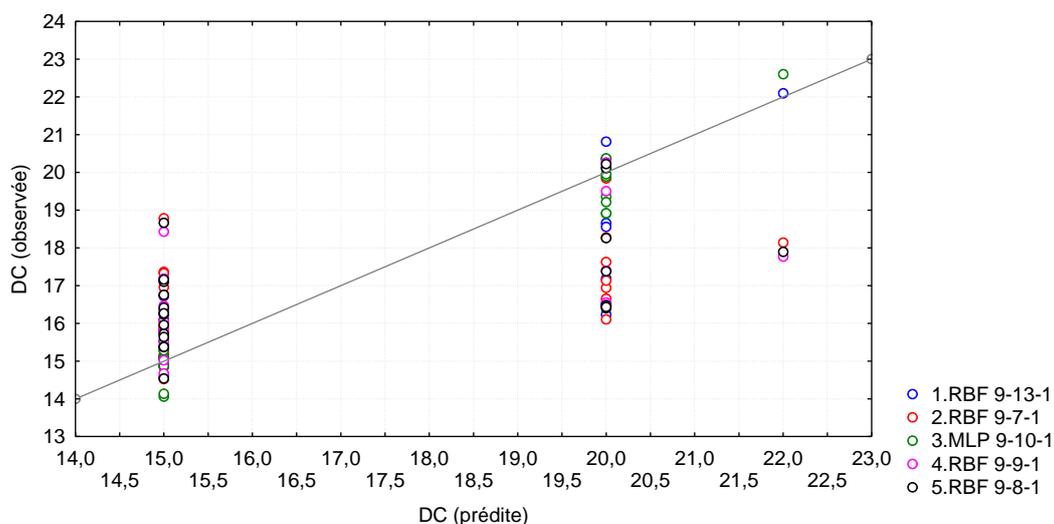


Figure 32 : Résultats d'apprentissage, test des modèles

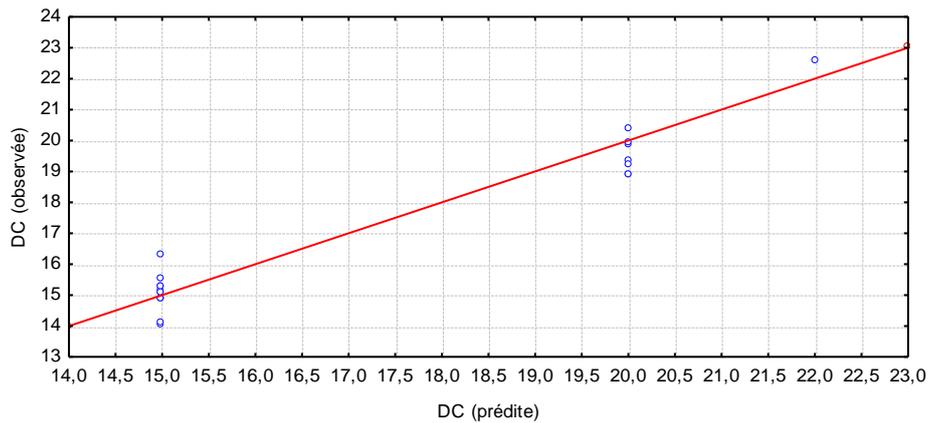


Figure 33 : Résultats d'apprentissage du modèle MLP 9-10-1

La fonction d'erreur indique dans quelle mesure les prévisions du réseau sont proches des valeurs cibles et donc, quel ajustement doit être apporté aux poids par l'algorithme d'apprentissage à chaque itération. La fonction d'erreur représente donc une certaine manière les yeux et les oreilles de l'algorithme d'apprentissage pour savoir si le réseau est performant ou non compte tenu de l'état actuel de l'apprentissage (et donc, quel ajustement doit être apporté aux valeurs de ses poids).

Afin de valider ce modèle, l'erreur a été estimée sur un jeu de données de validation constitué de 5 %. L'échantillon de validation n'est jamais utilisé pour l'apprentissage du réseau de neurones. Nous l'utilisons en revanche à l'issue de l'apprentissage comme une vérification supplémentaire de la performance du modèle. Si la performance du réseau est tout à fait correcte à la fois sur l'échantillon de test et sur l'échantillon de validation, nous pouvons raisonnablement considérer que le réseau possède un bon pouvoir de généralisation sur des données inconnues.

L'erreur d'apprentissage est un outil de mesure de qualité d'un modèle, nous montre que notre réseau de neurones présente des résultats intéressants (taux d'erreur inférieur à 7.9%) (figure 34).

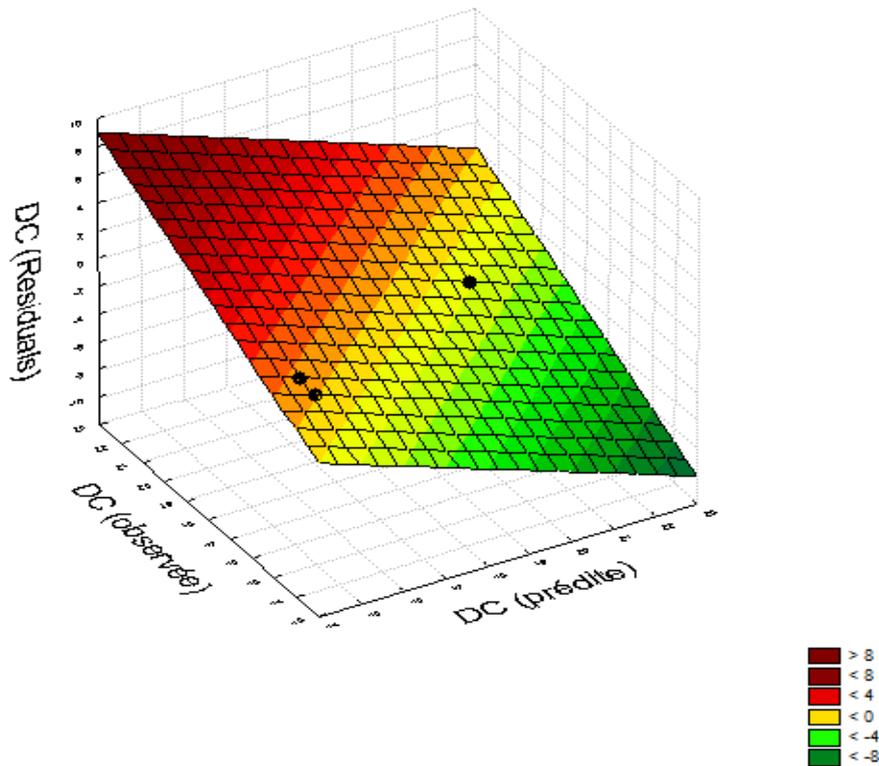


Figure 34 : Résultats des erreurs du modèle 9-10-1

Les réseaux de neurones sont souvent comparés à une boîte noire car, en effet, il est très difficile de comprendre les calculs effectués durant le processus d'apprentissage. Néanmoins, il est possible en résultat à ces calculs d'estimer la sensibilité des variables d'entrées et ainsi de savoir quelles sont les variables les plus explicatives du phénomène à modéliser.

Dans notre cas, les variables turbidité, pH et matière organique ont été estimées comme les plus explicatives (tableau 19).

Tableau 19 : Analyse de la sensibilité de la dose du coagulant

Modèle sélectionné	Turbidité	pH	MO	Conductivité
MLP 9-10-1	18.81	7.69	20.16	2.89

5.5. Conclusion :

Le présent chapitre expose les résultats de l'application des modèles de type neuronal dénommés réseaux de neurones artificiels à perceptron multicouche (MLP), les tentatives de modélisations ont pu lier la valeur de la dose optimale du coagulant (sulfate d'aluminium) aux valeurs des paramètres caractérisant la qualité des eaux brutes, à l'entrée de la station de traitement des eaux de surface de Ain Dalia (Wilaya de Souk-Ahras). En faisant cela, nous avons pu aussi fournir un outil préliminaire pour la gestion automatisée de la dite station en améliorant en conséquence sa qualité de service.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons utilisé les réseaux de neurones artificiels à perceptron multicouche (MLP) et fonction à base de radial (RBF), pour démontrer que la dose du coagulant est une variable qui n'agit pas seule mais est expliquée par d'autres variables telles que la température, pH, matière organique, la dureté et le taux d'alcalinité total, turbidité, ammonium, HCO_3^- et la conductivité. Les eaux destinées directement ou indirectement à la consommation humaine, doivent être saines pour le consommateur, à court comme à long terme, et ne doivent pas se dégrader lors de leur transport dans les réseaux de distribution. Ainsi, les eaux de l'unité de production Ain Dalia (Wilaya de Souk-Ahras), alimentée à partir du barrage d'Ain Dalia à l'Est Algérien présentent un nombre plus ou moins important de paramètre(s) « à ajuster » ou « à éliminer », auquel(s) correspond(ent) une ou plusieurs technique(s) de traitement.

La qualité doit être garantie par une surveillance et un contrôle permanent à travers des mesures qualifiables et quantifiables dans le but de ne pas ralentir la production et d'en assurer un niveau de qualité élevé et uniforme.

La difficulté principale dans la phase de coagulation est de déterminer la dose optimale du coagulant à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute. Un mauvais contrôle de ce procédé peut entraîner une augmentation importante des coûts de fonctionnement et le non-respect des objectifs de qualité en sortie de la station de traitement.

Nous avons montré, dans ce mémoire, que les données du procédé de traitement peuvent être employées comme outil de modélisation par apprentissage qui permet de prévoir précisément la dose du coagulant en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute. Ainsi, nous avons pu aussi fournir un outil préliminaire pour la gestion automatisée de la dite station en améliorant en conséquence sa qualité de service.

Nous avons proposé une nouvelle méthode de prédiction de la dose du coagulant en fonction de 9 variables descriptives caractérisant l'eau brute à l'entrée de la station, basée sur les réseaux de neurones artificiels. Les performances numériques sont plus appréciables pour le modèle utilisant neuf variables descriptives. Cela confirme la complexité du processus et la forte non linéarité de la relation entre la dose du coagulant et les différentes variables descriptives. Le modèle MLP de structure (9-10-1), (neuf entrées normalisées, dix couches cachées et une sortie normalisée), a été retenue par la présente contribution, ce choix est basé sur des critères de qualité universellement reconnus, une RMSE de validation de 0.3 mg/l et un coefficient de corrélation $R^2 = 0.977$.

Annexe

A. Analyses des paramètres physiques

a) **Le pH** : a été mesuré à l'aide d'un pH mètre (Hacha. Sension 3). Avant chaque essai, nous procédions à l'étalonnage de cet appareil à l'aide des solutions tampons.

b) **La conductivité** : est mesurée au moyen d'un conductimètre électrique (HANNA.EC214) donnant des mesures en $\mu\text{s}/\text{cm}$.



Figure 35 : un pH mètre (à droite) et un conductimètre (à gauche)

c) **la turbidité** : mesurée par la méthode néphélométrique (NTU), à l'aide d'un turbidimètre (HANNA.HI88703).



Figure 36 : un turbidimètre

d) La température : est mesurée à l'aide d'un thermomètre.



Figure 37 : un thermomètre

B. Analyse des paramètres chimiques [ROD_84]

a) Oxygène consommé par les matières organiques

Ce test a pour but d'approcher la teneur en matière organique dans l'eau.

1. Principe :

L'opération consiste à mesurer en milieu acide et en alcalin la quantité d'oxygène utilisée pour la réduction du permanganate de potassium par les matières organiques d'origine animale ou végétale contenues dans une eau.

2. Réactifs :

- Solution d'acide sulfurique diluée à 50%
- Solution de permanganate de potassium N/80 (KMnO_4)
- Solution de sulfate ferreux ammoniacal

Sulfate ferreux ammoniacal 10g

Acide sulfurique (d=1.83) 10g

Eau distillée 1000 ml

- Solution de bicarbonate de sodium

3. Mode opératoire :

La mesure est en milieu acide, dans deux matras on a :

- 200 ml d'eau à analyser et 10ml d'acide sulfurique
- 100 ml d'eau et 5 ml acide sulfurique
- Ajouter dans chacun des deux matras 10 ml de solution de permanganate de potassium (couleur mauve).
- Porter les deux à ébullition pendant 10 mn, laisser refroidir pendant 30 mn ensuite ajouter 10 ml de sulfate ferreux ammoniacal pour décolorer.

-Revenir à la couleur rose faible immédiatement mais persistance en introduisant dans les deux matras la solution de permanganate de potassium à l'aide d'une burette graduée.

La différence volumétrique de solution de permanganate de potassium trouvée entre les deux c'est le nombre de milligramme d'oxygène consommé par litre d'eau.

b) Dosage de la l'aluminium (méthode spectrométrique manuelle ISO 7150/1-1984(F) (spectrophotomètre UV/VIS 2005 SELECTA)

1. Principe :

Mesurage spectrométrique du composé bleu formé par la réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence du nitrosopentacyanoferrate (111) de sodium (nitroprussiate de sodium).

2. Réactifs :

- Eau exempte d'ammonium.
- Réactif coloré :

Peser 13g + ou - de salicylate de sodium, 13g + ou - 1g de citrate trisadique dihydraté et 0,097g de sodium nitropentacyanoferrate (111) dihydraté à dissoudre dans 100 ml d'eau distillée. Conserver dans un récipient en verre brun.

Cette solution est stable pendant 2 semaines.

- Dichloroicyanurate de sodium : prendre 3,2g d'hydroxide de sodium dans 50 ml d'eau distillée, + 0,2 + ou - 0,002g de dichloroisocyanurate dihydraté. Dissoudre dans 100ml d'eau distillée. Conserver dans un récipient en verre brun.
- Solutions étalons : Chlorures d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4^+$ ou le sulfate d'ammonium

3. Etalonnage :

1. Préparation des solutions –étalons :

Pour préparer une solution de 0.1 g/l d'azote ammoniacal, on pèse 0.4717 g de sulfate d'ammonium séchée à 105°C pendant une heure qu'on dissout dans 1L d'eau distillée. On aura ainsi une solution mère qu'on met dans 1 litre d'eau distillée pour avoir une solution intermédiaire de 1 mg/l.

- Prendre dans une série de fioles jaugées de 50 ml : 4 ml ; 8 ml ; 12 ml ; 16 ml ; 20 ml et 24 ml de la solution intermédiaire.
- Compléter à 40 ml avec de l'eau distillée.
- On aura les concentrations suivantes : 0.1mg/l ; 0.2mg/l ; 0.3mg/l ; 0.4mg/l ; 0.5mg/l et 0.6mg/l. Ajouter 4 + ou - 0.05ml de réactif coloré et homogénéiser. Ajouter ensuite 4 + ou - 0.05ml de la solution de dichloroisocyanurate de sodium et

homogénéiser. Diluer au trait de repère avec de l'eau. Agiter vigoureusement la fiole et la placer dans un bain d'eau maintenu à 25°C. Laisser au repos pendant au moins 60 min.

- Essai à blanc : Procéder comme décrit précédemment, mais on utilisant 40 ml d'eau distillée à la place de la prise d'essai.

4. Préparation de l'échantillon :

- Filtrer selon la teneur en ammonium attendue jusqu'à 40 ml d'échantillon dans une fiole de 50ml, ajouter 4ml de la solution de salicylate et mélanger. Le ph de la solution doit être de 12,6, ce qui est le cas pour les eaux neutres puis ajouter comme pour les solutions-standard 4ml de la solution de réactif et compléter la fiole jusqu'à la jauge.
- Garder la fiole dans un bain marie à 25°C pendant une heure et mesurer ensuite à une longueur d'onde de 655nm avec le spectrophotomètre.



Figure 38 : spectrophotomètre UV/VIS 2005 SELECTA

c) Dosage de calcium méthode tetrimétrique à l'EDTA (ISO 6058 :1984)

1. Objet et domaine d'application :

La méthode n'est pas applicable aux eaux de mer et eaux du même type à forte teneur en sels. Elle est applicable aux eaux dont la teneur en calcium varie de 2 à 100 mg/l. Pour les eaux contenant plus de 100 mg/l de calcium, une dilution de l'échantillon doit être effectuée.

2. Principe :

Titration des ions de calcium avec une solution aqueuse d'EDTA à pH compris entre 2 et 13 ; le HSN qui forme un complexe rouge avec le calcium est utilisé comme indicateur ; le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage.

Lors du titrage, L'EDTA réagit tout d'abord avec les ions calcium libre, puis avec les ions combiné avec l'indicateur qui vire alors de la couleur rouge à la couleur bleu clair.

3. Réactifs :

- Hydroxyde de sodium ; solution de 2 mol/l ; dissoudre 8 g de NaOH dans 100 ml d'eau fraîchement distillée.
- EDTA, solution titrée, C (Na₂EDTA) = 10 mmol /l, sécher une portion d'EDTA à 20C° pendant 2h, dissoudre 3,725g du sel sec dans de l'eau et diluer à 1000ml dans une fiole jaugée.
- Indicateur, HSN.

4. Mode opératoire :

- A l'aide d'une pipette, introduire 50ml de l'échantillon préparé dans une fiole conique de 250ml.
- Ajouter 2ml de la solution de NaOH et environ 0,2 g de l'indicateur HSN.
- Mélanger et doser immédiatement.
- Ajouter la solution d'EDTA tout en continuant d'agiter.
- Verser lentement, en fin de dosage le virage est atteint lorsque la couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'EDTA.

5. Expression des résultats :

La teneur en calcium, exprimée en milli mole par litre est donnée par l'équation :

$$C_{Ca} = C_1 * V_3 / V_0$$

Où :

- C₁ est la concentration en EDTA exprimée en m mol /l
- V₀ est le volume en ml de la prise d'essai
- V₃ est le volume en ml de solution de l'EDTA utilisé pour le dosage.

Si l'on désire exprimer la teneur en calcium en mg/l, celle-ci est donnée, par l'équation :

$$C_{Ca} = C_1 * V_3 * A / V_0$$

Où : A est la masse atomique relative du calcium(40,04)

Si une dilution de l'échantillon a été utilisée, en tenir compte dans le calcul en utilisant le facteur de dilution F.

d) Calcul des bicarbonates dans l'eau HCO_3^- **1. Réactifs d'analyse :**

- Acide chlorhydrique HCL 0.02M + indicateur coloré méthylorange 0.5%
- 100 ml d'eau + 2 à 4 gouttes d'indicateur et titrer avec HCL 0.02M virage jusqu'au virage couleur jaune au orange.

$$\text{HCO}_3^- = \frac{\text{volume (HCL X C\%HCL)}}{\text{volume échantillon}} = \text{moles/litre}$$

Masse moléculaire $\text{HCO}_3^- = 61$ gramme/ mole

$$\text{C\% mole/litre} \times 61 = \text{gr/l HCO}_3^- \times 1000 = \text{mg/l}$$

2. Exemple: volume HCL=15 ml. $(15 \times 0.02) / 100 = 0.003$ mol/l

$$0.003 \times 61 = 0.183 \text{ g/l} = 183 \text{ mg/l de HCO}_3^-$$

e) Alcalinité**1. Détermination de l'alcalinité :**

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des hydrogencarbonates, carbonate et hydroxydes.

- Le titre alcalimétrique ou TA mesure la teneur de l'eau en alcalins libres et carbonates alcalins caustique.
- Le titre alcalimétrique complet ou TAC correspond à la teneur de l'eau en alcalins libres, carbonates et hydrogencarbonates.

2. Principe :

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

3. Réactifs :

.Solution saturée d'hydroxyde de sodium exempte de carbonate :

- Hydroxyde de sodium.....550 g
- Eau distillé.....500 ml

Laisser au repos dans un flacon hermétiquement clos afin que le carbonate complètement. Siphonner la partie surnageante et titrer avec un acide minéral de normalité connue.

-Solution d'hydroxyde de sodium N/50.

Un volume calculé de la solution précédente est amené à 1 litre à l'acide d'eau distillée fraîchement bouillie et exempte d'anhydride carbonique.

Cette solution se conserve en flacon de polyéthylène à l'abri de l'anhydride carbonique de l'air et doit être renouvelée chaque semaine.

.Solution alcoolique de phénophtaléine à 0,5 % :

-phénophtaléine.....5 g

-Alcool éthylique.....500 ml

-Eau distillée.....500 ml

.Solution de méthylorange à 0,50 % :

-Méthylorange.....0,5 g

-Eau distillée.....q.s.p100 ml

4. Mode opératoire :

A) Détermination de TA :

Prélever dans un erlenmeyer, 100 ml d'eau à analyser. Ajouter 1 à 2 gouttes de solution de phénophtaléine. Une coloration rose doit alors se développer. Dans le cas contraire le TA est nul, ce qui se produit en général pour les eaux naturelles dont le pH est inférieur à 8,3. Verser ensuite l'acide dans l'erlenmeyer à l'aide d'une burette en agitant constamment et ceci jusqu'à décoloration complète de la solution (pH 8,3). Soit V le nombre de millilitres d'acide utilisés pour obtenir le virage.

B) Détermination de TAC :

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution de méthylorange et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune au jaune orangé (pH 4,3). Soit V' le nombre de millilitres d'acide N/50 versés depuis le début du dosage. Retrancher de ce volume 0,5 ml quantité d'acide nécessaire pour le virage de l'indicateur, qui un peu plus faible que le pH de neutralisation exacte de l'hydrogénocarbonate.

5. Expression des résultats :

TA :

-V/5 exprime le titre alcalimétrique en milliéquivalents par litre.

-V exprime le titre alcalimétrique en degrés français (en effet, 1°f correspond à 10 mg de carbonate de calcium ou 0,2 m é/l).

TAC:

-V'-0,5/5 exprime le titre alcalimétrique complet en milliéquivalent par litre.

-V'-0,5 exprime le titre alcalimétrique complet en degrés français.

ESSAI DE TRAITABILITE

ALGERIENNE DES EAUX

UP AIN DALIA

LABORATOIRE

Date :

Provenance de l'eau brute :

Température de l'eau : température extérieure :

pH eau brute : TH..... TAC..... HCO₃.....Couleur :

Turbidité eau brute : temps d'agitation : coagulation : tr/minmin

floculation : tr/min.....min

Concentration de la solution du coagulant :

Concentration de la solution du floculant :

Nombre des béchers	Bécher 1	Bécher 2	Bécher 3	Bécher 4	Bécher 5	Bécher 6
ml coagulant ajouté						
ml floculant ajouté						
Ph final						
Turbidité NTU						
Qualité du floc						
Qualité de décantation						
Aluminium résiduel						

NOTE	FLOC	DECANTATION	TEST A RETENIR
0	Absolument nul	Absolument nul	
1	Pratiquement nul	Pratiquement nul	
2	Opalescent	Pus de 2 heures	
3	Très très fin	De 1 à 2 heures	
4	Très fin	de 30 min à 1 heure	
5	Fin	de 15 à 30 minutes	
6	Moyen	de 8 à 15 minutes	
7	Gros	de 4 à 8 minutes	
8	Très gros	de 2 à 4 minutes	
9	Très très gros	de 1 à 2 minutes	
10	Exceptionnel	Moins de 1 minute	

Opérateur : Nom : Prénom : Fonction.....Signature :

Références Bibliographiques

- [BIS_95] C. Bishop. Neural Networks for Recognition, Oxford University Press, 1995.
- [CAR_99] C. Cardot. Les traitements de l'eau, Procédés physico-chimiques et biologiques. Ellipses Edition Marketing S.A, 1999.
- [CLA_92] C Touzet. Les réseaux de neurones artificiels introduction au connexionnisme, cours, exercices et travaux pratiques, 1992.
- [DEG_89] Degremont. Memento technique de l'eau 9^{ème} Ed. Lavoisier, Paris, 1989.
- [DES_97] R. Desjardins. Le traitement des eaux 2^{ème} édition de l'école Polytechnique de Montréal, 1997.
- [HOR_90] K. Hornik, M. Stinchcombe & H. White. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feed forward networks, Neural Networks, 3, 1990.
- [KOU_08] S. Kouda. Conception D'un Capteur d'Humidité Intelligent, Thèse de magister Université de Batna, 2008.
- [MAR_04] M. Parizeau. Réseaux de neurones, Université de Laval Automne, 2004.
- [MAS_99] W. J Masschelein. Processus unitaires du traitement de l'eau potable, édition : Cebedoc, 1999.
- [ROD_84] J. Rodier. L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires ; eau de mer. 7^{ème} édition, 1984
- [TAR_98] L. A Tarassenko. Guide to Neural Computing Applications, John Wiley and Sons, New York, USA, 1998.
- [JOU_11] Journal Officiel de la République Algérienne. Les paramètres physico-chimiques N° 18, 2011.