



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira-



Faculté: Sciences et Sciences Appliquées

Département: Génie Electrique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Biomédical

Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Thème

**Capteur logiciel pour la surveillance de la qualité
des eaux**

Réalisé par :

BELKACEMI Lynda

HAMID Yamina

Soutenu le : 01/10/2018

Devant le Jury composé de:

- | | | | |
|------------------------------|--------------|------------------|--------------|
| • <i>Mr. CHELBI Salim</i> | <i>M.C.B</i> | <i>Président</i> | <i>UAMOB</i> |
| • <i>Mr. BENZIANE Mourad</i> | <i>M.A.A</i> | <i>Encadreur</i> | <i>UAMOB</i> |
| • <i>Mr. MOUDACHE Said</i> | <i>M.A.A</i> | <i>Examineur</i> | <i>UAMOB</i> |
| • <i>Mr. LADJOUZI Samir</i> | <i>M.A.A</i> | <i>Examineur</i> | <i>UAMOB</i> |

2017/2018

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier et rendre grâce à DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à bien terminer ce modeste travail.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui n'ont aidé tout au long de notre travail, particulièrement :

*A notre encadreur **Mr. BENZIANE Mourad** pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail. Durant cette période, il a toujours été présent et a su nous guider dans notre travail. Il nous a fourni un cadre de travail idéal pendant notre mémoire qui nous a permis de développer nos idées. Il a toujours su apporter le regard critique nécessaire sur nos travaux tout en proposant des solutions et en nous indiquant des voies de recherche pertinentes. Sans sa disponibilité permanente, son soutien et ses conseils, ce travail n'aurait pas pu aboutir.*

Aux responsables de la station de traitement de l'eau du barrage « Tilesdit », pour leur accueil, le temps passé ensemble et le partage de leur expertises au quotidien.

Nous remercions également nos enseignants qui ont contribué à notre formation et tous les responsables de notre spécialité.

Nous remercions également les membres de jury pour l'honneur d'accepter de juger notre travail.

Finalement, nous adressons nos sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce travail.

Dédicace

A mon père,

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et l'affection dont tu m'as toujours entourée.

A ma mère,

Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra pas exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

A mes chers frères Fayçal et Riyad,

A ma famille,

A mes ami(e)s,

A tous mes enseignants durant tous mon cursus,

A toute la promotion « Master2 IB » 2017 /2018.

Lynda

Dédicace

A ma mère,

Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra pas exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

A mon père,

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et l'affection dont tu m'as toujours entourée.

A mon frère Karim, Abderrahmane, Walid et Billal,

A ma famille,

A mes ami(e)s.

A tous mes enseignants durant tous mon cursus,

A toute la promotion « Master2 IB » 2017 /2018.

Yamina

Table de matières

Table de matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Abréviation	VIII
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les eaux

1. Introduction	3
2. Cycle de l'eau	3
3. Propriétés de l'eau	4
3.1. Propriétés physiques	4
3.2. Propriétés chimiques	5
3.3. Propriétés électriques et optiques	5
3.4. Propriétés biologiques	6
4. Type des eaux	6
4.1. Eaux de pluie	6
4.2. Eaux de mers	7
4.3. Eaux souterraines	7
4.4. Eaux de surface	8
4.5. Différence entre les eaux souterraines et les eaux de surface	9
5. Eau potable	9
5.1. Contrôle de qualité de l'eau	10
5.2. Facteur de qualité de l'eau potable (paramètres d'une eau potable)	10
5.3. Les normes de potabilités	12
6. Analyse des eaux	12

7. Traitement des eaux	13
7.1. Importance de traitement des eaux	13
7.2. Le but de traitement des eaux de surfaces.....	13
7.3. La chaîne de traitement d’eaux	14
7.3.1. Prétraitement	15
7.3.2. Oxydation.....	16
7.3.3. Coagulation-Floculation.....	16
7.3.4. Filtration.....	17
7.3.5. Désinfection	17
7.3.6. Affinage et le stockage.....	18
8. Conclusion	18

Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels

1. Introduction	20
2. L’historique des réseaux de neurones	20
3. Le neurone biologique	21
4. Le neurone formel	22
5. Les réseaux de neurones	25
5.1. Construction d’un réseau de neurone	25
5.2. Architecture des réseaux de neurones	27
5.2.1. Réseaux non bouclés (<i>feed-forward</i>).....	27
5.2.2. Réseaux bouclés (<i>feed-back</i>)	28
5.3. Apprentissage des réseaux de neurones	28
5.3.1. Apprentissage supervisé.....	29
5.3.2. Apprentissage semi supervisé.....	29
5.3.3. Apprentissage non supervisé	29
6. Les grands types des réseaux de neurones	29

6.1. Les réseaux de Hopfield.....	30
6.2. Les réseaux de Kohonen ou les cartes auto-organisatrices	30
6.3. Les perceptrons	31
6.3.1. Le perceptron simple (<i>monocouche</i>).....	31
6.3.2. Le perception multicouche (<i>Multi Layer Perceptron</i>)	31
a) Architecture	32
b) Equation du réseau MLP	32
c) L'apprentissage avec la retro propagation (<i>Back Propagation</i>)	33
d) La théorie de la généralisation	34
e) Amélioration de la généralisation	35
f) Le classificateur du perceptron multicouche.....	36
7. Application des réseaux de neurones artificiels	36
8. Conclusion.....	37

Chapitre III : Evaluation et discussion des résultats

1. Introduction	38
2. L'oxygène de l'eau	38
3. Le cadre d'application.....	39
3.1. Le barrage de Tilesdit.....	39
3.2. Station de traitement d'eau « Tilesdit »	39
4. Mise en application des réseaux de neurones	41
4.1. La base de données	42
4.2. L'architecture du réseau.....	42
4.3. Choix de la stratégie d'apprentissage.....	43
5. Présentation des résultats	44
5.1. Environnement de travail	44
5.2. Développement et simulation	44

5.3. Evaluation des performances	48
5.4. Détection de défaillance du capteur physique	49
6. Conclusion	50
Conclusion générale	51
Références bibliographiques	52
Résumé	

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les eaux

Figure I. 1 : Cycle de l'eau	3
Figure I. 2 : Cycle d'eau d'approvisionnement en traitement des eaux.....	4
Figure I. 3 : Etapes de traitement d'eaux	14
Figure I. 4 : Chaîne de traitement d'eaux	15
Figure I. 5 : Coagulation / Flocculation	16

Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels

Figure II. 1 : Schéma d'un neurone biologique	22
Figure II. 2 : Modèle d'un neurone artificiel	23
Figure II. 3 : Couche de S neurones	26
Figure II. 4 : Un exemple d'un réseau de neurone à trois couches	27
Figure II. 5 : Structure d'un réseau non récurrent	28
Figure II. 6 : Structure d'un réseau récurrent	28
Figure II. 7 : Les grands types des réseaux de neurone	30
Figure II. 8 : Architecture d'un perceptron	31
Figure II. 9 : Architecture d'un réseau multicouche	32
Figure II. 10 : (a) Apprentissage correct; (b) Sur-apprentissage; (c) Sous-apprentissage	35
Figure II. 11 : Illustration de l'arrêt précoce de l'apprentissage.....	36

Chapitre III : Evaluation et discussion des résultats

Figure III. 1 : Le barrage de Tilesdit – Bouira	39
Figure III. 2 : Quelques images de la station de traitement ' Tilesdit ' de Bouira	41
Figure III. 3 : Architecture de réseau RNA choisi	43
Figure III. 4 : Modèle RNA 1	45
Figure III. 5 : Modèle RNA 2	46

Figure III. 6 : Modèle RNA 3	46
Figure III. 7 : Modèle RNA 4	47
Figure III. 8 : Modèle RNA 5	47
Figure III. 9 : Résultat de test de défaillance	49

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les eaux

Tableau I. 1 : Différence entre les eaux souterraines et les eaux de surface 9

Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels

Tableau II. 1 : Les fonctions d'activation des réseaux de neurones artificiels 24

Chapitre III : Evaluation et discussion des résultats

Tableau III. 1 : Le taux de reconnaissance de différentes architectures des RNA 45

Tableau III. 2 : Les erreurs statiques correspondantes à chaque modèle 48

Abréviation

T_{eb} : Température d'ébullition

T_{fus} : Température de fusion

MES : Matière En Suspension

MO : Matières Organiques

pH : Potentiel Hydrogène

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels

SOM : Self Organised Maps (Les cartes auto-organisées)

ART : Adaptive Resonance Theory (La théorie de la résonance adaptative)

MLP : Multi Layer Perceptron

RBF : Radial Basis Function nets (Réseau à Fonction Radiale)

RP : Retro Propagation

OD : Oxygène dissous

T° : Température

C : Conductivité

Tb : Turbidité

ER : Erreur Relative

MSE : Mean Square Error (L'erreur quadratique moyenne)

MAE : Mean Absolute Error (L'erreur absolue moyenne)

RMSE : Root MSE (La racine de l'erreur quadratique moyenne)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'eau constitue un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure des mondes minéraux et organiques. Dans le monde présent, l'eau participe à toutes les activités quotidiennes notamment, domestiques, industrielles et agricoles ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution. Le phénomène de la pollution contribue de façon considérable à la limitation des ressources en eau potable.

La dégradation de la qualité de l'eau de consommation a différents impacts directs ou indirects sur la santé des populations humaines en contact avec cette eau. Tout ceci oblige à faire de plus en plus appel à des eaux d'origines diverses et notamment aux eaux de surface. Les insuffisances existant dans la protection de ces eaux face aux nombreuses pollutions peuvent contribuer à la dégradation de l'état de ces eaux et à l'augmentation de certains micropolluants minéraux et surtout organiques indésirables dans les eaux destinées à la consommation ce qui nécessite une analyse et un traitement quotidien [1].

En traitement des eaux, comme dans beaucoup d'autres domaines, le contrôle efficace des procédés est fortement dépendant de la précision et de la fiabilité des capteurs. Etant donné la grande variabilité de l'entrée du système (eau brute), et l'hétérogénéité des données délivrées par des capteurs de principes physiques très différents, la maîtrise de la qualité de l'eau dans la chaîne de traitement impose la mesure en permanence les paramètres descripteurs de son état qui est une tâche très délicate notamment pour certains paramètres qui nécessitent beaucoup de précaution ce qui rend cette tâche très pénible. Beaucoup de recherches effectuées ces dernières années pour proposer des solutions pour ce problème, entre autre l'approche « capteurs logiciels », il s'agit de créer un modèle mathématique en se basant sur les techniques d'apprentissage permettant de remplacer un capteur physique.

L'objectif de ce travail est de développer et de mettre en œuvre un modèle de prédiction d'un paramètre descripteur de la qualité de l'eau à partir des données expérimentales et qui est basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Le choix de cette technique est justifié par la complexité des phénomènes physiques et chimiques impliqués dans le traitement des eaux. Lorsque l'on ne dispose que d'un historique relatif aux mesures effectuées sur le système, on peut envisager l'utilisation de cette approche qui consiste à mettre en œuvre des techniques

d'apprentissages permettant de construire un modèle approprié à partir d'une base de vecteurs de référence.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier, nous présenterons des notions générales sur l'eau et les différents procédés mis en jeu dans une chaîne de traitement d'eau potable. Dans le second, nous décrivons les différents aspects mathématiques relatifs à la technique des RNA et ses différents modèles, une description plus détaillée sera consacrée au perceptron multicouche qui est utilisé dans notre application. Le dernier chapitre sera consacré aux différents tests et résultats obtenus et à l'évaluation performances de notre application.

À la fin nous terminerons avec une conclusion générale récapitulant le travail effectué et tracera ses perspectives.

Chapitre 1



Généralité Sur les eaux



Chapitre I

GENERALITES SUR LES EAUX

1. Introduction

Dans tout l'univers, l'eau est la substance minérale la plus répandue à la surface du globe. C'est une molécule qui résulte de l'union d'un atome d'oxygène avec deux atomes d'hydrogène.

L'eau constitue un élément vital, pour le développement et le maintien de la vie sur notre planète, pour cela il faut préserver et assurer la persistance continue de l'eau, non seulement pour fournir à l'homme une quantité suffisante pour ses besoins mais pour lui assurer une irréprochable qualité de cette eau.

Dans ce chapitre, nous abordons quelques notions sur l'eau en général puis nous introduisons les concepts de l'eau potable. Nous présentons les différentes étapes d'analyse de l'eau et nous allons nous focaliser ensuite sur une chaîne élémentaire de traitement de l'eau potable qui est l'objectif de notre mémoire.

2. Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau ou le cycle hydrologique est un phénomène qui décrit le mouvement de l'eau dans la nature (les grands réservoirs d'eau liquide, solide ou vapeur d'eau existant sur terre). Le moteur de cette circulation est essentiellement l'énergie solaire [2].

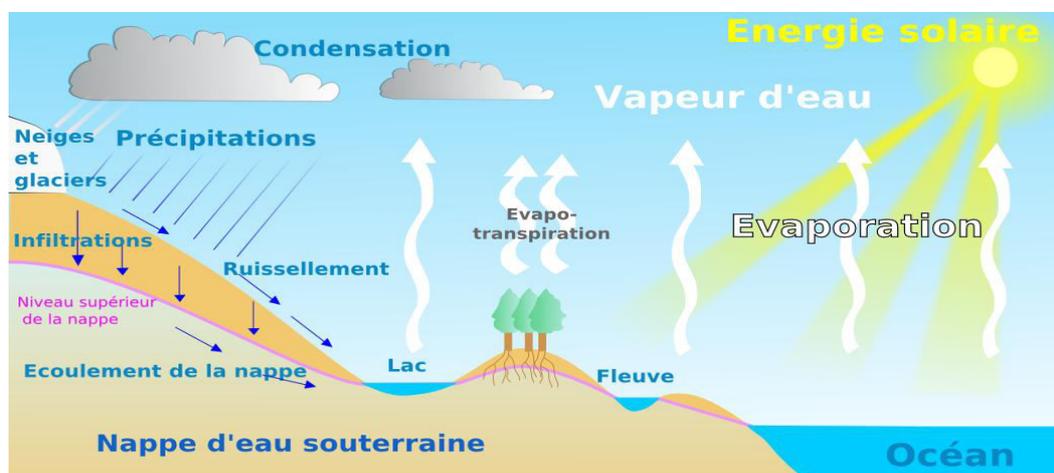


Figure I. 1. Cycle de l'eau.

Le cycle hydrologique est ainsi comme une boucle qui tourne en continu et que l'Homme a interprétée pour ses usages, son besoin quotidien et ses activités. Pour cela l'Homme, par ses nombreuses et diverses utilisations de l'eau, intervient de plus en plus dans ce cycle et dès lors a créé un autre cycle de l'eau plus ou moins néfastes à l'environnement : celui d'approvisionnement en traitement des eaux [3].

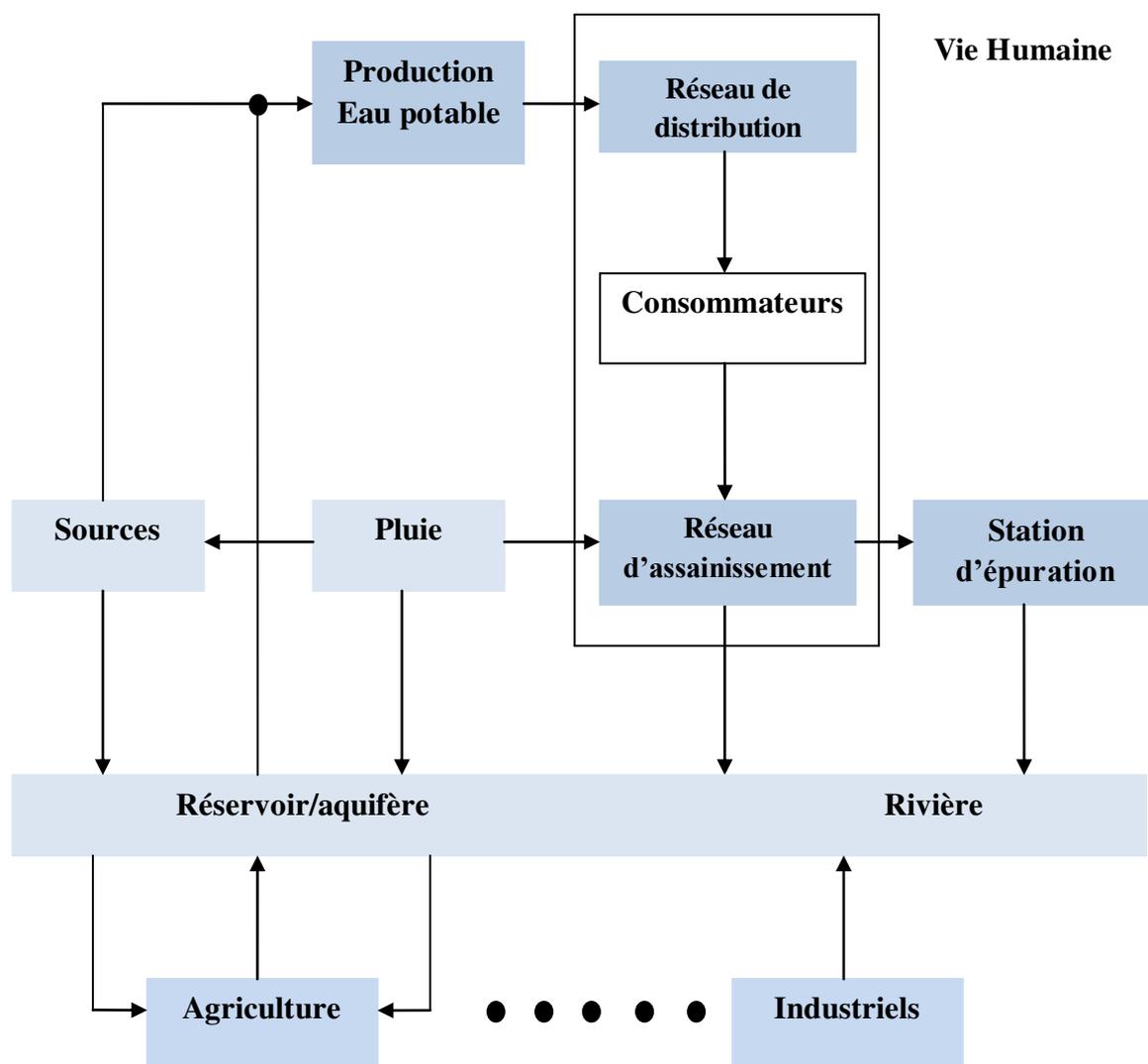


Figure I. 2. Cycle d'eau d'approvisionnement en traitement des eaux [3].

3. Propriétés de l'eau

3.1. Propriétés physiques

La polarité de la molécule d'eau et ses possibilités d'association par liaison hydrogène sont les responsables de différentes anomalies qui caractérisent ces propriétés [2].

- **Température d'ébullition et de fusion** : $T_{eb} = 100 \text{ °C}$ et $T_{fus} = 0 \text{ °C}$ à 1,013 bar [4].
- **Masse volumique** : la masse volumique vaut 1000 g/L à 4 °C et elle varie avec la température, la pression ainsi que la salinité [2].
- **Tension superficielle** : c'est la force de traction qui s'exerce à la surface du liquide. La tension superficielle d'eau la plus élevée est : 0.0525 N/m à 100 °C à cause des liaisons d'hydrogènes [2].
- **Viscosité** : c'est l'un des paramètres les plus importants de traitement de l'eau. Elle est définie comme « la résistance qu'oppose un liquide au déplacement d'une de ces couches par rapport à l'autre » [2]. Elle varie en fonction de :
 - La température : lorsque la température augmente, la viscosité diminue.
 - La salinité : elles varient en parallèle.

3.2. Propriétés chimiques

3.2.1. Solvatation ou l'action hydratante de l'eau

L'eau est considérée comme un excellent solvant. La solvatation est le résultat d'une combinaison complète ou partielle de divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre. En effet, les nouveaux liens avec les molécules de l'eau forgent de nouvelles structures : ils produisent une solvatation complète qui est une « dissolution » [2].

Le processus de la dissolution est une destruction de la cohésion interne due à deux forces, soit [2] :

- Interatomiques (liaisons chimiques fortes).
- Intermoléculaires (liaisons de cohésion entre les molécules).

3.2.2. Polarité

La molécule d'eau a une forme coudée qui joue un rôle important dans sa polarité. En effet, les barycentres des charges partielles positives et négatives ne sont pas superposés due à cette forme. Pour cela la répartition inégale de ces charges donne à l'eau ses propriétés d'une molécule polaire [5].

3.3. Propriétés électriques et optiques

3.3.1. Propriétés électriques

- **Constate diélectrique** : elle est très élevée ce qui explique le fort pouvoir ionisant de l'eau.

- **Résistivité**
- **Conductivité** : elle se change en fonction de la composition de l'eau. Cette propriété est utilisée pour le contrôle de la qualité de l'eau [2]. L'eau pure n'est pas un bon conducteur de l'électricité.

A 20 °C \longrightarrow Eau pure = $5,5 \cdot 10^{-6}$ S/m

Eau potable = [5 ; 50]. 10^{-3} S/m

Eau de mer = 5 S/m

3.3.2. Propriété optique

- **Transparence** : c'est la fonction de la longueur d'onde de la radiation qui la traverse. La grande transparence existe dans le spectre visible [2].

3.4. Propriétés biologiques

Les composantes de l'eau, l'oxygène et le dioxyde du carbone, contribuent à créer des conditions favorables pour le développement des êtres vivants [6]. L'eau entre dans la contribution des êtres vivants avec un grand pourcentage. Pour l'être humain, on cite les pourcentages suivants [7] :

- Nouveau-né 66 à 74 %
- Adulte 58 à 67 %

4. Type des eaux

Les eaux à visée de potabilisation pour la consommation humaine sont de différentes natures. On retrouve quatre (04) sources ou bien types principaux d'eau :

1. Les eaux de pluie.
2. Les eaux de mers.
3. Les eaux de surface.
4. Les eaux souterraines.

4.1. Eaux de pluie

Les eaux pluviales sont considérées comme des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine parce qu'elles sont très douces : elles sont pleines d'oxygène et ne contiennent aucun sel dissous (les sels de magnésium et de calcium).

Cette source d'eau est peu utilisée à cause de la distribution des pluies dans le temps ainsi qu'aux difficultés de captage [8].

4.2. Eaux de mers

Elles sont une source d'eau brute quand il n'y a pas un moyen pour s'approvisionner en eau douce. Les eaux de mers sont caractérisées par une concentration élevée en sels dissous (une salinité élevée) [8].

4.3. Eaux souterraines

4.3.1. Origine

Les nappes sont contenues dans des « aquifères » qui sont des terrains réservoirs. Le type de nappe et le mode de circulation souterraine sont déterminés par la porosité et la structure du terrain [6]. A l'intérieur de ces terrains, la nappe peut être :

- Nappe libre : alimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie, et la qualité de ces eaux est influencée par la qualité des eaux des rivières.
- Nappe captive : c'est le type le plus fréquent, ces nappes sont généralement les plus profondes donc l'eau peut soit imprégner (la totalité) de couche géologique : cas des terrains poreux, soit s'établir seulement dans des facteurs de roches compactes : cas de roches [6].

4.3.2. Caractéristiques générales

Ces eaux sont caractérisées par :

- Une faible turbidité grâce à une filtration naturelle dans le sol.
- Contamination bactérienne faible (la filtration naturelle et l'absence des matières organiques diminuent la croissance des bactéries).
- Température constante (elles sont à l'abri du rayonnement solaire et de l'atmosphère).
- Indice de coloration faible à cause de l'absence du contact avec les sources du couler et les substances végétales.
- Débit constant.

4.3.3. Potabilité des eaux souterraines

Les eaux souterraines synonyme des eaux propres, répondant aux normes de potabilité naturellement car elles sont moins sensibles à la pollution accidentelle. Cependant, la qualité des eaux de surface influence sur nombreuses nappes [6].

4.4. Eaux de surface

Ce terme regroupe toutes sortes d'eaux circulant à la surface (fleuves, rivières, ... etc.) ou stockés (barrages, lacs naturels, ... etc.).

4.4.1. Origine

Leur origine diffère ; soit des nappes souterraines, soit les eaux de ruissellement. Elles peuvent être stockées en lacs (réserves naturelles) ou retenues en barrages (réserves artificielles) [6].

4.4.2. Caractéristiques générales

L'eau de surface dissoute de différents éléments constrictifs des terrains. Elles sont caractérisées par [6] :

- Les gazes dissous, issus de l'atmosphère : l'oxygène (O₂), l'azote (N₂), ... etc.
- Une teneur en matière en suspension (M.E.S) plus ou moins élevée de différentes origines liées à la mesure du trouble de l'eau.
- Matières organiques (M.O) issues de la décomposition des animaux et végétaux morts comme le plancton (phytoplancton et zooplancton).

4.4.3. Potabilité des eaux de surface

Ce type d'eau est également vulnérable aux pollutions (pollution microbiologique, pollution urbaine, pollution agricole, ... etc.) [9]. Donc les eaux de surface sont rarement potables sans traitement.

4.5. Différence entre les eaux souterraines et les eaux de surface

Le tableau I.1 récapitule la différence entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Tableau I. 1. Différence entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Eaux souterraines</i>	<i>Eaux de surface</i>
<i>Température</i>	Variable suivant la saison	Variable suivant la saison
<i>Turbidité / MES</i>	Variable, parfois élevée	Variable, parfois élevée
<i>Couleur</i>	Liée aux MES, sauf dans les eaux très douces et acides	Liée aux MES, sauf dans les eaux très douces et acides
<i>Goût et odeur</i>	Fréquents	Fréquents
<i>Minéralisation globale</i>	Variable en fonction des terrains	Constante en général et élevée dans les eaux de surface de la même région
<i>Fer et manganèse</i>	Généralement absents	Généralement absents
<i>CO₂ agressif</i>	Généralement absent	Généralement absent
<i>O₂ dissous</i>	Absent dans le cas des eaux très polluées	Absent dans le cas des eaux très polluées
<i>Souffre d'hydrogène (H₂S)</i>	Généralement absent	Généralement absent
<i>Ammonium (NH₄⁺)</i>	Généralement présent pour les eaux polluées	Généralement présent pour les eaux polluées
<i>Nitrates (NO₃⁺)</i>	Peu abondantes en général	Peu abondantes en général
<i>Silice (Si)</i>	Teneur en général modérée	Teneur en général modérée
<i>Micropolluants</i>	Présent dans les eaux de pays industrialisés	Présent dans les eaux de pays industrialisés
<i>Eléments vivants</i>	Bactéries, virus, plancton (animal et végétal)	Bactéries, virus, plancton (animal et végétal)
<i>Solvant chlorés</i>	Rarement présents	Rarement présents

5. Eau potable

L'eau potable est une eau qui répond à certains facteurs qui la rend propre à la consommation humaine. Elle peut être bue, cuite ou utilisée à des fins domestiques et industrielles sans danger pour la santé [11]. Les principales sources de l'eau potable sont les eaux de surface comme les barrages, les eaux des rivières, ... etc.

5.1. Contrôle de qualité de l'eau

Dans le but d'avoir une eau de bonne qualité, les contrôles appliqués sont de plus en plus rigoureux. Avec l'introduction de nouvelles substances dangereuses dans le milieu (l'eau est vectrice de nombreux parasites, bactéries ou virus. Il faut prendre des précautions avant de consommer de l'eau dans la nature), ainsi que le développement des techniques d'analyses ; l'eau est devenue un aliment bien contrôlé et surveillé [10] [11].

5.2. Facteur de qualité de l'eau potable (paramètres d'une eau potable)

Ces paramètres représentent les limites de qualité. Ils sont classés comme suit [12] :

5.2.1. Facteurs organoleptiques

Il s'agit de la couleur, de l'odeur, de la saveur et de la turbidité (la transparence de l'eau) [11]. Ces facteurs ou paramètres peuvent indiquer une pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution de l'eau [13].

5.2.2. Facteurs physico-chimiques

Autrement dit les facteurs liés à la structure naturelle des eaux. Ils regroupent tout élément physique ou chimique constitutif de la structure naturelle d'une eau [10] comme la température, la conductivité, le pH (le potentiel hydrogène), le chlorure et le sulfate. Ces paramètres font l'identité de base de l'eau et jouent un rôle essentiel lors de l'analyse des eaux.

- **La conductivité** : elle sert à donner une idée sur la salinité de l'eau. Une conductivité élevée est traduite soit par une salinité élevée ou soit par des pH peu ordinaires. L'eau d'alimentation a une conductivité électrique de 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- **Le potentiel hydrogène (pH)** : le pH doit être, moyennement neutre, soit compris entre 6,5 et 8,5. Les pH inférieurs à 7 peuvent provoquer une corrosion des tuyauteries métalliques. Cette dernière augmente avec le degré d'acidité de la solution (pH). Le pH 7 appelé "pH neutre" correspond au potentiel hydrogène de l'eau pure à 25°C.
- **Le chlorure (Cl)** : sa présence dans les eaux dépend de la nature des terrains traversés. Il peut être considéré comme un signe de pollution (rejet des eaux usées ou rejet industriel). La concentration du chlore égale à 200 mg/l est considérée comme un risque ou un danger sur la santé.
- **Le sulfate (SO_4)** : comme le chlorure, la présence du sulfate dans l'eau dépend de la nature des terrains traversés ainsi que des rejets industriels. Les concentrations maximales

admissibles sont limitées à 205 mg/l. Si les concentrations de sulfate sont supérieures à 250 mg/l e, elles comportent un risque de troubles diarrhéiques, notamment chez les enfants.

- **La dureté** : elle correspond à la présence de sels de calcium et dans une moindre mesure, de sels de magnésium. Elle varie le plus souvent entre 10 mg/l et 500 mg/l. Une dureté de plus de 200 mg/l peut entraîner l'entartrage des canalisations et des appareils de chauffage. Par contre, une dureté trop faible (inférieure à 100 mg/l) ne permet pas la formation d'une couche carbonatée protégeant les canalisations de certains risques de corrosion. Les éventuels effets sur la santé de la dureté de l'eau de boisson sont controversés. Quoi qu'il en soit, par rapport à l'alimentation, l'apport de calcium et de magnésium par l'eau est faible (5 à 20 %).

5.2.3. Facteurs indésirables

Ils concernent des substances dont la réglementation tolère la présence en faible quantité parce qu'ils peuvent créer un dérangement pour le consommateur : odeur, couleur, goût ; soit causer des effets gênants pour la santé. On peut citer par exemple la teneur maîtrisée en fluor, en nitrates, en nitrites, en sels minéraux,... etc. [10].

- **Les matières organiques (MO)** : la contamination des eaux par des matières organiques est mesurée par l'oxydabilité au permanganate de potassium. Cette dernière est admissible pour une concentration maximale de 5 mg/l d'oxygène.
- **Nitrate (NO_3^+)** : l'eau est considérée non potable quand la concentration des nitrates dépasse 50 mg/l.
- **Nitrites (NO_2^+)** : la présence des nitrites est un signe très fort de pollution pour les concentrations limites de 0.1 mg/l. Pour cela, une analyse chimique et biologique est obligatoire.
- **Fer (Fe)** : à des concentrations de l'ordre de 300 mg/l, le fer tache le linge et les installations sanitaires en lui conférant de mauvais goût l'eau. Sa concentration maximale admissible est de 200 mg/l.

5.2.4. Facteurs concernant les substances toxiques

Ce sont les éléments toxiques qui se retrouvent dans l'eau comme : le plomb, le mercure, le chrome, le cadmium, ...etc. Ces métaux lourds sont dangereux pour la santé en cas d'une consommation régulière [10].

- **Le cadmium** : l'une des substances toxique caractérisée par sa particularité de s'accumuler dans les organes vivants au niveau de la foi et les reins. L'exigence de qualité sur la teneur en cadmium dans les eaux distribuées est de 5 mg/l pour les installations anciennes [14] [15].
- **Le plomb** : il expose les consommateurs au risque de saturnisme, intoxication chronique pouvant modifier l'humeur et le sommeil avec une diminution des capacités intellectuelles. La teneur en plomb est limitée actuellement à 50 mg/l [14] [15].

5.2.5. Facteurs microbiologiques

C'est le paramètre le plus important concernant la potabilité de l'eau. Ils permettent de vérifier que l'eau ne contient pas de germes pathogènes (c'est-à-dire bactéries, virus, parasites... etc.) qui provoqueraient une épidémie chez les consommateurs.

5.3. Les normes de potabilités

- **Définition d'une norme** : la norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser, ou une limite inférieure à respecter.
- **Normes d'eau potable** : pour répondre à la question « Qu'est-ce qu'une eau potable ? », l'organisation mondiale de la santé (OMS, 1972) a défini l'eau destinée à la consommation urbaine comme une eau qui ne doit contenir en quantités dangereuses, ni substances chimiques, ni germes nocifs ; elle doit être agréable à boire. Donc, ces normes représentent une approche quantitative de la notion qualitative de potabilité. Pour avoir une bonne qualité de l'eau, il faut respecter plusieurs paramètres et si l'un des paramètres ne respecte pas les normes l'eau doit impérativement être traitée [16] [17].

6. Analyse des eaux

Pour étudier la qualité des eaux naturelles on suit trois étapes importantes [18]:

- L'échantillonnage.
- L'analyse.
- L'interprétation.

6.1. Echantillonnage

C'est le potentiel le plus primordial parce qu'il conditionne la pertinence et la représentativité de l'analyse. Il doit être de qualité et représentatif de ce qu'on veut analyser.

Les échantillons d'eaux doivent être prélevés dans un récipient propre et suffisamment rincé avec l'eau à analyser, ensuite fermé sans laisser des bulles d'air dans le flacon.

6.2. Analyse

Il existe plusieurs matériels et méthodes pour l'analyse d'eau. Parmi celles-ci on cite [19] :

- Mesure par sonde portative électrochimique.
- Photométrie (spectromètre) : donne des résultats rapides et précis.
- Titrage ou colorimétrie : les analyses réalisées par cette méthode ne sont pas très précises.

6.3. Interprétation

Dans les eaux de surface les paramètres organoleptiques comme le pH, la conductivité, l'oxygène dissous, la température et la turbidité sont mesurées *in situ*. Ils permettent une première estimation de la qualité du milieu. Les phosphates, l'ammoniac, les nitrates et le fer permettent d'apprécier l'impact de rejets polluants sur la biosphère. Les analyses bactériologiques confirment, en général, la pollution microbienne de ces eaux de surface et permettent d'en fixer l'importance [20].

7. Traitement des eaux

7.1. Importance de traitement des eaux

Selon l'organisation mondiale de la santé, 80% des maladies qui affectent la population sont directement liées à l'eau. On trouve en permanence que 400 millions de personnes atteintes de gastro-entérite, 200 millions de schistosomiase, 160 millions de paludisme et 300 millions d'onchocercoses.

On outre, les eaux polluées sont responsables de 50 % de mortalité infantile ; la transmission des maladies par une polluée n'est pas l'apanage des pays en voie de développement [8].

7.2. Le but de traitement des eaux de surface

Les eaux des rivières, comme celles issues des barrages ; réservoirs ou de lacs ne peuvent pas être directement utilisées telles quelles sont pour la consommation publique. Il faut tout d'abord les rendre potable avec un traitement spécial pour ce type d'eaux, mais il est certain que quelques eaux souterraines doivent également être traitées. Ces deux types de

traitement sont semblables ou différents, mais de toute façon ils représentent des points communs [3] [8].

Le traitement effectué sur l'eau de surface a pour but de la clarifier et de la rendre bactériologiquement pure et exempte de micropolluants.

7.3. La chaîne de traitement d'eaux

La transformation d'une eau de surface en eau potable nécessite un ensemble de divers procédés de traitement regroupé selon un ordre bien déterminé pour fournir un produit qui répond aux normes de potabilité.

Le traitement comportera en général les opérations suivantes [8] :

- Une clarification.
- Une désinfection.
- Un traitement d'affinage.
- **La clarification** : permet de se débarrasser des particules colloïdales et en suspension avec une masse filtrante après un traitement approprié.
- **La désinfection** : a pour but de rendre l'eau biologiquement pure par des oxydants tels que le chlore, ... etc. Elle s'applique aussi aux eaux de surface qu'aux souterraines.
- **Le traitement d'affinage** : est utilisé pour éliminer les micropolluants parmi les corps dissous.

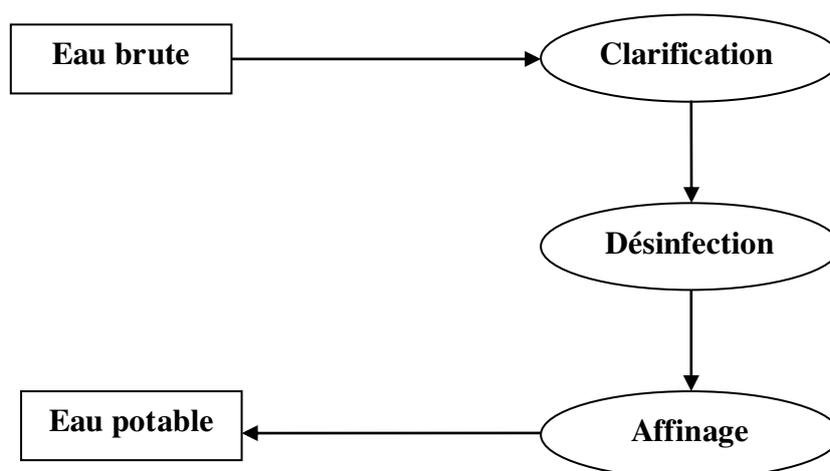


Figure I. 3. Chaîne de traitement d'eaux classique.

Cependant, les techniques de traitement se développent et se perfectionnent. Cela se traduit par la recherche de nouveaux procédés. La chaîne habituelle complète et la plus courante du traitement d'eaux de surface est présentée par la figure ci-dessous [8] :

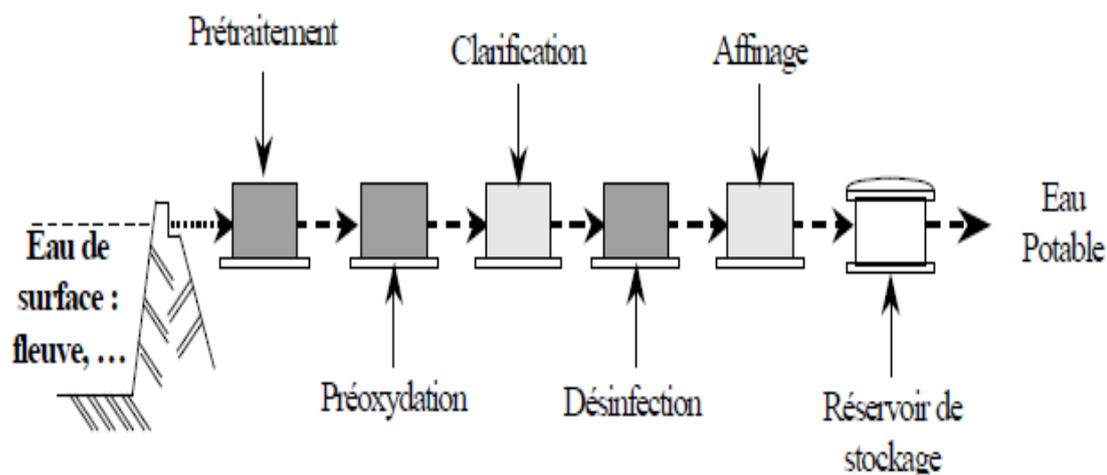


Figure I. 4. Chaîne de traitement d'eaux développée [3].

7.3.1. Prétraitement

Avant de procéder au traitement, l'eau va subir différents prétraitements (physique, chimique ou mécanique) pour se débarrasser de la plus grande quantité dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements qui suivent [3].

Dans le cas d'une eau potable, on a deux types de prétraitement : le dégrillage et le tamisage.

- **Le dégrillage** : c'est le premier poste de traitement indispensable sur les eaux de surface. Il consiste à faire passer l'eau brute à travers une grille plus au moins espacée. Le dégrillage permet de séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements d'eau [21]. Il existe deux types de grilles : des grilles manuelles et des grilles automatiques.
- **Le tamisage** : il consiste à faire passer l'eau à travers des mailles assez fines pour éliminer les débris de petite taille que ceux éliminés par le dégrillage comme les morceaux de plastique, et pour protéger les équipements de l'installation comme les vannes [3].

7.3.2. Oxydation

L'oxydation est une étape ultime du traitement de l'eau de consommation avant distribution. Elle permet d'éliminer les micros organismes pathogènes de l'eau, il peut cependant subsister dans l'eau quelques germes banals, car la désinfection n'est pas une stérilisation (stérilisation= destruction de tous les germes présents dans un milieu) [21].

7.3.3. Coagulation-Floculation

La turbidité et la couleur de l'eau de surface sont causées principalement par la présence des particules d'une taille variée du visible au microscopique dites « les colloïdales ». Ces particules peuvent rester en suspension dans l'eau durant longues durées, elles peuvent même traverser des filtres très fins. Donc pour se débarrasser de ces matières légères en suspension, on procède à un traitement chimique qui est « la coagulation-floculation » [22]. Ce traitement a pour but la croissance des particules (colloïdales) par la déstabilisation de celle-ci puis la formation des flocons par absorption et agrégation [23]. Ces flocons formés seront par la suite décantés et filtrés.

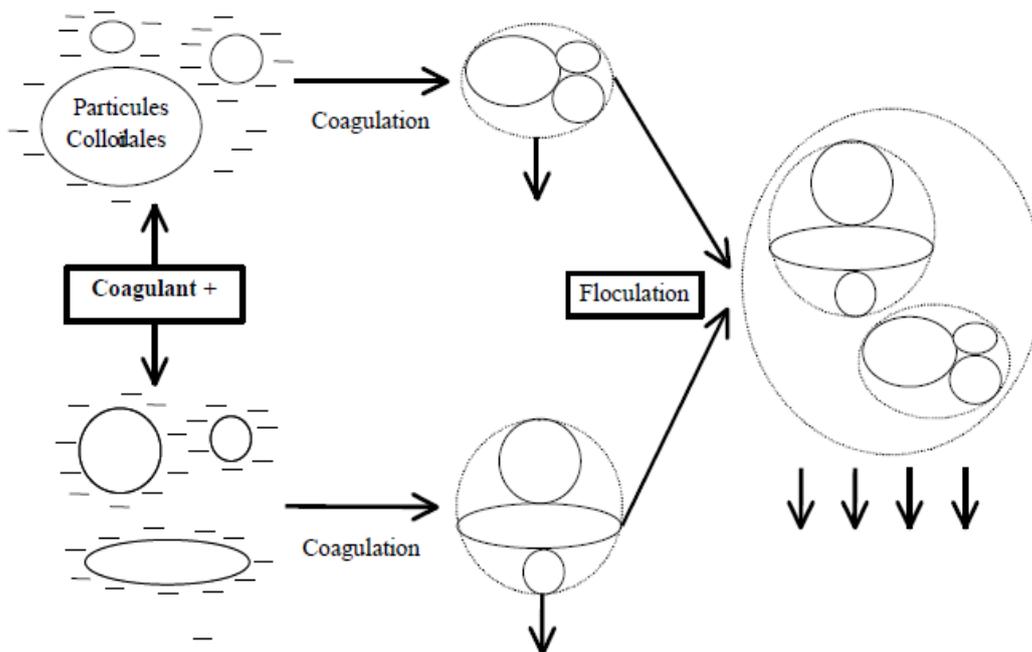


Figure I. 5. Coagulation / Floculation [3].

- **La coagulation :** c'est l'un des procédés les plus importants dans les filières de traitement des eaux de surface qui vise à éliminer les colloïdales et les MES. La coagulation comporte en premier lieu la déstabilisation des colloïdales, et en second lieu

leur agrégation en petits flocons en utilisant des produits chimiques capables de neutraliser les charges des colloïdaux présents dans l'eau. Elle est caractérisée par l'injection et la dispersion rapide de ces produits dits « coagulants » (les sels minéraux cationiques) [24].

- **La floculation** : c'est un processus de grossissement et d'uniformisation des flocons [3]. Elle est déterminée par le contact entre les particules qui conduisent la croissance en taille et la diminution en nombre des particules en solution [24]. La floculation complète la phase de coagulation et vise à favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Celles-ci s'agglomèrent pour former un floc facile à éliminer par la suite.

7.3.4. Filtration

À ce stade, l'eau peut paraître trouble (turbidité) à cause de MES : algues, fer, ... etc. Pour cela elle doit être filtrée pour se débarrasser de ces particules.

- **Définition** : la filtration est définie comme le passage d'un fluide à travers une masse poreuse pour en retirer les matières solides en suspension [6]. Elle présente un moyen physique permettant la séparation solide-liquide, dans lequel on fait percoler le liquide à travers un milieu poreux constitué d'un matériau granulaire (des couches de matériaux divers comme le sable, charbon actif en grains, gravier... etc.) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide.
- **Objectif et choix du filtre** : cette étape de traitement permet l'amélioration de la qualité de l'eau. Le filtre peut servir comme un support biologique aux bactéries nitrifiantes. En général, il aura une longévité entre deux lavages d'autant plus importante que les traitements préalables (coagulation-floculation). Les critères de choix du filtre (le matériau, taux de filtration, coefficient d'incertitude, ... etc.) dépendent de l'eau à traiter et de la qualité qu'on souhaite obtenir. Le filtre doit, tout au long du cycle de filtration, produire une eau de qualité satisfaisante, bonne et constante [3].

7.3.5. Désinfection

La désinfection a pour but d'éliminer tous les organismes pathogènes présents dans l'eau pour protéger le consommateur des maladies hydriques. Son principe est de mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un temps précis avec un échantillon d'une eau contaminée [3]. De sa définition, la désinfection contient trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact et la concentration en désinfectant.

- **Les désinfectants** : on utilise trois principaux désinfectants en eau potable [3] :
 - **Le chlore (Cl)** : le plus connu et le plus universel des désinfectants. Son pourcentage dans l'eau dépend du pH de l'eau.
 - **l'ozone (O₃)** : un oxydant très puissant et un gaz extrêmement instable. C'est l'oxydant le plus efficace sur les virus, le fer et le manganèse.
 - **Le rayonnement UV** : une dose d'irradiation de rayonnement UV permet la destruction des bactéries, germes, algues, ... etc.

Ces désinfectants sont classés selon leur pouvoir désinfectant comme suit : UV > Ozone > Chlore.

- **Le temps de contact** : en général, le temps de contact varie entre quelques minutes et plusieurs heures. Il dépend de la taille et de l'hydraulique du réacteur de contact [3].
- **La concertation des oxydants** : il s'agit, pratiquement, du seul paramètre sur lequel l'opérateur peut intervenir. Il dépend de la qualité de l'eau, du pH, des températures, ... etc. [3].

7.3.6. Affinage et le stockage

L'eau suit un cycle naturel dans lequel les éléments chimiques qu'elle contient évoluent [6]. Les différentes espèces présentes dans l'eau réagissent de façon à tendre vers un équilibre chimique appelé « équilibre calco-carbonique ». Cet équilibre correspond à une certaine valeur de pH : le pH d'équilibre. Il est très important d'avoir une eau à l'équilibre calco-carbonique lors de la distribution. Une eau qui n'est pas à l'équilibre calco-carbonique attaque les matériaux (canalisations) ou provoque la formation des dépôts de calcaire. Donc, il est indispensable de maîtriser les caractéristiques de l'eau et lui faire subir un traitement approprié pour atteindre l'équilibre calco-carbonique [3].

A la fin, l'eau propre à la consommation sera stockée dans le but de satisfaire la demande [25]. L'eau potable distribuée dépend au besoin vital et ne présente aucun risque sur la santé.

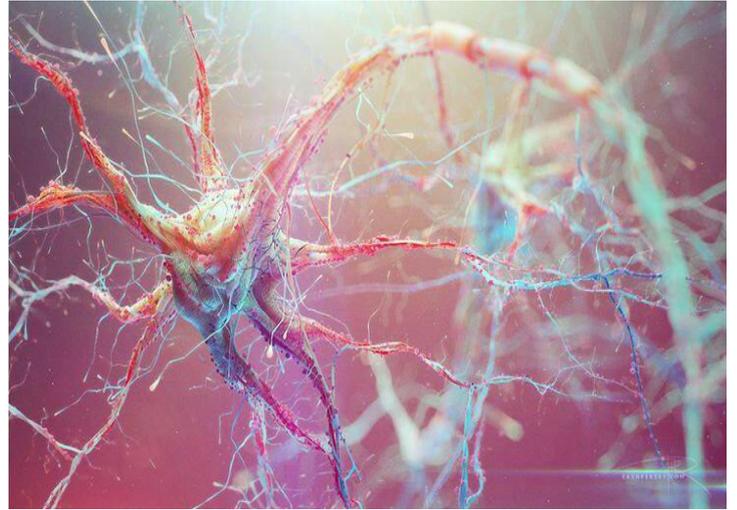
8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes notions et généralités ayant trait à l'eau ainsi que son traitement. La nécessité d'avoir une eau de bonne qualité oblige la surveillance en permanence de cette ressource vitale, dans chaque étape du processus de traitement des eaux, un certain nombre de paramètres doivent être mesurés en permanence

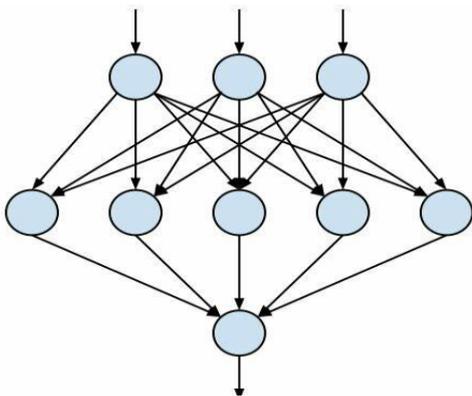
pour assurer le bon fonctionnement du traitement et pour intervenir dans le cas d'une anomalie.

Dans le prochain chapitre nous abordons la technique des réseaux de neurones artificiels et le perceptron multicouches (MLP) qui représente l'outil mathématique utilisé pour le développement de notre application.

Chapitre 2



Les réseaux de neurones artificiels



Chapitre II

LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

1. Introduction

L'un des défis qui conforte l'homme aujourd'hui est de se modeler de la nature et la reproduire en des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Pour cela, il s'est inspiré du fonctionnement du cerveau humain en créant une intelligence artificielle, plus précisément les réseaux de neurones artificiels (RNA), qui présente une solution favorable pour cette envie.

Les RNA, nés il y a des dizaines d'années, sont toujours au cours de développement. L'évolution technologique a permis aux scientifiques de différentes disciplines de les perfectionner à partir de l'architecture et les propriétés du système neuronal humain lors de traitement des informations. Du point de vue mathématique, les réseaux de neurones sont considérés comme un système possédant l'habileté d'apprentissage par expérience du milieu extérieur. Dans notre cas, ils sont capables de modéliser un processus physique à partir des données expérimentales afin de les généraliser sur de nouvelles données. Les réseaux de neurones doivent donc fournir une mesure de l'incertitude attachée à la prédiction, sous forme d'intervalles par exemple.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu sur les réseaux de neurones artificiels (généralités et notions de bases). Ensuite, nous poursuivrons en exposant l'étude de l'architecture neuronale utilisée dans notre projet : « Perceptron Multi Couches » et sa méthodologie d'apprentissage. A la fin, nous concluons avec quelques applications qui convient à cet axe.

2. L'historique des réseaux de neurones

Les tentatives de la modélisation du cerveau humain sont anciennes et précèdent même l'informatique. Voici quelques dates qui ont marqué l'histoire des réseaux connexionnistes [26] [27] :

- **1943** : La présentation du premier neurone formel par Mc Culloch et Pitts.
- **1949** : Proposition d'un mécanisme d'apprentissage par Hebb (règle de Hebb).

- **1958** : Elaboration du premier modèle artificiel nommé « le perceptron » par Rosenblatt ; dans la même période un autre modèle a été présenté par Widrow et Hoff sous le nom de modèle « adaline ».
- **1969** : Publication d'un ouvrage par Minsky et Papert où ils ont démontré les limites théoriques du perceptron, en particulier, l'impossibilité de traiter les problèmes non linéaires par ce modèle.
- **1972** : Présentation des travaux de Kohonen sur les mémoires associatives et sa proposition sur les applications de la reconnaissance des formes.
- **1982** : Développement d'un modèle utilisant les réseaux récurrents par Hopfield pour la modélisation des fonctions de mémorisation.
- **1986** : Popularisation de l'algorithme de rétro-propagation (RP) du gradient conçu par Werbos qui permet d'entraîner les couches cachées des réseaux multicouches.
- **2013** : Les réseaux de neurones profonds sont similaires aux réseaux PMC mais avec plus de couches cachées. Plus le nombre de neurones est élevé, plus le réseau est « profond ».

A nos jours, les réseaux de neurones artificiels ne cessent pas de croître en considérant la diversité des domaines d'application.

3. Le neurone biologique

Le cerveau humain est le meilleur modèle de la machine dédiée au traitement automatique d'informatique grâce à la structure et le comportement de ses cellules de base [28]. Il est constitué d'un nombre énorme d'unités biologiques élémentaires : les cellules nerveuses.

Le neurone biologique est considéré comme l'unité fonctionnelle de système nerveux central. C'est une cellule vivante qui permet la communication et le traitement de l'information. Le neurone se compose de quatre parties principales [29] [30] :

- **Le corps cellulaire (soma)** : il contient le noyau de la cellule nerveuse. C'est l'endroit où s'effectuent les transformations biologiques nécessaires à la synthèse des enzymes qui assurent la vie du neurone.
- **Les dendrites (entrée du neurone)** : ils sont des extensions tubulaires fines qui se ramifient près du corps cellulaire pour capter les signaux qui lui parviennent.
- **L'axone (sortie du neurone)** : généralement, il est plus grand que les dendrites. Cette fibre se ramifie à son extrémité et s'occupe de la transmission de l'information vers d'autres neurones.

Les synapses : c'est une jonction entre l'axone d'un neurone et la dendrite d'un autre neurone. Cet espace intercellulaire s'occupe de la transmission de l'information par l'intermédiaire de substances chimiques.

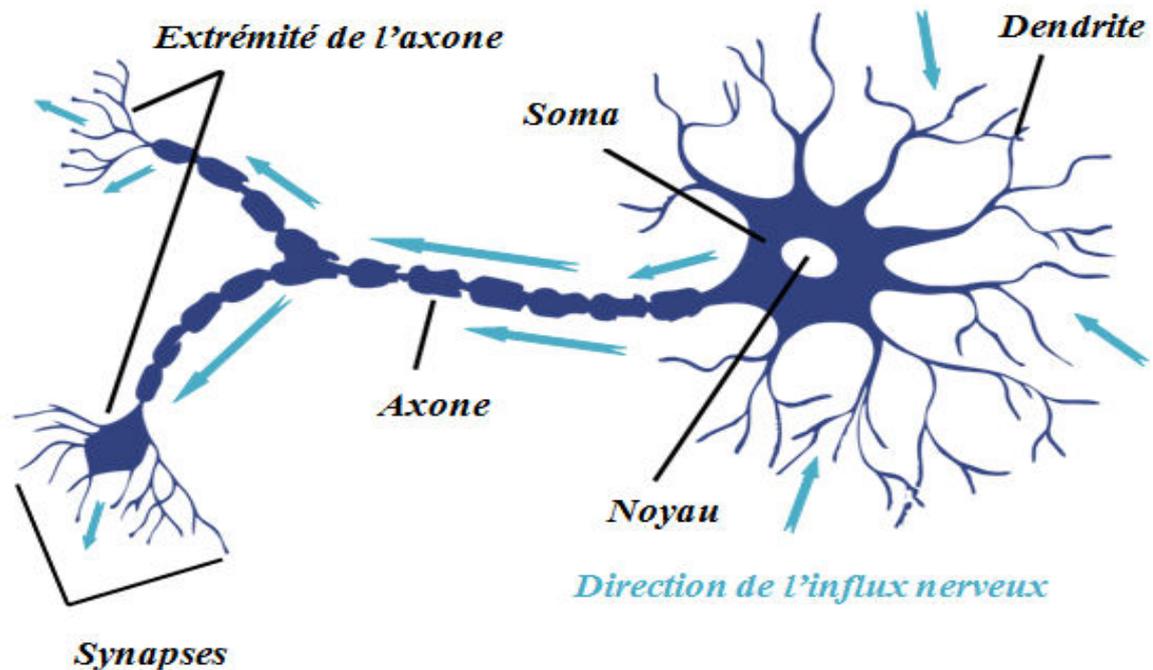


Figure II. 1. Schéma d'un neurone biologique.

Le cerveau contient environ 100 milliards de neurones biologiques (1000 à 10000 synapses par neurone). Bien que les neurones ne soient pas tous identiques, ils n'ont pas aussi un comportement similaire en fonction de leur position dans le cerveau [31]. Chaque neurone réalise un traitement local de l'information dans un seul sens (de la dendrite à l'axone), il collecte des signaux sortant des dendrites et fait leur somme. Dans le cas où l'amplitude dépasse un certain seuil interne, le signal va être envoyé vers les neurones à travers l'axone en réalisant un processus d'apprentissage.

4. Le neurone formel

Le neurone formel est la représentation mathématique et informatique simplifiée du neurone biologique, représenté par une cellule ayant plusieurs entrées et une seule sortie [32] [33]. Ce modèle pragmatique imite quelques fonctions du modèle neurophysiologique, telles que le travail en parallèle, la mémorisation et l'apprentissage [34].

4.1. Fonctionnement d'un neurone formel

Par analogie, le neurone formel ou artificiel est un processeur élémentaire constitué qui effectue la somme pondérée, par les poids synaptiques, des entrées reçues du milieu extérieur (les autres neurones). La valeur résultante de cette sommation est transformée en une sortie à travers une non-linéarité (fonction d'activation ou de seuil) [35] [36].

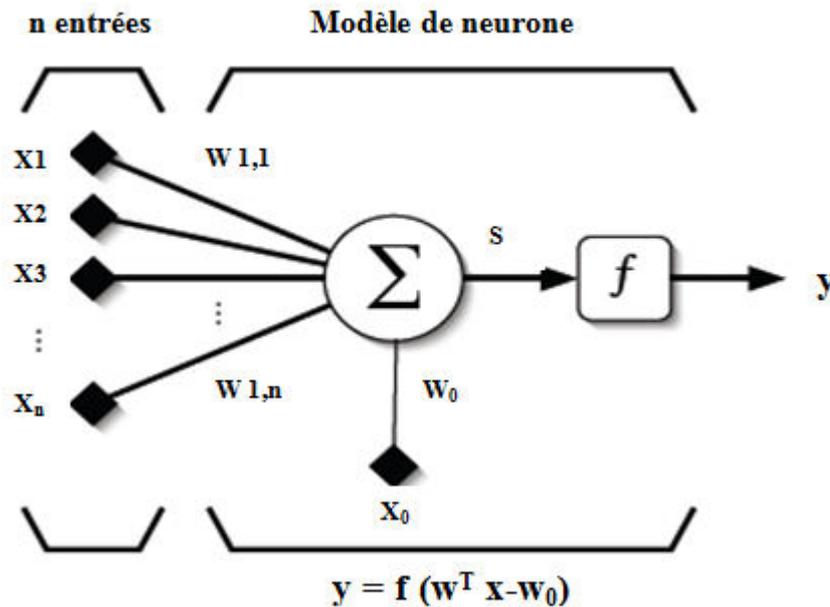


Figure II. 2. Modèle d'un neurone artificiel [36].

Donc le comportement du neurone artificiel se réalise en deux phases : la pondération et la sommation/activation [37] [38]. Ceci peut être modélisé par l'équation suivante [35] :

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i + W_0 X_0 \quad (\text{II.1})$$

$$y = f(S) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

X_i : La $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur d'entrée ;

W_i : La $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur de poids synaptique ;

S : La somme pondérée ;

f : La fonction d'activation ;

$W_0 X_0 = \theta_0$: La valeur de seuil à dépasser pour activer la sortie du neurone et $X_0 = 1$.

Cette somme peut se réécrire sous une simple forme :

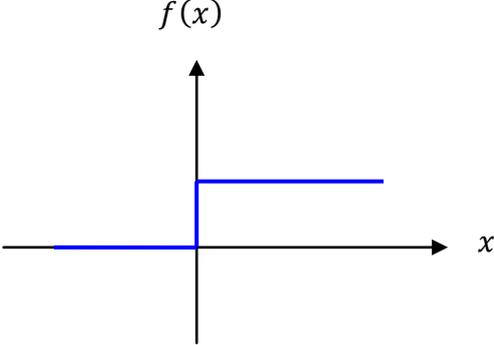
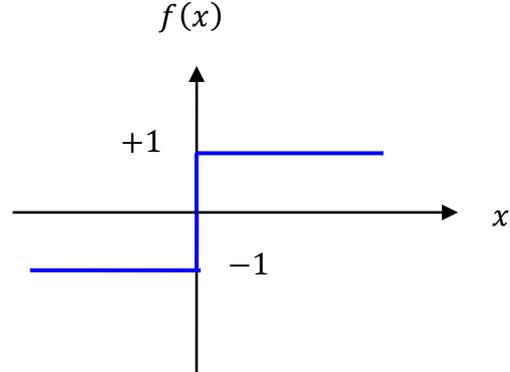
$$S = \sum_{i=0}^n W_i * X_i \quad (\text{II.3})$$

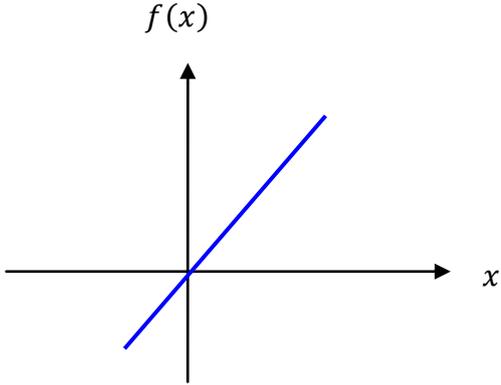
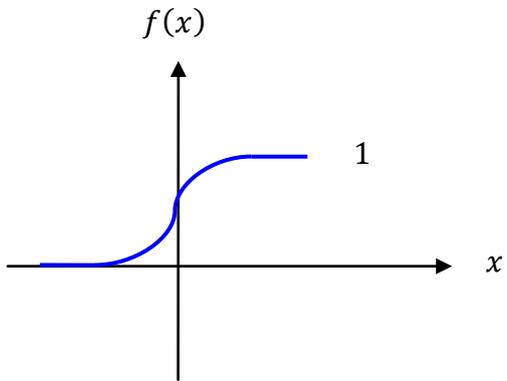
4.2. Fonction d'activation

La fonction d'activation ou la fonction de seuil est présentée par une non-linéarité. Elle permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée. Ainsi, elle sert à limiter l'amplitude du signal de sortie et reproduire l'effet de seuil sur les neurones biologiques.

Le choix de la fonction d'activation pour les réseaux de neurones artificiels dépend de l'application car chacune est adaptée à certaines applications [39]. Le tableau suivant illustre les formes des fonctions de seuil les plus utilisées.

Tableau II. 1. Les fonctions d'activation des réseaux de neurones artificiels.

<i>Nom de la fonction</i>	<i>Relation entrée/sortie</i>	<i>Allure</i>
Seuil	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Seuil symétrique	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	

Linéaire	$f(x) = x$	
Sigmoide	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	

5. Les réseaux de neurones

5.1. Construction d'un réseau de neurone

Un réseau de neurones est un maillage d'un nombre fini de neurones interconnectés et arrangés sous forme de couche ; généralement trois couches : une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches intermédiaires qui présentent les couches cachées [40] [41] ; pour construire une seule sortie.

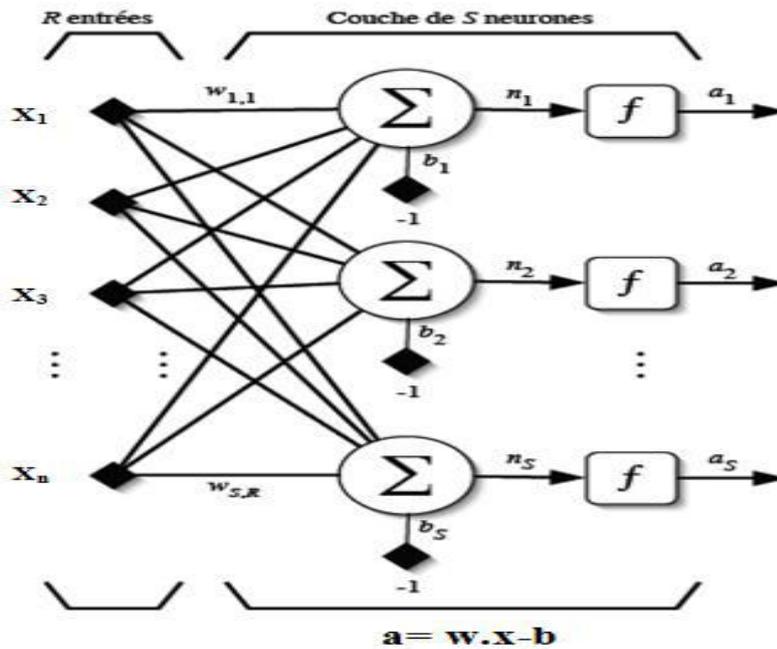


Figure II. 3. Couche de S neurones [40].

Chaque S neurones de la même couche est lié aux R entrées ce qui rend la même couche complètement connectée et chacune des connexions est lui associer un poids « w_{i,x_i} ». Le premier indice 'i' indique la rangé (les numéros de neurones sur la couche) et le deuxième indice 'j' désigne la colonne (le numéro de l'entrée), donc l'ensemble des poids ($w_{i,j}$) d'une couche constitue une matrice w de dimensions SxR [42] :

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & \dots & W_{1,R} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & \dots & W_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \vdots \\ W_{s,1} & W_{s,2} & \dots & W_{s,R} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La Figure II.4 suivante illustre un réseau de neurone à trois couches où la construction d'un réseau ne nécessite que la combinaison des couches de S neurones.

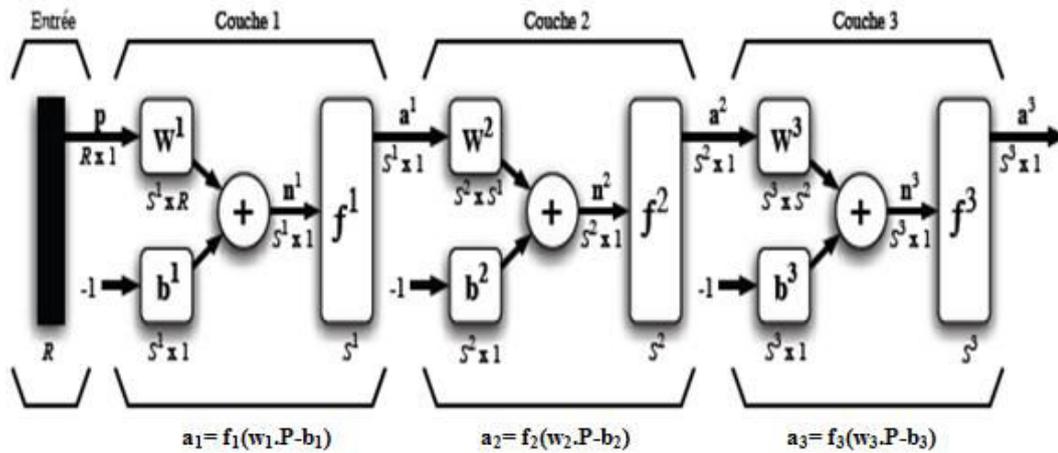


Figure II. 4. Un exemple d'un réseau de neurone à trois couches.

5.2. Architecture des réseaux de neurones

La topologie des réseaux de neurones diffère selon la logique d'interconnexion qui relie les neurones entre eux à travers différentes couches. Cela permet de distinguer deux grands types d'architectures des réseaux de neurones [40] :

- Les réseaux de neurones non bouclés (statiques/non récurrents).
- Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques/récurrents).

5.2.1. Réseaux non bouclés (*feed-forward*)

Sa structure est présentée par un ensemble de neurones connectés entre eux dont l'information se propage dans une seule direction, de l'entrée vers la sortie, sans aucune rétroaction.

Les réseaux de neurones non bouclés sont des objets statiques : si les entrées sont indépendantes du temps, les sorties le sont également. Ils sont généralement utilisés pour accomplir des tâches de classification, modélisation des processus statiques, ..., etc. Ce type de réseau contient deux groupes d'architectures : les réseaux monocouches et les réseaux multicouches [40] [43].

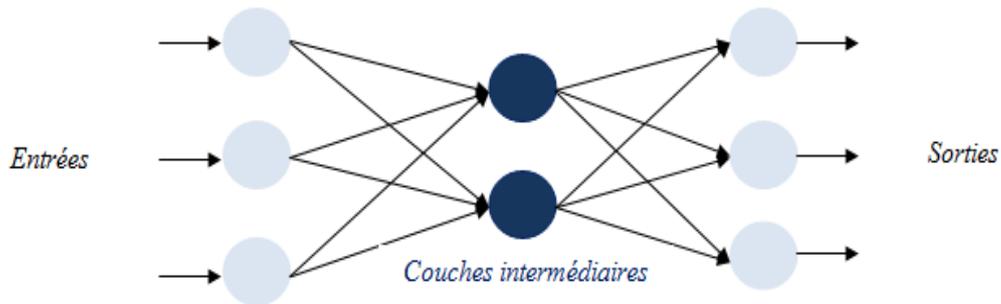


Figure II. 5. Structure d'un réseau non récurrent.

5.2.2. Réseaux bouclés (*feed-back*)

Il s'agit d'un réseau de neurones avec un retour en arrière où sa structure est organisée d'une façon récurrente ou bien cyclique. Cela suppose que chaque neurone reçoit sur ses entrées en plus des informations externes, une partie dont la totalité des sorties des autres neurones. La sortie du neurone peut être alors fonction d'elle-même si la notion de temps est prise en considération [40]. Ces réseaux sont notamment utilisés pour le filtrage, l'adaptation des systèmes dynamiques, ..., etc.

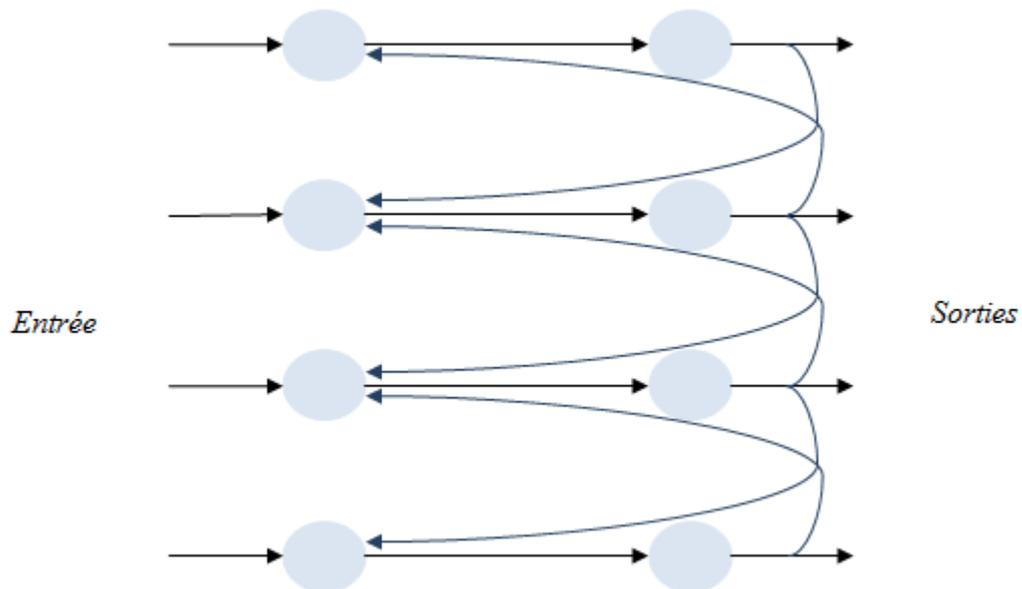


Figure II. 6. Structure d'un réseau récurrent.

5.3. Apprentissage des réseaux de neurones :

Une fois l'architecture est choisie, elle doit subir une phase d'apprentissage qui constitue le point crucial du développement d'un réseau de neurones [44]. En effet, il n'existe pas une définition générale pour l'apprentissage. Mais il recouvre deux points souvent traités successivement : la mémorisation et la généralisation.

D'une manière plus simple, on peut dire qu'entraîner un réseau de neurone signifie impliquer une action de mise à jour des valeurs des poids synaptiques des connexions dont le but est d'obtenir la fonction entrée/sortie désirée [44] [45]. Selon les algorithmes d'apprentissage, trois types ont été distingués :

- L'apprentissage supervisé.
- L'apprentissage renforcé (semi supervisé).
- L'apprentissage non supervisé.

5.3.1. Apprentissage supervisé

Ce genre d'apprentissage repose sur plusieurs exemples qui sont des couples d'entrées/sorties désirées correspondantes et un expert qui possède une connaissance de l'environnement où il s'est évolué le réseau de neurone. Donc, dans ce type d'apprentissage on force le réseau à produire une ou plusieurs sorties connue à l'avance [44].

5.3.2. Apprentissage semi supervisé

Ce mode d'apprentissage est semblable au précédent dans la mesure où il permet d'obtenir seulement des informations quantitatives (signal d'échec ou de succès) sur les performances du réseau [40].

5.3.3. Apprentissage non supervisé

Contrairement à l'apprentissage supervisé, celui-ci est autodidacte où l'on ne dispose pas de base d'apprentissage. Le réseau de neurones s'arrange tout seul en lui fournissant seulement des exemples d'entrées sans indication des sorties désirées [46] [47]. Ce type d'apprentissage est dit également compétitif ou coopératif.

6. Les grands types des réseaux de neurones

La figure II.7 représente les réseaux de neurones les plus utilisés. Dans ce qui suit, nous allons faire une description des plus importants :

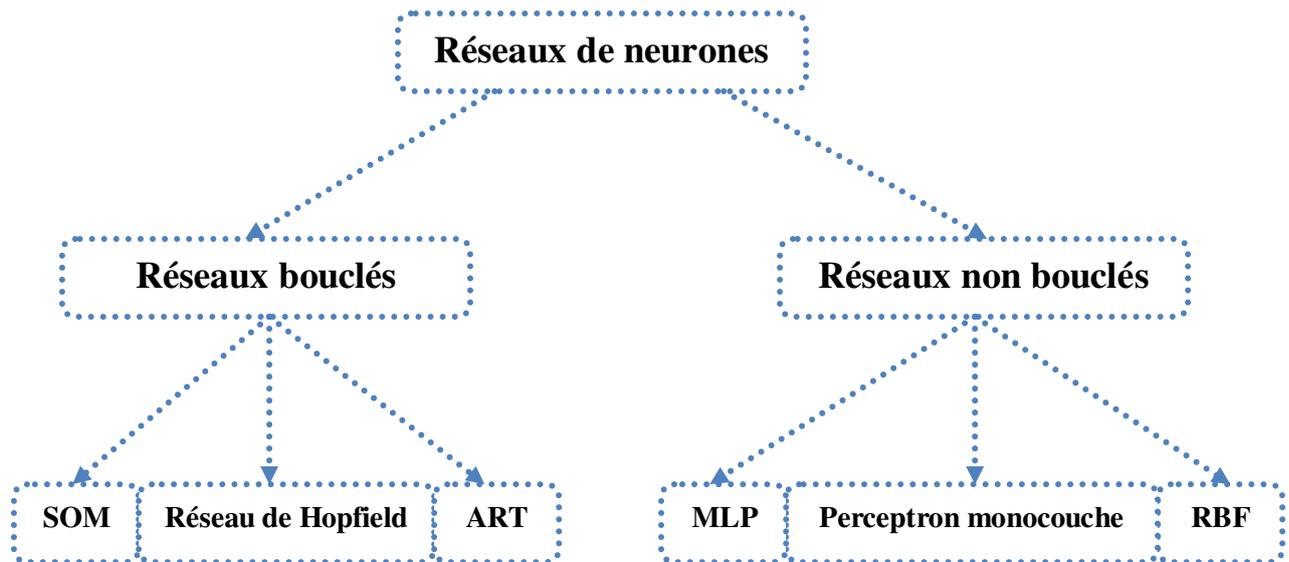


Figure II. 7. Les grands types des réseaux de neurones.

6.1. Les réseaux de Hopfield

Les réseaux de Hopfield représentent une architecture plus historique que pratique. Ce sont des réseaux récurrents entièrement connectés. Chacun des neurones est lié à tous les autres, avec des liaisons synaptiques, mais pas à lui-même. Chaque neurone est à la fois neurone d'entrée et neurone de sortie [48].

Les réseaux de Hopfield fonctionnent comme une mémoire associative non linéaire, avec un mode d'apprentissage non-supervisé.

6.2. Les réseaux de Kohonen ou les cartes auto-organisatrices

Les cartes auto-organisées SOM (*Self Organised Maps* en anglais) représentent un modèle de neurone proche de la réalité, inspirés de certaines aires biologiques auto-organisées.

Les réseaux de Kohonen utilisent une carte à deux couches, une en entrée et une en sortie. Les neurones des deux couches sont entièrement connectés entre eux et disposés selon une topologie précise (carte carrée, carte rectangulaire, ..., etc.).

Les cartes de Kohonen sont des réseaux à apprentissage non supervisé et elles ont des applications dans le traitement d'image, l'analyse de données, la compression, ..., etc. [39].

6.3. Les perceptrons

6.3.1. Le perceptron simple (monocouche)

Ayant été inventé par Frank Rosenblatt en 1957, le perceptron est le premier réseau de neurones artificiels mis en points. C'est un modèle linéaire simple, inspiré du système visuel dont son architecture générale comme décrit la figure II.8 comprend [49] :

- Une couche d'entrée (la rétine) : contient plusieurs cellules qui jouent le rôle d'un capteur.
- Une couche d'association : composée de cellules associatives (des neurones) connectées aux cellules de la rétine
- Une couche de sortie (couche finale) : c'est la couche des cellules de décision où les sorties des neurones prennent seulement deux états (-1 et 1 ou 0 et 1).

Le réseau monocouche suit un apprentissage supervisé et il peut être utilisé dans la classification ainsi pour résoudre les opérations logiques simples.

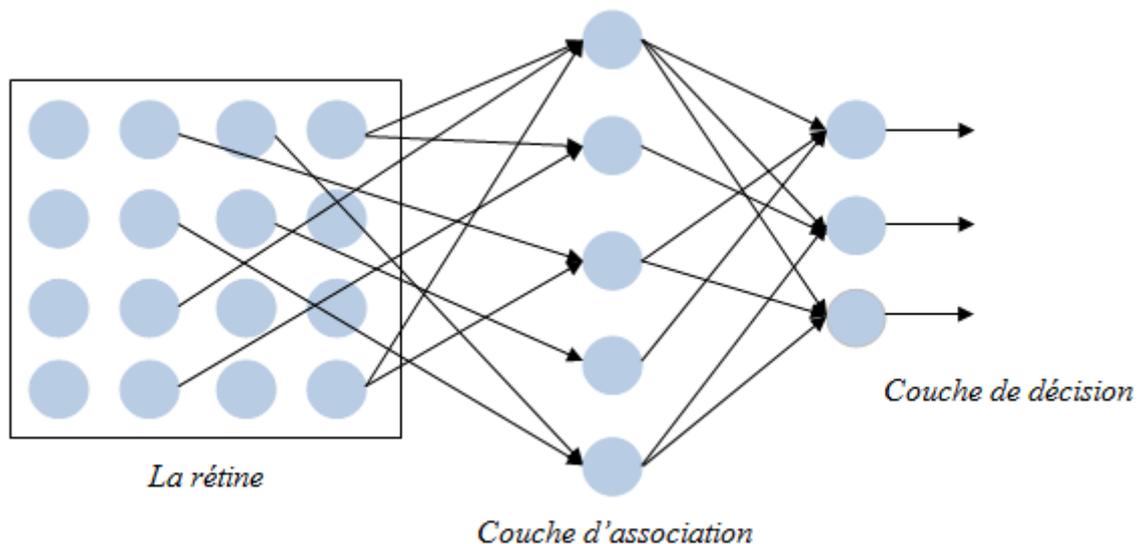


Figure II. 8. Architecture d'un perceptron [49].

6.3.2. Le perception multicouche (Multi Layer Perceptron)

Les problèmes rencontrés avec le perceptron à couche unique ont obligé les chercheurs à développer/créer d'autres réseaux pour les résoudre.

En suivant le raisonnement du cerveau humain et en s'inspirant du réseau monocouche, une architecture, plus complexe, englobant plusieurs neurones a été mise en points. Cette

architecture est « le perceptron multicouches » (PMC) ou (*Multi Layer Perceptron*, MLP en anglais) dont notre projet est principalement construit autour.

a) **Architecture** : C'est une amélioration de l'architecture du réseau précédent avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie.

Le principe de construction de ce réseau est de regrouper les neurones dans une couche. Ensuite, en ajoutant d'autres couches bout à bout et en connectant les neurones des deux couches adjacentes, les entrées de la deuxième couche seront les sorties de la première couche. Les neurones de la première couche sont reliés au mode extérieur cependant les neurones de la deuxième couche forment la sortie du réseau [30] [41].

Les PMC sont classés dans la famille des réseaux à propagation vers l'avant (*feed-forward*) et leur fonction d'activation est la fonction sigmoïde ($f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$).

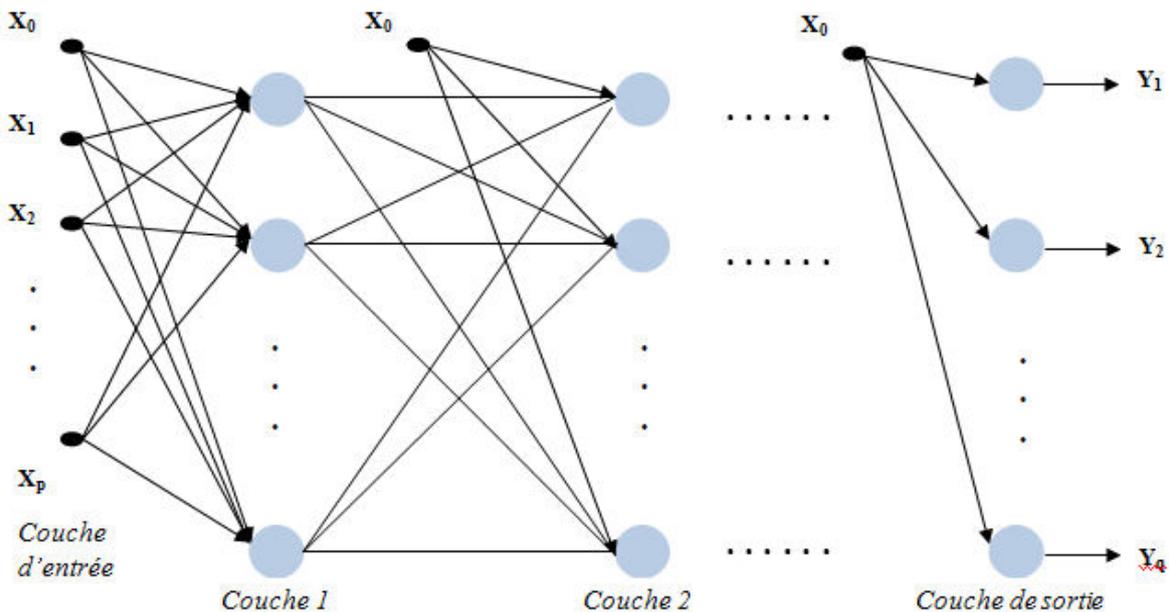


Figure II. 9. Architecture d'un réseau multicouche.

b) **Equation du réseau MLP** : Considérons le réseau de neurones multicouches composé de L couches, p entrées et q sorties. La couche d'entrée contient les composantes du vecteur d'entrée (x_i) avec $0 \leq i \leq p$.

Les calculs se font couche par couche et de l'entrée vers la sortie. La sortie du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche l ($0 < l \leq L$) est donnée par :

$$S_j^l = \sum_{i=0}^{N^{l-1}} w_{ji}^l \cdot u_i^{l-1} \quad (\text{II.5})$$

$$\mathbf{u}_j^l = f(\mathbf{S}_j^l) \quad (\text{II.6})$$

Où :

\mathbf{S}_j : Est la somme pondérée $j^{\text{ème}}$ du neurone de la couche (l).

\mathbf{N}^l : Est le nombre de neurone dans la couche (l).

\mathbf{u}_j^l : Est la sortie du $j^{\text{ème}}$ neurone dans la couche (l).

\mathbf{w}_{ji}^l : Est le poids reliant le $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche ($l-1$) au $j^{\text{ème}}$ neurone dans la couche (l).

L : Est le nombre de couche dans le réseau et la couche 0 correspond aux nœuds d'entrée.

$(\mathbf{w}_{ji}^l * \mathbf{u}_i^{l-1})$: Est la valeur du seuil interne du $j^{\text{ème}}$ dans la couche (l).

La fonction d'activation (f) peut être linéaire ou non linéaire pour les neurones de la couche de sortie et non linéaire pour les neurones appartenant à la couche cachée.

- c) **L'apprentissage avec la retro propagation (*Back Propagation*)** : Une fois l'architecture est définie, le réseau MLP passe à la phase d'apprentissage. Il suit un mode d'apprentissage supervisé selon la règle de correction de l'erreur en utilisant l'algorithme de retro propagation (RP). C'est un algorithme puissant, facile à mettre en œuvre et simple même pour les modèles complexe. Son principe consiste à minimiser la valeur moyenne de l'erreur entre la sortie calculée et la sortie désirée. Pour cela, il faudra une fonction non linéaire, continue et différentiable comme la fonction de transfert du neurone [26].

La procédure d'entraînement du perceptron multicouche est la suivante :

- Initialiser les poids de connexions.
- Appliquer un vecteur d'entrée au réseau puis calculer les valeurs des éléments du vecteur de sortie correspondante.
- Calculer l'erreur correspondante et le gradient de l'erreur par rapport à tous les poids.
- Déterminer la direction (+ ou -) dans laquelle on change le poids pour réduire l'erreur.
- Ajuster les poids et répéter le processus précédent avec tous les vecteurs d'apprentissage jusqu'à ce que les sorties du réseau et les sorties désirées soient suffisamment proches et l'erreur réduite à une valeur minimale.

L'algorithme de rétro propagation du gradient de l'erreur permet au perceptron multicouche de dépasser les limites du perceptron monocouche. Le PMC entraîné par la RP constitue un processus important avec de bonnes propriétés, mais qui admet également l'inconvénient de la lenteur de son apprentissage, voir le risque de ne pas converger.

- d) La théorie de la généralisation :** La généralisation concerne la tâche accomplie par le réseau une fois son apprentissage est achevé [50]. Elle peut être évaluée en testant le réseau sur des données qui n'ont pas servi à l'apprentissage.

Elle est influencée principalement par quatre facteurs :

- La complexité du problème.
- L'algorithme d'apprentissage.
- La complexité de l'échantillon (le nombre d'exemples et la manière dont ils représentent le problème).
- La complexité du réseau (nombre de poids).

La complexité du problème est déterminée par sa nature même. Par ailleurs, l'algorithme d'apprentissage influe sur la généralisation par son aptitude à trouver le minimum local assez profond, sinon le minimum global.

Le problème de la généralisation est souvent vu sous trois perspectives différentes représentées dans les cas suivants :

- La taille du réseau est fixée et la question est « combien d'exemple d'apprentissage sont nécessaires pour atteindre une bonne généralisation ? ».
- Le nombre d'exemples d'apprentissage est fixé et la question est « quelle taille du réseau donne la meilleure généralisation pour ces données ? ».
- On se donne des complexités d'échantillon et de modèle et on cherche l'écart minimum être la vraie capacité de généralisation et la capacité de généralisation estimée à partir de l'échantillon.

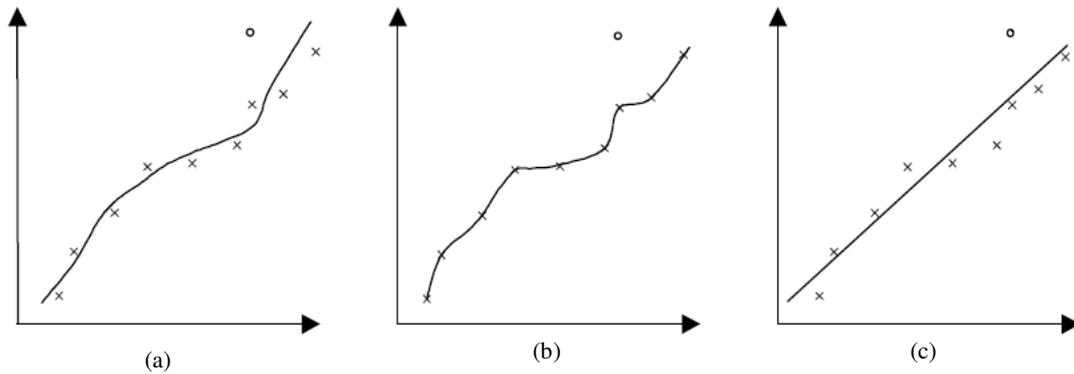


Figure II. 10. (a) Apprentissage correct ; (b) Sur-apprentissage ; (c) Sous-apprentissage [51].

On remarque que sur le graphe (a) on a un bon lissage de données, cependant sur le graphe (b) l'apprentissage est parfait sur l'ensemble d'apprentissage 'x' et moins bon sur le point de test 'o'.

- e) **Amélioration de la généralisation** : Lors de l'entraînement des réseaux de neurones, de nombreuses décisions doivent être prises concernant les paramètres utilisés afin d'obtenir de bonnes performances. Pour cela, on utilise la technique de l'arrêt précoce (*Early Stopping*) [52]. Cette méthode repose sur l'utilisation de trois jeux de données distinctes : un jeu d'apprentissage, un jeu de validation et un jeu de test. Son principe consiste à mesurer les performances pendant l'apprentissage sur les deux bases, base d'apprentissage et de validation.

Lorsque le modèle commence à être sur-ajusté, la fonction de coût sur la base d'apprentissage continue à diminuer, alors que la fonction de coût sur la base de validation augmente. A une itération précédant le début du sur-apprentissage, l'apprentissage doit s'arrêter. On vérifie la capacité de généralisation du réseau de neurones avec le dernier jeu de données, le jeu de test.

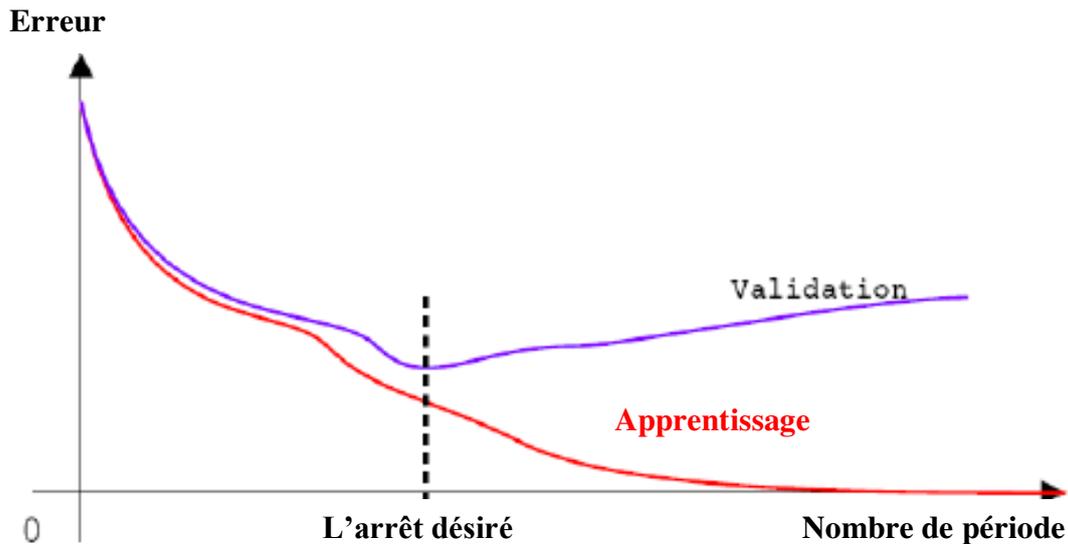


Figure II. 11. Illustration de l'arrêt précoce de l'apprentissage [52].

- f) **Le classificateur du perceptron multicouche :** Le réseau MLP se compose de trois couches comme montré sur la figure précédente (Figure II.9). A l'heure actuelle, il n'existe pas de règles ou lois régissant le nombre de couches et le nombre de neurone par couche à utiliser. Le choix reste heuristique et il est établi en fonction de l'utilisation du réseau.

Le choix d'un tel réseau pour la classification impose le nombre de neurones pour la couche d'entrée. En effet, cette couche correspond au vecteur d'entrée. La couche d'entrée alors aura un nombre de neurones équivalant à celui des composantes du vecteur d'entrée. Tandis que la couche de sortie, l'un des choix possibles est de faire correspondre le nombre de neurones au nombre de classes estimées.

Pour gérer les neurones et les fonctions d'activation permettant de définir l'état de leurs sorties en fonction de leurs entrées, chaque neurone est relié à tous les neurones e la couche précédente et chacune des connexions est effectué d'un poids pondérant la sortie du neurone précédent. La somme des entrées est alors introduite dans une fonction d'activation qui décide l'état de sortie du neurone [53].

7. Application des réseaux de neurones artificiels

Se trouvant face aux différents domaines (biologique, électronique, informatique,..., etc), l'utilisation des réseaux de neurones présente une très grande utilité dans divers domaines d'application telle que [54] :

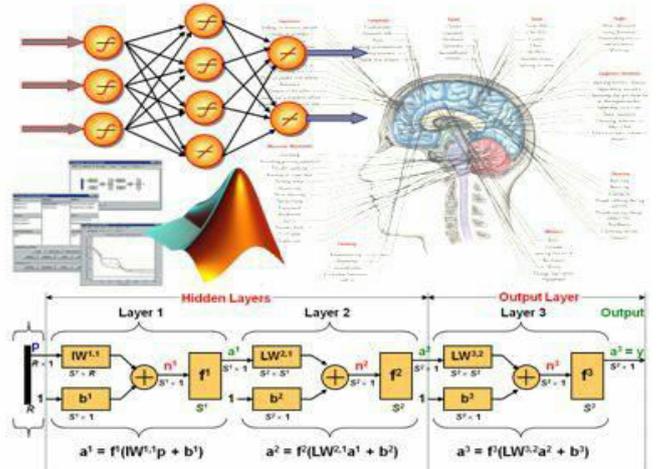
- Le traitement du signal avec l'égalisation non linéaire, la reconnaissance des signaux radar,..., etc.
- Les applications de reconnaissance des formes dans la lecture des codes postaux ou reconnaissance automatique d'image (imagerie, satellitaires, la détection et la reconnaissance de visage,..., etc.).
- Extraction des connaissances et les problèmes de classification et d'optimisation (la feuille de données).
- Les prévisions en marketing, la prédiction en météo ainsi que les estimations de probabilité de succès.
- L'automatique pour modélisation/identification des systèmes non-linéaires, la robotique (modélisation d'un actionneur d'un bras d'un robot) et la modélisation des procédés industriels.

8. Conclusion

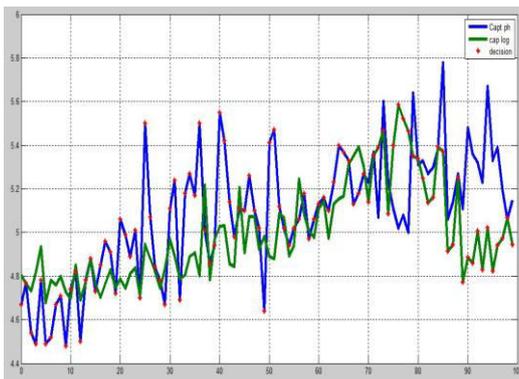
Les réseaux connexionnistes issues d'une combinaison entre la neurologie comme idée de base, la physique comme un champ d'application et les mathématiques avec l'informatique en autant que moyen de réalisation représente un chemin augurant de l'intelligence artificielle.

Dans ce chapitre, nous avons évoqué l'essentiel sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) et nous avons focalisé principalement sur le type multicouche parce que c'est la méthode qui va être utilisée pour notre conception du capteur logiciel.

Chapitre 3



Evaluation et discussion des résultats



Chapitre III

EVALUATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

1. Introduction

De nombreuses nouvelles méthodes sont faites pour l'analyse et le traitement de l'eau de surface des différents paramètres qui l'affectent tels que le pH, la conductivité (C), l'oxygène dissous (OD), ...etc. L'approche des capteurs logiciels peut fournir un moyen efficace et économique pour résoudre les problèmes rencontrés lors de l'utilisation des capteurs physiques.

Nous consacrons ce dernier chapitre à la présentation des résultats de mise en œuvre d'un capteur logiciel pour la prédiction de la concentration d'oxygène dissous dans l'eau, il s'agit d'exploiter la base de données des mesures des paramètres physico-chimiques de la station de traitement du barrage Tilesdit à Bouira. Le modèle de prédiction est basé sur les réseaux de neurones artificiels. Ensuite, nous poursuivons par une évaluation de performances des modèles testés suivant différents critères d'erreur. A la fin du chapitre nous allons étudier la possibilité de remplacer un capteur physique par un capteur logiciel en cas de défaillance.

2. L'oxygène de l'eau

L'oxygène est présent dans l'eau sous forme de molécules gazeuses, au sein de minuscules bulles d'air. Il est dissous par diffusion jusqu'à un équilibre appelé « saturation » ou « solubilité ». La concentration de l'oxygène dissous est un paramètre important dans le maintien de la vie, il est utilisé essentiellement pour l'eau de surface et sa valeur doit être moyenne car cela aura un impact sur la qualité de cette source vitale.

Selon l'organisation mondiale de la santé (OMS), une eau de bonne qualité contient d'avantage de 7 mg/l d'oxygène avec une concentration qui varie de 5 à 7 mg/l et elle est médiocre à moins de 3mg/l. La carence en OD entraînera des activités vigoureuses, produisant de l'ammoniac, de nitrites et d'autres substances toxiques [55] [56].

A l'heure actuelle, la surveillance de cet indice important est difficile et les conditions de mesure ne peuvent pas satisfaire la demande de surveillance en temps réel, de sorte que sa détection devient un problème majeur. La mesure de l'oxygène dissous est classiquement effectuée en utilisant des capteurs physiques spécifiques, cependant de nombreuses techniques ont été développées comme les capteurs logiciels qui représentent une nouvelle alternative pour la mesure.

3. Le cadre d'application

3.1. Le barrage de Tilesdit

Situé dans la daïra de Bechloul, le barrage de Tilesdit, d'une capacité de 165 millions de mètres cubes. Il a été principalement construit pour assurer l'irrigation de près de 7000 hectares de terres agricoles dans la wilaya de Bouira et pour l'alimentation en eau potable de 12 communes de l'est et du sud de la wilaya, ainsi que d'autres communes des wilayas de Bordj Bou-Argeridj et de M'sila.



Figure III. 1. Le barrage de Tilesdit - Bouira.

3.2. Station de traitement d'eau « Tilesdit »

La station de traitement de l'eau potable de la wilaya de Bouira est dimensionnée pour un débit de 1009 l/s d'eau brute. Elle peut traiter des eaux avec une concentration en MES jusqu'à 2000 mg/l. Cette station est prévue de traiter un débit moyen d'eau brute de 3632 m³/h. L'eau brute est une eau de surface soutirée du barrage « Tilesdit » dont la qualité sera vérifiée régulièrement pour que la potabilisation puisse être assurée. La qualité de l'eau

traitée doit respecter les recommandations de l'O.M.S. Dans la mesure où les ressources souterraines traditionnelles ne suffisent pas à assurer la demande en eau potable, il s'est avéré nécessaire, si non indispensable d'utiliser les eaux de surface. Pour traiter ces eaux de surface, la chaîne de traitement moderne utilise le procédé physicochimique qui consistait en deux primordiales phases :

- Clarification.
- Traitement bactéricide et virulicide.

La chaîne de traitement est composée de deux lignes. Le débit est divisé sur certains ouvrages afin d'améliorer la fiabilité, les opérations de maintenance et la souplesse de fonctionnement de la station. Les principales étapes de traitement sont [57] :

- Arrivée de l'eau brute.
- Contrôle du débit par une vanne annulaire.
- Aération de l'eau par cascade avec récolte des eaux dans un réservoir.
- Pré-chloration au moyen d'eau dans le réservoir sous cascade.
- Coagulation au sulfate d'alumine,
- Eventuellement ajustement du pH par injection de l'acide sulfurique ou lait de chaux.
- Injection du charbon actif pour l'adsorption des goûts et des odeurs de l'eau du barrage.
- Décantation sur deux lignes comprenant chacune :
 - Une floculation avec mélange par apport externe d'énergie mécanique et dosage d'un polymère dans un bassin de mélange rapide.
 - Une clarification dans un décanteur lamellaire.
 - Un épaissement des boues combiné à un dispositif de soutirage des boues en excès et de recirculation des boues.
 - Un canal de by-pass.
- Une deuxième correction du pH avec le lait de chaux pour l'amener à l'équilibre calco-carbonique,
- Filtration sur 06 filtres gravitaires à sable.
- Désinfection finale à l'eau chlorée en amont du réservoir d'eau traitée.



Cellule de filtration



Décantation lamellaire



Cascade d'aération

Figure III. 2. Quelques images de la station de traitement ' Tilesdit ' de Bouira [57].

La base de données disponible est composée des mesures qui sont enregistrées en temps réel depuis plusieurs années, elles proviennent de diverses sources et sont de qualité différente. On trouve :

- Des mesures en continu issues de capteurs physiques plus au moins précis.
- Des analyses faites en laboratoires.
- Des résultats d'essais de jar-test.

Plusieurs paramètres descripteurs de la qualité de l'eau sont mesurés en ligne et des analyses sont réalisées quotidiennement.

4. Mise en application des réseaux de neurones

La relation entre l'oxygène dissous et les autres paramètres de l'eau est fortement non linéaire [58]. Parmi les différents types de modèles de comportement possible, le modèle

RNA (Réseau Neuronal Artificiel) ayant l'avantage de décrire les relations non-linéaires entre les variables d'entrée et de sortie d'un système [59].

4.1. La base de données

La base de données sélectionnée, dans cette étude, est constituée de mesures réelles effectuée pour une période d'une année (du 1^{er} janvier 2017 au 31 décembre 2017) sur l'eau de surface traitée, soutirée du barrage « Tilesdit » de la wilaya de Bouira, à partir de divers facteurs physico-chimiques. Elle est composée des paramètres suivants :

- Le pH,
- La température (T°),
- La conductivité (C),
- La turbidité (Tb),
- L'oxygène dissous (OD).

Cette base contient 1343 vecteurs. L'ensemble de ces données est divisés en deux parties : la première (1000 vecteurs) est utilisée pour la phase d'apprentissage et la deuxième (100 vecteurs) est destinée à la phase de test.

4.2. L'architecture du réseau

Les RNAs sont des réseaux hautement connectés, fonctionnant en parallèle. Chaque réseau calcule une seule sortie en fonction des données reçues et chaque liaison neuronale est associée à un poids. Le développement d'un réseau de neurones se fait à travers différentes étapes comme le choix de l'architecture et l'identification des paramètres.

Comme nous l'avons vu auparavant, il existe plusieurs types des RNA. Dans notre travail nous avons opté pour le perceptron multicouche PMC ou MPL (*Multi Layer Perceptron* en anglais).

Le réseau choisi est composé de :

- 04 entrées (pH, T° , C, Tb).
- Un seul neurone pour la couche de la sortie (OD).
- La couche cachée contient un nombre suffisant de neurones qui sera utilisé dans la phase d'apprentissage.

- Les fonctions d'activation sont :

- Pour la couche cachée :

$$f(x) = \frac{2}{1+\exp(-x)} - 1 \quad (\text{III.1})$$

- Pour la couche de sortie :

$$f(x) = x \quad (\text{II.2})$$

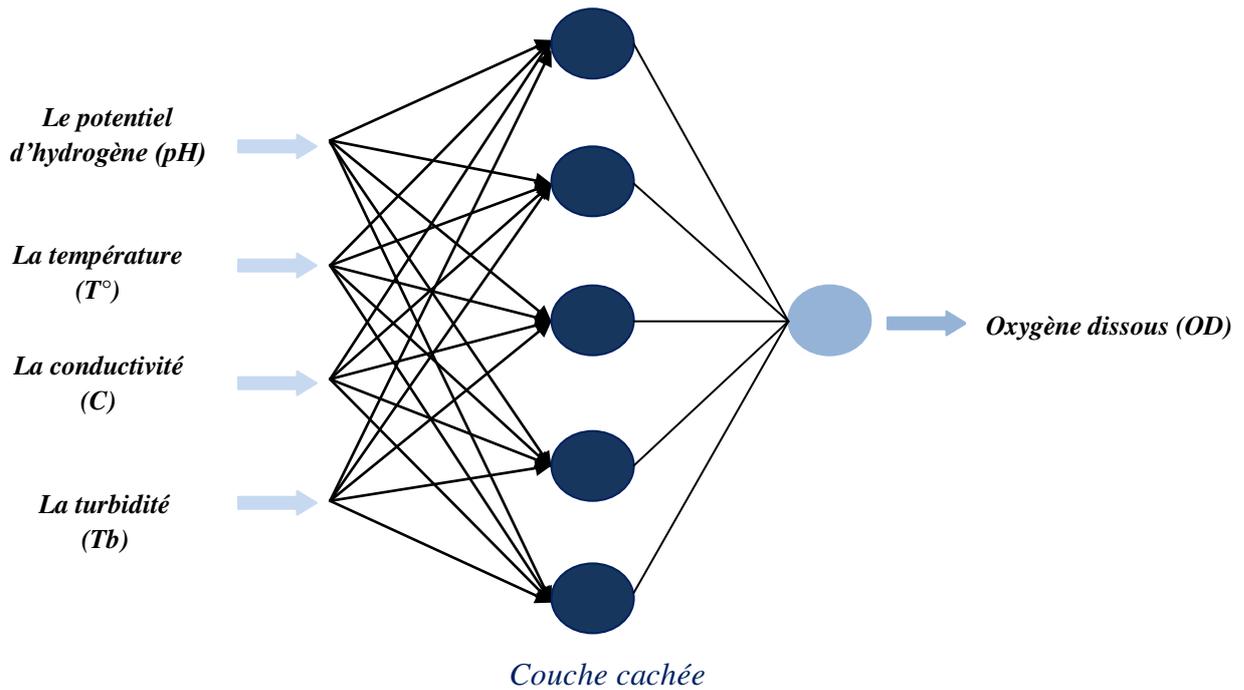


Figure III. 3. Architecture de réseau RNA choisi.

4.3. Choix de la stratégie d'apprentissage

L'apprentissage est une propriété très importante des réseaux de neurones. C'est une identification des paramètres d'un modèle non-linéaire, par une méthode itérative de modification des poids de connexions.

Dans notre cas, nous disposons de données quotidiennes (la base de données décrite auparavant), alors notre choix s'est orienté vers un apprentissage supervisé à base de l'algorithme de rétro-propagation d'erreurs en utilisant la méthode de Lavenberg-Marquardt. Après un nombre suffisant et précis d'itérations, nous obtenons les éléments caractérisant chaque neurone du réseau (le poids et le biais). Ensuite, le réseau obtenu est testé à partir de la base consacrée au test, composée de 100 vecteurs. Le nombre de neurones dans la couche

cachée a été choisie dans la phase d'apprentissage afin d'atteindre la meilleure approximation possible de la sortie désirée.

5. Présentation des résultats

5.1. Environnement de travail

Dans cette section, nous donnerons une brève présentation des environnements matériels et logiciels de notre travail.

- **Environnement matériel :**

Un ordinateur « Lenovo » caractérisé par :

- Processeur : Intel ® Pentium ® CPU.B 940@ 2.00 GHz.
- RAM : 4.00 Go.
- Disque dur : 500 Go.
- Système d'exploitation : Microsoft Windows 7.

- **Environnement logiciel :**

Nous avons utilisé l'environnement de programmation « MATLAB R2014a ». MATLAB est un environnement de calcul intégré, basé sur un langage de programmation qui permet le développement rapide d'applications. Le langage permet la manipulation d'objets mathématiques à l'aide de fonctions. Il dispose des fonctions de calcul de base ainsi que des bibliothèques spécialisées appelées boîte à outils « Toolbox ». Dans notre cas, nous intéressons à quelques fonctions relatives au développement des modèles neuronaux et qui permettent de créer, effectuer l'opération d'apprentissage et de tester les différents modèles utilisés.

5.2. Développement et simulation

Comme première étape, plusieurs architectures de RNA ont été testées. Nous avons choisi cinq modèles avec différents nombres de neurones dans la couche cachée. L'évaluation est effectuée en se basant sur l'erreur relative de sortie obtenue pour chaque échantillon afin de choisir le modèle qui donne le meilleur résultat. Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus.

Tableau III. 1. Le taux de reconnaissance de différentes architectures des RNA.

Modèle	Architecture de RNA	Erreur relative (ER)							
		<2%	<5 %	<10%	<15%	<20%	<25%		
1	4x5x1	reconnaissance (%)	Le taux de	19	54	92	100	100	100
2	4x8x1			14	47	88	100	100	100
3	4x15x1			18	45	87	100	100	100
4	4x25x1			38	69	94	100	100	100
5	4x50x1			36	68	95	99	100	100

D'après les résultats mentionnés dans le tableau (III.1), nous pouvons conclure que le taux de reconnaissance augmente avec l'augmentation de la marge d'erreur relative (ER) de sortie, pour chaque modèle, jusqu'à atteindre un maximum (100 %). Le meilleur taux de reconnaissance est obtenu avec pour le quatrième modèle (25x1). Notons bien que ces résultats concernent les sorties des différents modèles obtenus avec la base de données consacrée au test et qui est composée de 100 vecteurs qui ne sont pas utilisés dans la phase d'apprentissage.

Les figures ci-dessous représentent les graphes de la simulation : (a) concerne les résultats de l'apprentissage (1000 vecteurs) et (b) concerne le résultat de test (100 vecteurs).

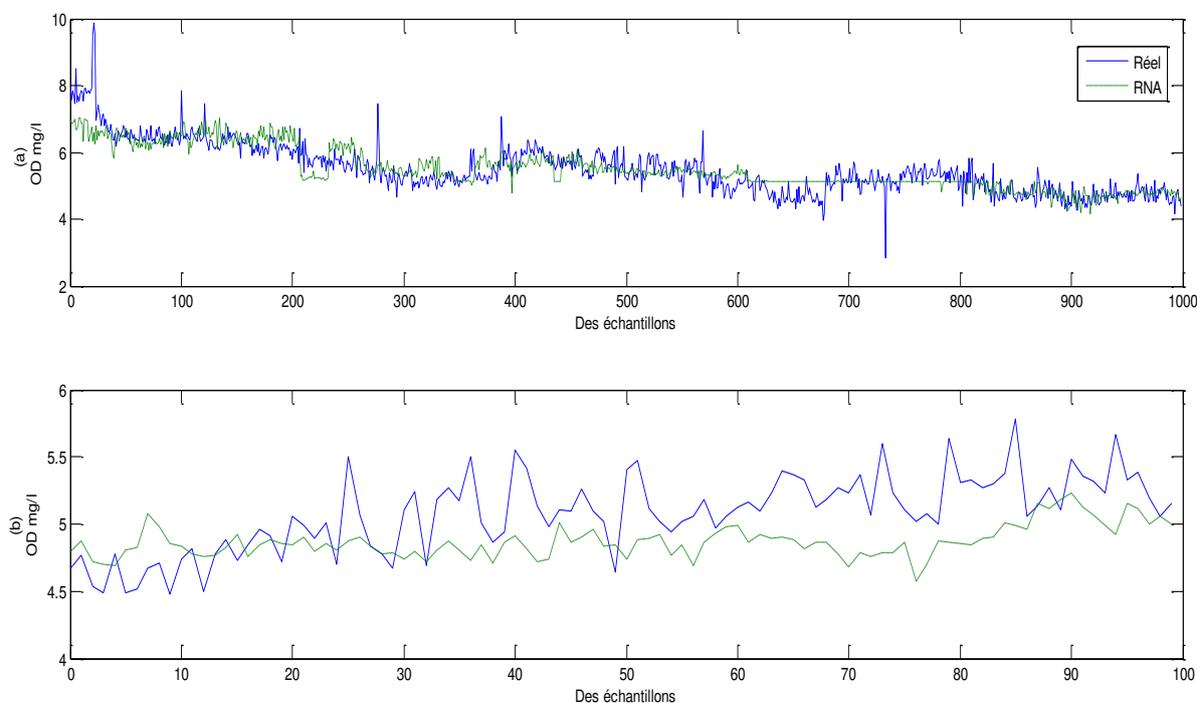


Figure III. 4. Modèle RNA 1.

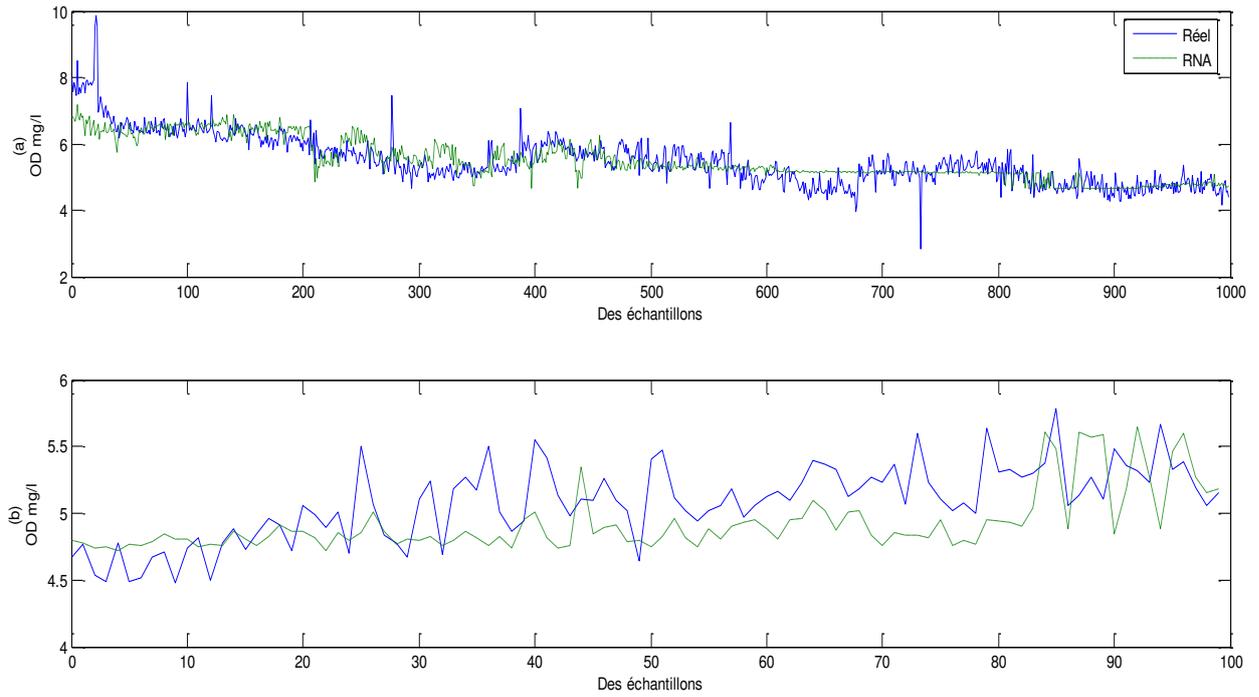


Figure III. 5. Modèle RNA 2.

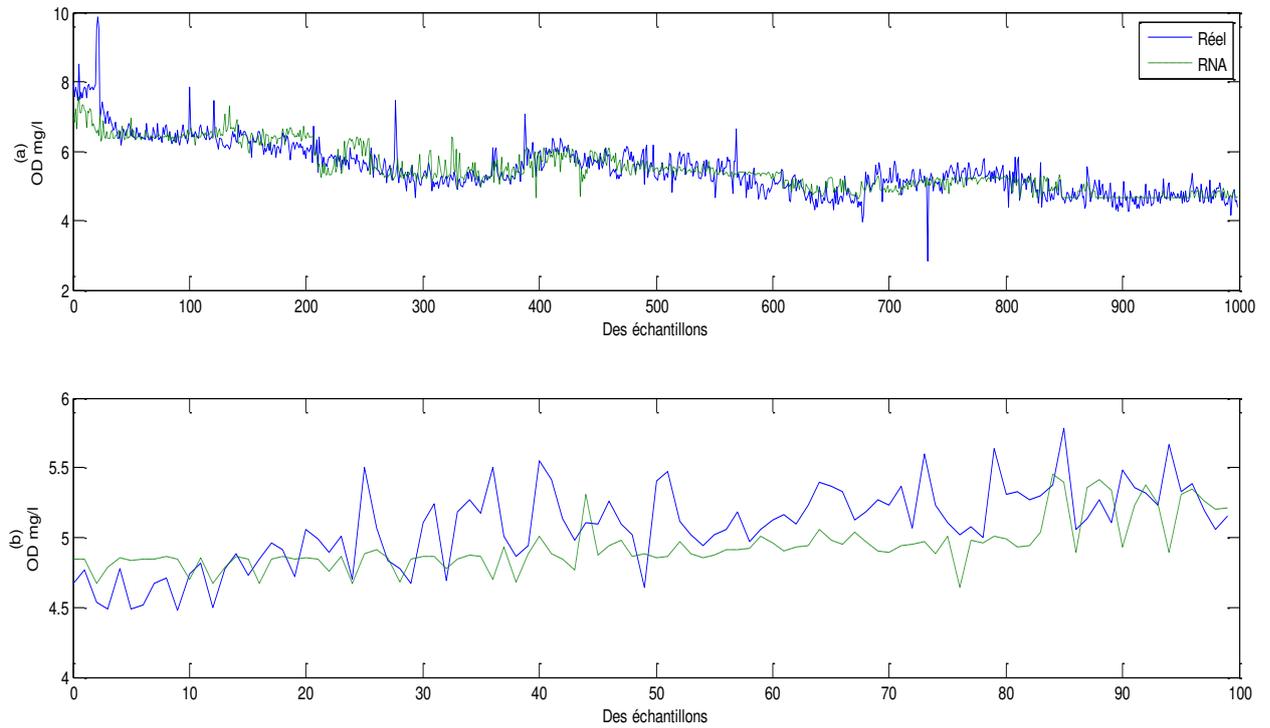


Figure III. 6. Modèle RNA 3.

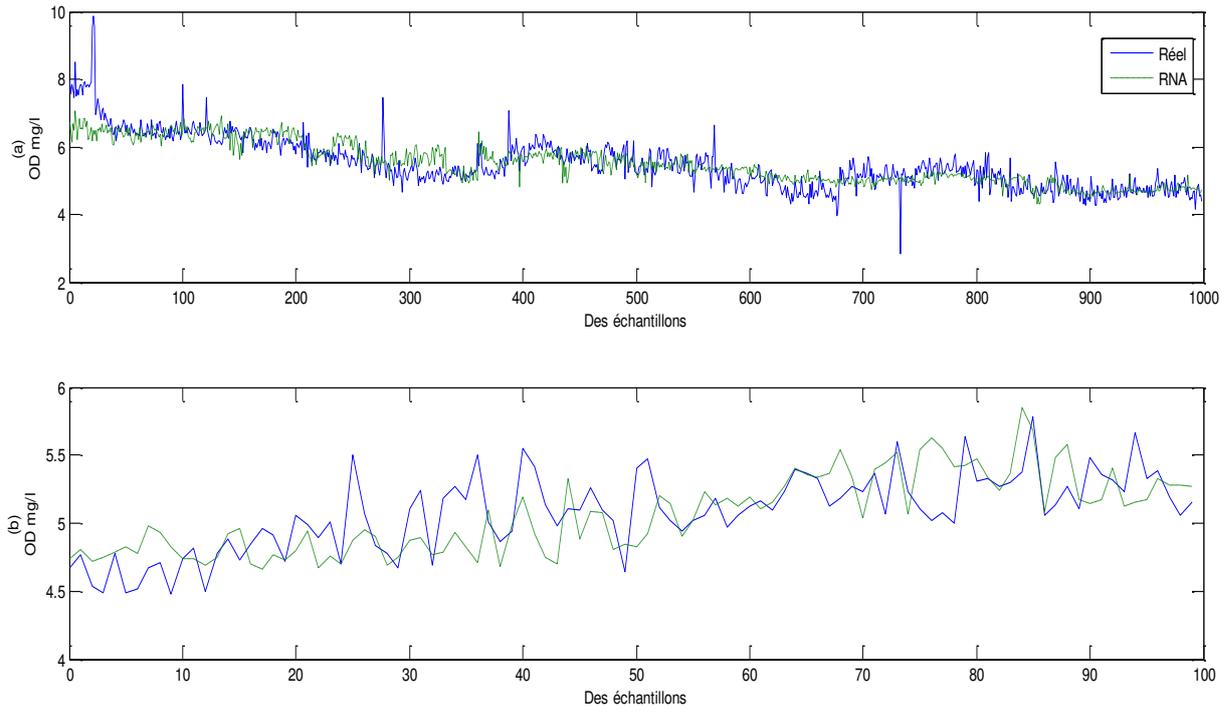


Figure III. 7. Modèle RNA 4.

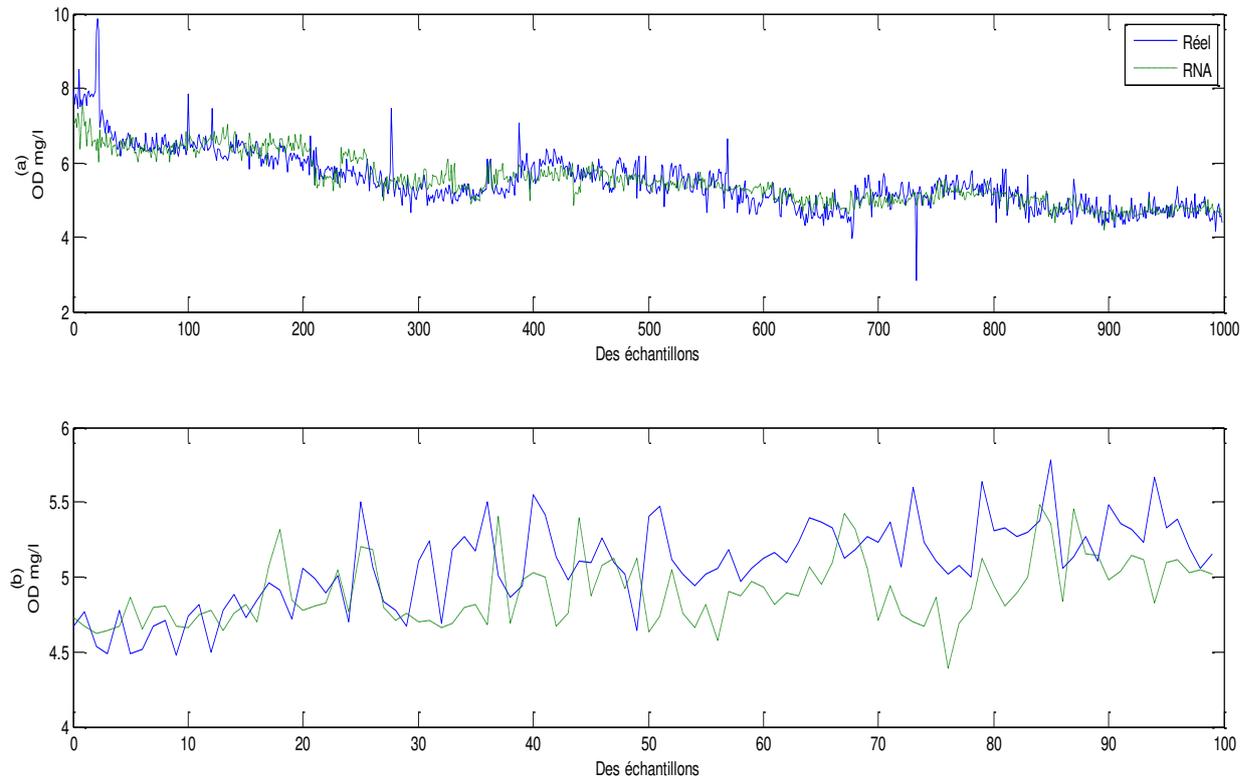


Figure III. 8. Modèle RNA 5.

5.3. Evaluation des performances

En deuxième étape, les données d'apprentissage et de test doivent être évalués en calculons les erreurs de sortie. Il existe plusieurs critères d'erreur, mais dans notre travail on a utilisé ces trois :

L'erreur quadratique moyenne MSE (*Mean Square Error*) :

$$MSE = \sum_i^N (|Y_1(i) - T_1(i)|)^2 / N \quad (\text{III.3})$$

L'erreur absolue moyenne MAE (*Mean Absolute Error*) :

$$MAE = \sum_i^N (|Y_1(i) - T_1(i)|) / N \quad (\text{III.4})$$

La racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE (*Root MSE*) :

$$RMSE = \sum_i^N [(|Y_1(i) - T_1(i)|)^2 / N]^{1/2} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

N : Le nombre d'échantillon d'essai.

$Y_1(i)$, $T_1(i)$: Les valeurs mesurées et estimées des paramètres utilisés respectivement.

En ce qui suit une comparaison statistique entre les différents modèles proposés en utilisant les trois critères d'erreur précédant :

Tableau III. 2. Les erreurs statiques correspondantes à chaque modèle.

<i>Modèle</i>	<i>Architecture de RNA</i>	<i>MAE</i>	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>
1	4x 5x1	0.0457	0.0171	0.1307
2	4x 8x1	0.0542	0.0241	0.1552
3	4x 15x1	0.0511	0.0222	0.1490
4	4x 25x1	0.0347	0.0120	0.1097
5	4x 50x1	0.0346	0.0012	0.1098

D'après les résultats des différents modèles (tableau III.2), nous pouvons constater que la meilleure performance est obtenue par le quatrième modèle selon les trois critères d'erreurs utilisés. Les poids et les biais de ce modèle peuvent être gardés pour une éventuelle implémentation réelle permettant de garantir une bonne alternative aux capteurs physiques défaillants.

5.4. Détection de défaillance du capteur physique

La dernière étape de simulation est la détection de défaillance du capteur physique pour montrer l'utilité du capteur logiciel dans la surveillance de la qualité de l'eau. Il s'agit de développer un programme qui dispose des mesures réelles du capteur physique et des valeurs « prédites » par le capteur logiciel, nous avons simulé la défaillance du capteur physique en effectuant une multiplication de la mesure par une variable aléatoire à partir du 70^{ème} échantillon, le programme compare la mesure réelle avec la valeur prédite par le capteur logiciel et décide quelle est la valeur entre les deux qui doit être retenue pour l'utiliser dans le bilan de surveillance. Nous avons adopté la valeur de 15% d'erreur relative comme admissible qui est la valeur pour laquelle le modèle choisi pour ce test (modèle 4) a atteint un taux de reconnaissance de 100% (voir tableau III.1), la décision est prise comme suit :

- Si l'erreur relative est inférieure à 0.15, la mesure retenue est celle du capteur physique
- Si non, la mesure prédite par le capteur logiciel qui est retenue.

La figure (III.9) monte le résultat obtenu par ce programme.

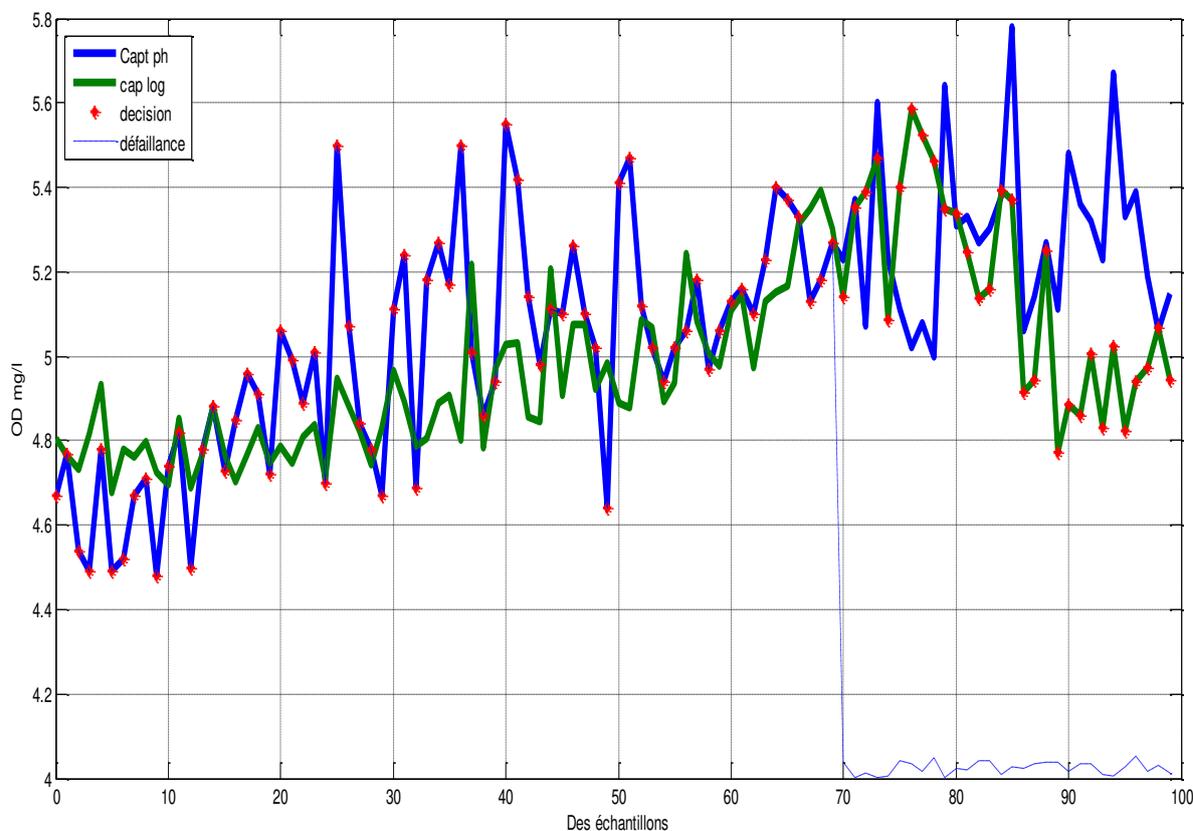


Figure III. 9. Résultat de test de défaillance.

D'après la figure on remarque bien que la courbe de décision suit bien la courbe du capteur physique avant sa défaillance et s'oriente vers la courbe de capteur logiciel après la défaillance (au 70^{ème} échantillon) ce qui confirme le bon fonctionnement de ce programme et la possibilité d'intégrer réellement ce capteur logiciel dans un système de surveillance de la qualité de l'eau pour remplacer un capteur défaillant.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle permettant d'estimer une grandeur physique sans la mesurer en utilisant des données expérimentales en basant sur les RNA. Les résultats rapportés dans ce chapitre confirment que le choix de l'architecture MLP avec les paramètres physico-chimiques : le pH, la température, la conductivité et la turbidité, peut servir comme moyen de remplacement d'un capteur physique défectueux, d'effectuer une mesure difficile à atteindre par les méthodes conventionnelles et d'éviter les tâches pénibles et répétitives qui sont relatives aux mesures effectuées dans le cas de surveillance de la qualité des eaux.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Nous avons tenté dans ce travail de montrer l'intérêt et l'apport des méthodes connexionnistes dans la réalisation d'un capteur logiciel pour la surveillance de la qualité de l'eau. À l'heure actuelle les normes de qualité de l'eau sont de plus en plus drastiques. Cela oblige les producteurs d'eau potable tels que les stations de traitement de garantir une qualité optimale de l'eau de consommation.

Au niveau du mémoire présenté, le premier chapitre a servi de donner une idée générale du domaine de surveillance des eaux dans lequel nous avons décrit les différentes techniques utilisées pour l'analyse et le traitement de cette ressource vitale. L'accent a été mis sur les différentes étapes de la chaîne de traitement des eaux destinées à la consommation humaine et les paramètres souvent relevés pour maîtriser sa qualité. Dans le second chapitre nous avons présenté la technique des RNAs, ses différentes architectures et ses algorithmes d'apprentissage. Le dernier chapitre a fait l'objet d'une évaluation des performances de l'application proposée. Une validation de choix de la technique des RNAs adoptée a été effectuée, où des tests de simulation ont permis de vérifier ses capacités et ses limites.

Par rapport aux résultats satisfaisants obtenus en utilisant des mesures réelles effectuées dans une station de traitement des eaux, l'implémentation et l'intégration des capteurs logiciels dans une chaîne de traitement restent envisageables pour donner plus de fiabilité et de précision aux mesures effectuées par les capteurs physiques et pour éviter les tâches répétitives et pénibles rencontrées dans la mesure de certains paramètres nécessitant des analyses aux laboratoires.

- [1] S.ACHOUR : « **Incidence des procédés de chloration, de floculation et d'adsorption sur l'évolution de composés organiques et minéraux des eaux naturelles** ». Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences Hydrauliques. Université de Tizi-Ouzou, 2001.
- [2] M-S. Ouali : « **Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux** ». P 1-6. Deuxième édition. ISBN : 978-9961.0.0520.0.
- [3] N.Valentin : « **Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eau potable** ». Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne, France, Décembre 2000.
- [4] E. Schmidt : « **Properties of Water and Steam in SI-Units** ». Deuxième édition. New York (USA), 1969. ISBN: 3540096019, 9783540096016.
- [5] J.Reece, L.Urry, M.Cain, S.Wassermann, P.Minorsky, R.Jackson: « **Campbell Biology** ». Neuvième édition. 2012. ISBN-13 : 978-0321558237.
- [6] SA.Degrémont : « **Mémento technique de l'eau** »- Tomes 1. Lavoisier - Technique et documentation, Paris, 2005. ISBN-10 : **2743007176**.
- [7] L.Buisson : « **L'eau** ». Edition : Cannes publications de l'Ecole moderne française. France, 1987.
- [8] R. Desjardins : « **Le traitement des eaux** ». Deuxième édition. Revue et enrichie. Montréal, Janvier, 1990.ISBN : 978-2-553-00643-2.
- [9] KK.Guy-Romain : « **Les énergies : l'eau source et facteur de vie Paris** ». Agence de coopération culturelle et technique, 2006.
- [10] PH.Quevauviller, K.C.Thompson: «**Analytical Methods for drinking Water : Advances in Sampling and Analysis**». John Wiley & Sons Ltd, England, 2006. ISBN : 0-470-09491-5.
- [11] A. Marquis : « **L'eau potable : une ressource à économiser** ». Horizon environnement. Vol. 1, no.2, P.21-25, Québec 1994. .

- [12] E. Roberts Alley: « **Water quality control handbook**». Deuxième édition. United States, 2007. ISBN : 0-07-150870-8.
- [13] J.Rodier : « **Analyse de l'eau** ». Huitième édition. France. ISBN : 978-2-10-049636-5.
- [14] « **L'état du Saint-Laurent : Volume2** ». Éditions MultiMondes, Montréal. Coll. Québec, Canada.
- [15] JF.Bibeault : « **Bilan Saint-Laurent**». Comité de santé environnementale du Québec. Québec, Canada, 2006.
- [16] Sainte-Foy : « **Ma santé, mon environnement** ». Sainte-Foy, Québec : Publications du Québec, Volume 1, P.21-25. 1995.
- [17] J. Chartrand, J.-F. Duchesne et D. Gauvin : « **Synthèse des connaissances sur les risques à la santé humaine reliés aux usages du secteur d'étude** ». Rapport technique. Institut national de santé publique du Québec, Montréal (Québec). Décembre, 1999.
- [18] J.C.Boeglin : « **Analyses des eaux résiduaires. Mesures de la pollution** ». Traité Analyse et Caractérisation, volume P5. 1997.
- [19] D.Armand : « **L'eau en danger** ». Edition : Milan. Toulouse, France, 1998. ISBN : 0000 0003 6035 04874.
- [20] A.Pochon : « **Du champ à la source : retrouver l'eau pure** ». Edition : Trégueux : CEDAPA.France, 1991. ISBN : 2852570122 9782852570122.
- [21] SA.Degrémont : « **Mémento technique de l'eau - Tomes 2** ». Lavoisier - Technique et documentation, Paris, 2005. ISBN 13 : 9782743007171.
- [22] C.Cardot : « **Les traitements de l'eau, procédés physico-chimiques et bactériologiques, cours et problèmes résolus** ». Ellipses édition marketing.1999.

- [23] F.Valiron : « **Gestion des Eaux : alimentation en eau – assainissement- Tome 2** ». Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 1989.
- [24] W.J. Masschelein : « **Processus unitaires du traitement de l'eau potable** ». Édition : CEBEDOC. 1996. ISBN : 9782870800355.
- [25] F. Edeline : « **L'épuration physico-chimique des eaux résiduaires** ». Théorie et technologie. Quatrième édition, Coédition Cebedoc.1988.
- [26] M.Weinfeld : « **Réseaux de neurones** ». Technique de l'ingénieur, H1990, 2003.
- [27] A.K. Jain, J. Mao et K.M. Muhiuddin: « **Artificial neural network: a tutorial** ». IEEE Computer Society, vol.29, n° 03, pp 31-44, March 1996.
- [28] R.P. Wurtz: « **Neural theories and technical systems for face recognition** ». European symposium on artificial neural networks ESANN 97, n° 5, pp 73-78, Belgium, April, 1997.
- [29] B.Gosselin : « **Application de réseaux de neurones artificiels à la reconnaissance automatique de caractères manuscrits** ». Thèse de doctorat, faculté polytechnique de Mons, 1996.
- [30] M. Bentoumi : « **Outils pour la détection et la classification. Application au diagnostic de défauts de surface de rail** ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1, 2006.
- [31] M.T. Evangelia: « **Supervised and unsupervised pattern recognition feature extraction and computational intelligence** ». CRC press LLC, 2000.
- [32] G. Dreyfus : « **Les réseaux de neurones** ». Thèse de doctorat. Ecole supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), Septembre, 1998.

- [33] F.Elle : « **Conception et réalisation d'un système utilisant des réseaux de neurones des réseaux de neurones pour l'identification et la caractérisation, à bord de satellites, de signaux transitoires de type sifflement** ». Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 1997.
- [34] J. Rude : « **Développement d'un modèle statistique neuronal pour la description fine de la pollution par le dioxyde d'azote : application à la région parisienne** ». Thèse de doctorat. Université Paris XII, 2008.
- [35] M.Kherchi et M.D.Smaïli : « **Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA** ». Mémoire de magister. Ecole nationale polytechnique (ENP). Alger, 2009.
- [36] R. Lippmann: « **An introduction to computing with neural nets** ». IEEE ASSP Magazine, volume 4, n° 2, pp 4-22, Avril 1987.
- [37] Y, Le Bihan, J.Pavo et C. Marchand: « **Characterization of small cracks in eddy current testing** ». Eur .Phys. J. Appl. Phys, volume 43, pp 231-237, 2008.
- [38] S. Haykin: « **Neural networks: a comprehension foundation** ». 2nd Edition, Prentice Hall, 1999.
- [39] T. Kohonen: « **Self-organized formation of topological correct feature maps** ». Biological Cybernetics, pp 59-69, 1982.
- [40] G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, M.B. Gordon, F. Badran, S. Thiria et L. Héroult: « **Réseaux de Neurones : Méthodologie et Applications** ». Eyrolles, 2002.
- [41] J.A. Freeman, D.M. Shapriua: « **Neural Networks: algorithms, Application and Programming** ». Techniques Addison Wesley Publishing Company, INC, 1991.
- [42] M.Parizeau : « **Réseau de neurone** ». Thèse de doctorat. Univrsité de Laval, France, 2006.

- [43] M. R. Zemouri : « **Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la maintenance** ».Thèse de Doctorat. Université de Franche-Comté, 2003.
- [44] M.H. Hassoun: « **Fundamentals of Artificial Neural Networks** ». The MIT Press, 1995.
- [45] D.C. Psychogios et L.H. Ungar: « **A hybrid neural network-first principles approach to process modelling** ». AIChE J, volume 38, pp 2269-2276, 1992.
- [46] O. Benzaim : « **Technique multiport pour la conception et la réalisation de systèmes Micro-ondes dédiés à l'évaluation non destructive de matériaux** ». Thèse de doctorat, Université de Lille1 (France), 2009.
- [47] F. Cau, A. Fanni, A. Montisci, P. Testoni et M. Usai : « **Artificial Neural Networks for Non-Destructive Evaluation with Ultrasonic Waves in not Accessible Pipes**». IEEE XDL, pp 685-692, Mai, 2005.
- [48] J.J. Hopfield: « **Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities** ». Proc. Nat. Acad. Sci., pp 2554-2558, 1982.
- [49] F. Rosenblatt: « **The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton** ». Technical report, Cornell Aeronautical Lab, New York (USA), 1957.
- [50] P. Gallinari, S. Thiria, Y. Lechevallier, O. Gascuel et S.Canu : « **Statistiques et méthodes neuronales** ». Chapitre 14, pp.230-243. Dunod, Paris, 1997.
- [51] R.Lippmann, L.Kukolich et D.Shahian: « **Predicting of Complications in Coronary Artery bypass Operations using Neural Networks** ». Menlo Park, CA: MIT Press, pp 1055-1062, 1995.
- [52] <https://www.deeplearning4j.org>, consulté le 02/08/2018.

[53] D. Graupe: « **Principals of artificial neural** ». 2nd Edition, World Scientific Publishing, 2007.

[54] C. Touzet: « **Les réseaux de Neurones Artificiels : Introduction au connexionnisme** ».Thèse de doctorat, juillet,1992.

[55] Sanchez, E., Colmenarejo, M-F., Vicente, J., Rubio A., Garcia, M-G., Travieso, L., Borja, R : « **Use ofthe water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution** ». Ecological Indicators, Vol. 7, No. 2, pp.315-328,2007.

[56] Directives de qualité pour l'eau de boisson, 2ème édition. Vol. 1 : Recommandations, OMS, Genève, 1994 éditions françaises, Critères d'acceptabilité.

[57] Description du fonctionnement et de l'exploitation de la Station de Traitement d'eau Potable de Bouira.

[58] Zacheus, O-M., Martikainen and P-J: « **Physicochemical quality of drinking and hot waters in Finnish buildings originated from groundwater or surface water plants** ». The Science of the Total Environment, Vol. 204, No. 1, pp.1-10, 1997.

[59] Hennig, K., de Vries, T., Paetzold, R., Jantos, K., Voss, E. and Anders: « **Multi sensor system for fast analysis in environmental monitoring with an application in waste water treatment** ».Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, pp.61-67, 2000.

Résumé

Dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'eau, il existe un grand nombre de capteurs physiques qui peuvent prendre beaucoup de temps dans les étapes de mesure et de traitement pour plusieurs raisons, telles que le coût élevé de certains capteurs, leur nombre, l'opération de nettoyage et les procédures d'étalonnage ce qui rend leur fonctionnement difficile à garantir. Cependant, l'approche des capteurs logiciels peut fournir un moyen efficace et économique pour résoudre ce problème. L'oxygène dissous (OD) représente un paramètre très important de la qualité de l'eau. Sa mesure se fait classiquement par des sondes spécifiques mais avec des conditions de mesure très strictes d'où l'émergence de méthodes de prédiction pour effectuer une mesure efficace. Dans ce travail, nous proposons un capteur souple permettant l'estimation de l'OD dans les eaux de surface où l'architecture de réseau neuronal artificiel (RNA) est utilisée comme modèle de prédiction. L'implémentation et l'intégration des capteurs logiciels dans une chaîne de traitement reste envisageable pour donner plus de fiabilité et de précision aux mesures effectuées par les capteurs physiques et pour éviter les tâches répétitives et pénibles rencontrées dans la mesure de certains paramètres nécessitant des analyses aux laboratoires.

Mots-clés: surveillance de la qualité de l'eau, oxygène dissous, capteur logiciel, RNA.

Abstract

In the field of water quality monitoring, there are a large number of physical sensors that can take a lot of time in the measuring and processing stages for several reasons, such as the high cost of some sensors, their number, the cleaning operation and the calibration procedures which make their operation difficult to guarantee. However, the soft sensor approach can provide an effective and economical way to solve this problem. Dissolved oxygen (DO) is a very important parameter in the water quality control. Its measurement is done conventionally by specific probes but with very strict measurement conditions from which the emergence of prediction methods to perform a soft measurement. In this work, we propose a flexible sensor allowing the estimation of the OD in surface waters where the Artificial Neural Network (ANN) architecture is used as a prediction model. The implementation and integration of soft sensors in a treatment chain is still possible to give more reliability and precision to the measurements made by physical sensors and to avoid the repetitive and painful tasks encountered in the measurement of some parameters requiring analysis in laboratories.

Keywords: water quality monitoring, dissolved oxygen, soft sensor, ANN.

المخلص

في مجال مراقبة جودة المياه ، هناك عدد كبير من اللواظ المادية التي يمكن أن تستغرق الكثير من الوقت في مراحل القياس والمعالجة لعدة أسباب ، مثل التكلفة المرتفعة لبعض الأجهزة ، عددها ، عملية التنظيف وإجراءات المعايرة التي تجعل من الصعب تشغيلها. ومع ذلك ، يمكن للواظ البرمجية توفير وسيلة فعالة واقتصادية لحل هذا المشكل. الأكسجين الذائب هو معيار مهم جدا في مجال مراقبة نوعية المياه ويتم قياسه بطريقة تقليدية بواسطة أجهزة محددة ولكن بشروط قياس صارمة للغاية. في مشروعنا هذا نقترح لاقظ برمجي يسمح بتقدير الأكسجين الذائب في المياه السطحية حيث يتم استخدام بنية الشبكة العصبية الاصطناعية (RNA) كنموذج تنبؤ لإعطاء مزيد من الفعالية و الدقة للقياسات التي تجريها اللواظ المادية و لتجنب تكرار المهام التي تمت مواجهتها في قياس بعض المعايير التي تتطلب تحليلات مخبرية.

الكلمات المفتاحية: مراقبة جودة المياه ، الأكسجين الذائب ، اللواظ البرمجية ، الشبكة العصبية الاصطناعية (RNA).