



**Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira**  
**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie Électrique**  
**Spécialité Électronique des Systèmes Embarqués**



---

## **Mémoire de Master**

**Présenté au**

**Département : Génie Électrique**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Electronique**

**Spécialité : Electronique des systèmes embarqués**

**Réalisé par :**

AMIRAT Salem

Et

SAADI Brahim

## **Thème**

---

# **Etude et réalisation d'un système de télésurveillance de la qualité des eaux**

---

Soutenu le: 30 / 06 / 2024

Devant le Jury composé de :

Mr :

- |                   |       |              |            |
|-------------------|-------|--------------|------------|
| • SAOUDI Kamel    | Prof. | Univ. Bouira | Président  |
| • BENZIANE Mourad | M.C.B | Univ. Bouira | Rapporteur |
| • MEDJEDOUB Smail | M.A.A | Univ. Bouira | Examineur  |

## Dédicaces

*A mon père*

*Mon père ,même si je t'ai perdu il y a deux ans, je ne peux pas t'oublier, peut importe le temps que cela prendra , tes souvenirs sont toujours dans mon esprit et ton amour est toujours dans mon cœur, je veux t'offrir ces mots même si tu les pas là, je veux te dire que depuis le moment ou j'ai vécu jusqu'au jour de ta mort j'ai dépendu de toi parce que je n'ai pas vu une personne complète dans ma vie comme toi, je tire toujours ma force de toi, ce que j'ai atteint aujourd'hui c'est a grâce a votre éducation, vos conseils et votre soutien, la chose que j'ai le plus souhaité dans ma vie est de voire mon succès avec votre présence le jour de ma soutenance, mais ce n'est pas possible et je suis certain que vous le voyez, ce succès est pour toi , merci mon père.*

*A ma mère*

*Ma mère, la personne qui ma donné la vie, peut importe le bien que je ta fait, il ne peut pas être aussi bon que le bien que tu as fait pour moi et mes frères, tu me salues toujours avec un visage souriant et je te trouve toujours a mes cotes peu import la situation. Ton fardeau sur moi est ce qui m'a donné la force pour arriver a ce succès, je te dédie ce succès avec tout mon amour, merci ma mère.*

*A mes chers frères Djamel et Nadire.*

*A mes chères sœurs Sabrina et Mouna.*

*A mes amis.*

*A tous mes enseignants tout au long de mon parcours académique.*

***Brahim***

## Dédicaces

*À mon père, qu'il repose en paix, dont l'absence a laissé un vide immense dans ma vie, mais dont les valeurs, les enseignements et l'amour continuent de guider chacun de mes pas. Ce travail est dédié à sa mémoire et à son inspiration constante.*

*À ma mère, pour son amour inconditionnel, son soutien indéfectible et ses sacrifices innombrables. Merci d'avoir toujours cru en moi et d'avoir été mon pilier dans les moments difficiles.*

*À mes deux sœurs, pour leur présence réconfortante, leurs encouragements et leur complicité. Vous avez été mes premières amies et mes modèles de persévérance et de résilience.*

*À mes amis, Fares et Kousseïla, pour leur amitié précieuse, leur soutien moral et leurs conseils avisés tout au long de ce parcours. Votre présence a rendu cette aventure moins solitaire et plus enrichissante.*

*Ce mémoire est le fruit de nos efforts conjoints, de vos encouragements et de votre amour. Je vous en suis éternellement reconnaissant.*

*Salem*

# Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu qui a ouvert notre esprit et nous a donné la force, la détermination et la patience pour mener à bien ce travail avec perfection et succès.

Nous adressons nos grands remerciements à toutes les personnes qui nous ont accompagnés et nous ont aidés tout au long de ce travail, particulièrement :

À notre encadreur M. *BENZIANE MOURAD* pour son accueil avec tout le respect et sa présence en cas de besoin et à tout moment, grâce à ses conseils et son orientation, nous avons réalisé ce travail. La réussite de ce projet est grâce à lui qui nous a dirigés sur la voie du succès et comment résoudre et débarrasser des problèmes auxquels nous avons été confrontés dans notre travail.

Aux responsables de l'institut de l'université de Bouira pour leur accueil, et nous ont donné les composants électroniques que nous avons utilisés dans la réalisation de notre système.

Nous remercions tous les professeurs qui nous ont enseigné tout au long de notre parcours universitaire.

Nous remercions les membres du jury de nous avoir honorablement acceptés et de juger ce travail.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous les membres de la famille et aux amis pour nous avoir encouragés dans ce travail.

# Résumé

Dans ce mémoire nous proposons la réalisation d'un système de télésurveillance de la qualité des eaux destinées pour une consommation humaine. Le système réalisé est basé dans sa partie matérielle sur l'utilisation de quatre capteurs spécifiques de grande précision permettent de mesurer les paramètres physico-chimiques : pH, température, conductivité et turbidité, ainsi qu'une carte ESP32 chargé du traitement des données. La partie soft a pour tâche l'acquisition des données provenant des capteurs ainsi que le calcul du réseau de neurones jouant le rôle de classifieur de potabilité de l'eau et qui est préalablement entraîné sur PC en utilisant une base de données réelle. L'ensemble de toutes ces informations sont transmises en temps réel vers la plateforme Blynk pour l'affichage.

**Mots clés :** Réseau de neurones artificiels, télésurveillance de la qualité d'eau, potabilité d'eau, classification, capteurs, acquisition.

---

# Abstract

In this thesis, we propose the implementation of a remote monitoring system for the quality of water intended for human consumption. The hardware part of the system is based on the use of four high-precision specific sensors that measure physico-chemical parameters: pH, temperature, conductivity, and turbidity, along with an ESP32 board responsible for data processing. The software part is tasked with acquiring data from the sensors and calculating the neural network, which acts as a classifier for water potability and is previously trained on a PC using a real database. All this information is transmitted in real-time to the Blynk platform for display.

**Keywords:** Artificial neural network, remote monitoring of water quality, water potability, classification, sensors, acquisition.

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>I</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>II</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>VI</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>VII</b>
<b>Listes des Acronymes et Symboles</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur l'eau</b> .....	<b>3</b>
1. Introduction.....	4
2. Définitions de l'eau .....	4
3. Cycle de l'eau .....	4
4. Les formes physiques de l'eau.....	6
4.1. Solide .....	6
4.2. Liquide .....	6
4.3. Gazeuse.....	6
5. L'importance de l'eau .....	7
6. Les types des eaux.....	7
6.1. Eau de mer .....	7
6.2. Eau souterraine .....	7
6.3. Eau de pluie.....	7
6.4. Eau de surface .....	7
6.5. Eau de ville.....	7
7. La potabilité de l'eau.....	7
7.1. Eau potable.....	7
7.2. Eau non potable .....	8
8. Les paramètres de qualité de l'eau .....	8
8.1. Les paramètres organoleptiques .....	8
8.1.1. La couleur .....	8
8.1.2. L'odeur .....	8
8.2. Les paramètres physiques et chimiques .....	8
8.2.1. La température de l'eau.....	8
8.2.2. La conductivité de l'eau .....	9
8.2.3. Le potentiel d'hydrogène.....	10
8.2.4. La turbidité de l'eau .....	11

9.	La pollution de l'eau .....	12
9.1.	Pollution physique .....	12
9.2.	Pollution chimique.....	12
9.3.	Pollution biologique.....	13
10.	Analyse des eaux.....	13
10.1.	Echantillonnage .....	13
10.2.	L'analyse .....	13
10.3.	L'interprétation.....	14
11.	Les normes de rejet .....	14
11.1.	Normes internationales.....	14
11.2.	Normes Algériennes.....	15
12.	Conclusion .....	15
	<b>Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels.....</b>	<b>16</b>
1.	Introduction.....	17
2.	L'historique des réseaux de neurones artificiels.....	17
3.	Le neurone biologique.....	18
3.1.	Le corps cellulaire (soma).....	18
3.2.	Les dendrites (entrée du neurone).....	18
3.3.	L'axone (sortie du neurone) .....	18
3.4.	Les synapses.....	18
4.	Le neurone formel.....	19
4.1.	Fonctionnement d'un neurone formel.....	19
4.2.	Fonction d'activation .....	20
5.	Les réseaux de neurones .....	21
5.1.	Construction d'un réseau de neurone.....	21
5.2.	Architecture des réseaux de neurones .....	22
5.2.1.	Réseaux non bouclés (feed-forward).....	22
5.2.2.	Réseaux bouclés (feed-back) .....	23
5.3.	Apprentissage des réseaux de neurones .....	23
5.3.1.	Apprentissage supervisé .....	24
5.3.2.	Apprentissage semi supervisé.....	24
5.3.3.	Apprentissage non supervisé .....	24
5.4.	Les types des réseaux de neurones .....	24
5.4.1.	Les réseaux de Hopfield.....	24
5.4.2.	Les réseaux de Kohonen ou les cartes auto-organisatrices.....	24

5.4.3.	Les perceptrons .....	25
5.4.3.1.	Le perceptron simple (monocouche) .....	25
5.4.3.2.	Le perceptron multicouche .....	26
a.	Architecture .....	26
b.	Equation du réseau MLP .....	27
c.	L'apprentissage avec la retro propagation (Back Propagation) .....	27
d.	La théorie de la généralisation .....	28
e.	Amélioration de la généralisation .....	28
f.	Le classificateur du perceptron multicouche .....	29
6.	Application des réseaux de neurones artificiels .....	29
7.	Conclusion .....	30
<b>Chapitre III : La réalisation et la présentation des résultats .....</b>		<b>31</b>
1.	Introduction.....	32
2.	Description de système.....	32
3.	Description des composants .....	32
3.1.	Esp32 .....	32
	Caractéristiques principales .....	33
3.2.	Capteur de pH.....	34
	Caractéristiques principales .....	34
3.3.	Capteur de température .....	36
	Caractéristiques principales .....	36
3.4.	Capteur de conductivité .....	38
	Caractéristiques principales .....	38
3.5.	Capteur de turbidité .....	40
	Caractéristiques principales .....	40
4.	Création du réseau de neurones .....	41
4.1.	Matlab.....	41
4.2.	La base de données .....	41
4.3.	Choix de l'architecture du réseau de neurones .....	41
5.	Acquisition de données .....	42
5.1.	Présentation de l'application Blynk.....	42
5.2.	Création d'une interface pour notre projet .....	42
6.	Programmation Arduino .....	45
6.1.	Arduino IDE.....	45
7.	Le schéma et le câblage .....	46
7.1.	Tableau du câblage .....	46



7.2.	Schéma Fritzing.....	47
8.	Schéma synoptique.....	48
9.	Mise en œuvre et évaluation .....	48
9.1.	Architecture de réseau de neurones artificiels .....	48
9.1.1.	Phase d'apprentissage .....	48
9.1.2.	Evaluation des performances .....	48
9.1.3.	Implémentation du réseau dans la carte ESP32 .....	49
9.2.	Les résultats obtenus sur la plateforme Blynk.....	51
10.	Image de système réalisé .....	51
11.	Conclusion .....	52
	<b>Conclusion générale</b> .....	53
	<b>Références bibliographiques</b> .....	54

## Liste des figures

Figure 1 :	Molécule de l'eau [2] .....	4
Figure 2 :	Cycle de l'eau .....	5
Figure 3 :	Cycle d'approvisionnement en eau [4]. .....	5
Figure 4 :	Les trois formes physiques de l'eau [6]. .....	6
Figure 5 :	Unités de mesure de température [12]. .....	9
Figure 6 :	Unités de mesure de conductivité. ....	10
Figure 7 :	Echelle de pH [18]. .....	11
Figure 8 :	Les différents degrés de turbidité [20].....	12
Figure 9 :	Schéma d'un neurone biologique [29].....	19
Figure 10 :	Modèle d'un neurone artificielle. ....	19
Figure 11 :	Un exemple de réseau de neurones à trois couches [41].....	22
Figure 12 :	Structure d'un réseau de neurones artificiels non bouclé.....	23
Figure 13 :	Structure d'un réseau de neurones artificiels bouclé. ....	23
Figure 14 :	Les grands types des réseaux de neurones artificiels. ....	24
Figure 15 :	Architecture d'un perceptron monocouche. ....	25
Figure 16 :	Architecture d'un perceptron multicouche. ....	26
Figure 17 :	ESP32.....	34
Figure 18 :	Capteur de pH (pH-4502C). ....	36
Figure 19 :	Capteur de température DS18B20 .....	38
Figure 20 :	Capteur de conductivité.....	39

Figure 21 : Capteur de turbidité.....	41
Figure 22 : Clé de configuration du microcontrôleur .....	45
Figure 23 : Interface de logiciel Arduino IDE .....	46
Figure 24 : Schéma Fritzing .....	47
Figure 25 : Schéma de notre réseau de neurones artificiels .....	50
Figure 26 : Les performances du réseau de neurones artificiels .....	50
Figure 27 : Exemple de l'eau potable.....	51
Figure 28 : Exemple de l'eau non potable .....	51
Figure 29 : Schéma synoptique .....	48
Figure 30 : Image de système réalisé.....	52

## **Liste des tableaux**

Table 1 : Normes de rejets internationales [25].....	14
Table 2 : Les fonctions d'activations des réseaux de neurones artificiels [37] .....	20
Table 3 : Capteur de pH.....	46
Table 4 : Capteur de température .....	46
Table 5 : Capteur de turbidité.....	47
Table 6 : Capteur de conductivité.....	47
Table 7 : Les performances et les erreurs correspondantes à chaque modèle .....	49

# Listes des Acronymes et Symboles

**A** : Pin analogique

**ADC**: Analogue-Digital Converter

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

**DAC**: Digital-Analogue Converter

**DC**: Direct current

**FTU**: Formazin Turbidity Unit

**GHz**: Giga Hertz

**GPIO**: General Purpose Input/Output

**GND**: Ground (La terre)

**IDE**: Integrated Development Environment

**IoT**: Internet of Things

**JTU**: Jackson Turbidity Unit

**K**: Kelvin

**KB**: Kilobyte

**MLP**: Multi Layer Perceptron

**MB**: Megabyte

**mA** : Milliampère

**mg/l** : Milligramme par litre

**MHz** : Mega Hertz

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

**NTU** : Nephelometric Turbidity unit (Unité de turbidité néphélogétries)

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**pH** : Potentiel Hydrogène

**ppm** : Partie par million

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

**RMSE** : Root Mean Square Error (La racine de l'erreur quadratique moyenne)

**RNA** : Réseaux de Neurones Artificiels

**RP** : Retro Propagation

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

**T** : Température

**TDS**: Total dissolved solids

**USB**: Universal Serial Bus

**VCC** : Tension au collecteur commun

**$\mu\text{S/cm}$**  : microsiemens par centimètre

**$^{\circ}\text{C}$** : Degré Celsius

**$^{\circ}\text{F}$**  : Degré Fahrenheit

# Introduction générale

L'eau est la source de la vie, c'est une substance sans odeur, sans goût et sans couleur, elle est présente sous différentes formes physiques dans la nature et elle recouvre 71% de la surface globale de la terre [1]. L'eau est présente dans plusieurs activités humaines, notamment domestiques, industrielles ou agricoles, ce qui la rend plus exposée à la pollution, en conséquence l'eau potable devient de plus en plus rare, la cause de cette dégradation de qualité est les déchets industriels, les produits chimiques. La demande en eau de bonne qualité augmente et cela à cause de la croissance de la population et le développement de l'industrie, donc l'opération de contrôle et de surveillance devient de plus en plus importante pour assurer l'approvisionnement des consommateurs en eau potable [1].

La méthode classique de surveillance et de contrôle de la qualité de l'eau s'effectue manuellement, en prenant des échantillons de l'eau en question et les déplacer au laboratoire pour faire les différentes analyses, cette méthode a plusieurs inconvénients, elle est coûteuse et nécessite de la ressource humaine, un travail répétitif et pénible pour les opérateurs, de plus, ces analyses ne sont pas précises car les caractéristiques physico-chimiques de l'eau peuvent changer à cause du déplacement de l'échantillon.

Avec les avancées technologiques et le développement du domaine des capteurs, plusieurs dispositifs sont apparus et qui fournissent des mesures précises et en permanence ce qui est idéal pour une telle application de surveillance de la qualité de l'eau.

Notre projet a pour objectif la réalisation d'un système de télésurveillance de la qualité de l'eau basé sur quatre capteurs permettent de mesurer les paramètres physico-chimiques les plus importants : pH, conductivité, turbidité, température, piloté par une carte ESP32, le système est capable également de décider sur la qualité de l'eau (potable ou non potable) en utilisant la technique des réseaux de neurones artificielles (RNA) qui est employé pour mettre en œuvre ce classifieur et qui est entraîné avec une base de données réelle, les signaux issus des capteurs ainsi que la décision du RNA sont ensuite transmises via le réseau wifi vers une interface Blynk pour la visualisation.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les notions générales sur l'eau, les formes physiques de l'eau, la pollution et les normes de rejets. Dans le deuxième, nous parlerons essentiellement des réseaux de neurones artificiels, les différents types des réseaux, l'apprentissage et les différentes applications. Le dernier chapitre sera consacré à

la présentation du matériels utilisés, la création de réseau de neurones, la préparation de la plateforme Blynk et enfin la visualisation des résultats.

# Chapitre I : Généralités sur l'eau



## 1. Introduction

À l'échelle mondiale, l'eau est la substance minérale la plus abondante. C'est une molécule formée par la combinaison d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.

L'eau est donc un facteur important dans le développement et le maintien de la vie sur notre planète, il est donc nécessaire d'assurer et de maintenir la continuité et la qualité de l'eau, non seulement pour fournir à la population la quantité dont ils ont besoin, mais aussi une eau de bonne qualité ou une eau potable.

Dans ce chapitre, nous allons montrer certains aspects relatifs à l'eau d'une manière générale en particulier l'eau potable, ensuite nous allons présenter les différentes formes physiques et différentes propriétés de l'eau ainsi que les paramètres sur lesquelles on se base pour discuter la potabilité, et enfin les normes des rejets internationales et algériennes sont soulignés.

## 2. Définitions de l'eau

L'eau est un liquide inodore et insipide à l'état pur, composé de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène ( $H_2O$ ). Elle se présente sous trois états : liquide, solide (glace) ou gazeux (vapeur d'eau). Toutefois, l'état liquide est le plus courant dans la nature [1].

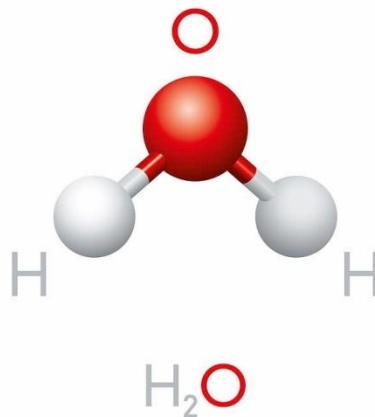


Figure 1 : Molécule de l'eau [2]

## 3. 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 facteur principal de cette circulation est l'énergie solaire [3].



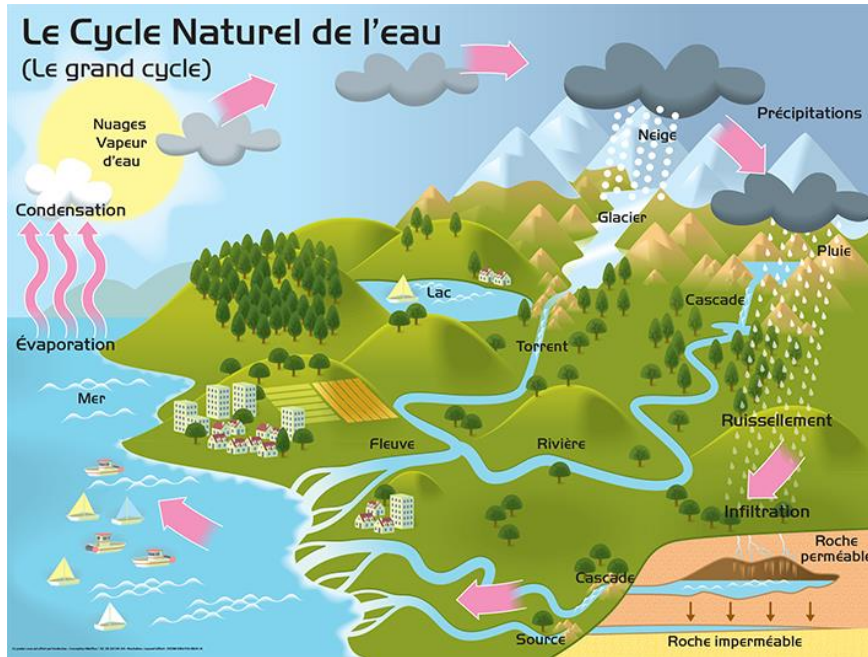


Figure 2 : Cycle de l'eau

Le cycle hydrologique est donc comme une boucle qui tourne en continu et que l'être humain a interprétée pour ses usages, ses besoins quotidiens et ses activités. Pour cela, l'être humain, par ses diverses utilisations de l'eau, intervient de plus en plus dans ce cycle, et il a créé un autre cycle de l'eau plus ou moins néfastes à l'environnement : celui d'approvisionnement en traitement des eaux [4].

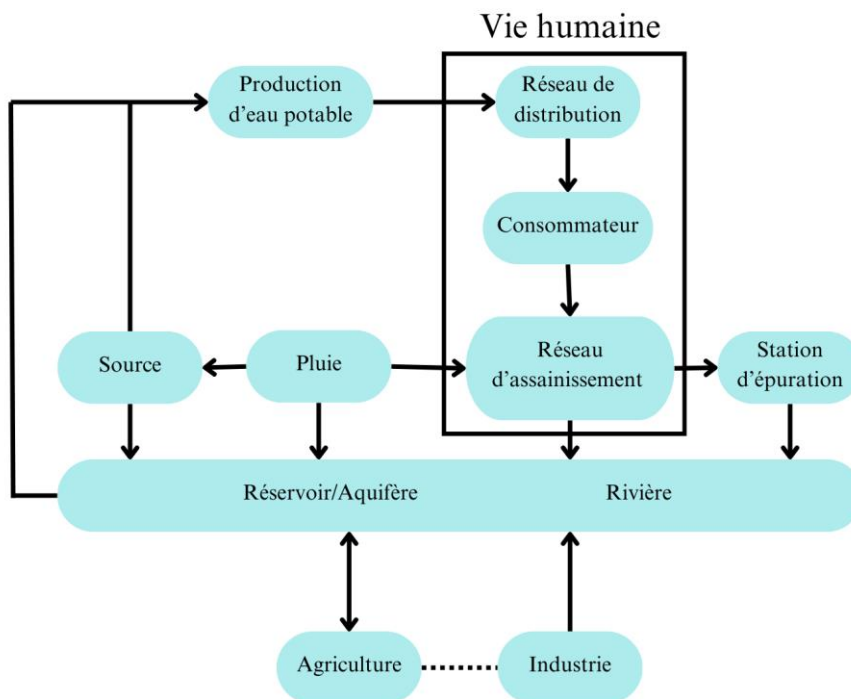


Figure 3 : Cycle d'approvisionnement en eau [4].

## 4. Les formes physiques de l'eau

### 4.1.Solide

L'état solide de l'eau est connu sous le nom de glace. Cet état se forme lorsque l'eau atteint une température inférieure à 0 degré Celsius (ou 32 degrés Fahrenheit) à la pression atmosphérique normale. Lorsque l'eau gèle, ses molécules s'organisent en une structure cristalline qui donne à la glace ses propriétés physiques distinctives, comme sa solidité et sa dureté, par exemple : la neige, le verglas, cubes de glace [5].

### 4.2.Liquide

L'état liquide de l'eau est sa forme la plus courante à température ambiante dans la nature. Dans cet état, les molécules d'eau ne sont pas ordonnées comme dans la glace (état solide), mais plutôt elles sont mobiles et peuvent glisser les unes par rapport aux autres. L'eau liquide conserve sa fluidité et sa capacité à prendre la forme du récipient qui la contient, par exemple : l'eau du robinet, les océans, les lacs, les rivières [5].

### 4.3.Gazeuse

L'état gazeux de l'eau est connu sous le nom de vapeur d'eau. Lorsque l'eau est chauffée à une température élevée (généralement au-dessus de 100 degrés Celsius à la pression atmosphérique normale), elle se transforme en vapeur. La vapeur d'eau est invisible à l'œil nu et se mélange à l'air environnant. Elle est présente naturellement dans l'atmosphère sous forme de gaz et peut se condenser pour former des nuages ou se dissiper dans l'air. La vapeur d'eau est utilisée dans divers processus industriels et domestiques, par exemple : la production d'électricité, le chauffage et la cuisson [5].

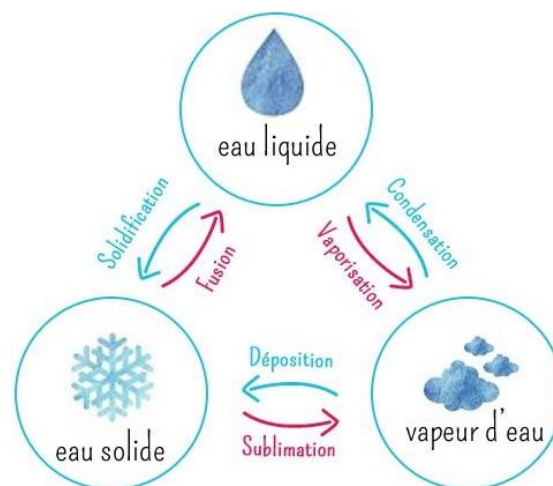


Figure 4 : Les trois formes physiques de l'eau [6].

## **5. L'importance de l'eau**

L'eau est l'un des composants les plus importants et indispensables sur terre, chaque être vivant a besoin de cette substance pour sa survie. L'eau est également utilisée dans divers domaines, par exemple : la production d'énergie électrique, le chauffage et le refroidissement, la construction, l'agriculture et l'utilisation quotidienne dans les habitations.

## **6. Les types des eaux**

### **6.1.Eau de mer**

C'est l'eau qui contient une quantité élevée de sels dissous. Les océans et les mers sont les principales sources d'eau salée. Cette eau a besoin généralement d'être traitée avant qu'elle soit prête pour la consommation humaine [7].

### **6.2.Eau souterraine**

C'est une eau qui est naturellement riche en minéraux et oligo-éléments bénéfiques pour la santé, cette eau est souvent commercialisée pour sa valeur nutritionnelle [7].

### **6.3.Eau de pluie**

C'est l'eau qui est formée par la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique qui retombe sous forme de précipitations (pluie). Elle peut être collectée et utilisée à des fins domestiques ou agricoles [7].

### **6.4.Eau de surface**

C'est l'eau qui se trouve sur la surface de la terre, comme les lacs, les rivières... [7].

### **6.5.Eau de ville**

C'est l'eau douce traitée pour la rendre sûre à boire, elle doit respecter des normes de qualité spécifiques pour être considérée comme potable (les normes d'OMS, *Organisation Mondiale de la Santé*) [7].

## **7. La potabilité de l'eau**

### **7.1.Eau potable**

L'eau potable est une eau consommable par l'être vivant sans risque sur sa vie, elle peut être d'origines diverses. La qualité de l'eau est déterminée si celle-ci est conforme à

des normes portant sur quelques paramètres. L'OMS a mis en œuvre des normes strictes qui fixent les limites de ces paramètres qui sont considérés comme nocives pour la santé s'ils sont dépassés [8].

### **7.2.Eau non potable**

L'eau non potable est une eau qui a perdu sa pureté et qui ne satisfait pas les normes établies par l'OMS. Une eau sale est généralement un mélange de matières polluantes dissoutes ou dispersées dans une eau pure ou utilisée par l'être humain (par exemple : dans l'industrie) [9].

## **8. Les paramètres de qualité de l'eau**

### **8.1.Les paramètres organoleptiques**

Ils concernent la couleur et l'odeur, ces paramètres n'ont pas de valeurs sanitaires directes. L'eau doit être agréable à boire, claire et sans odeur [10].

#### **8.1.1. La couleur**

L'eau n'a pas de couleur à l'état pure, et elle n'absorbe pas la lumière du soleil, de l'infrarouge jusqu'à l'ultra-violet, car les molécules de l'eau n'interagissent pas avec la lumière.

#### **8.1.2. L'odeur**

L'odeur est ce que l'on sent avec le nez lorsque des petites particules ou des substances volatiles sont dans l'air que l'on respire. Les eaux usées chargées en matières organiques, composée d'azote, soufre et de phosphore, peuvent générer des odeurs désagréables.

### **8.2.Les paramètres physiques et chimiques**

#### **8.2.1. La température de l'eau**

La température est un paramètre physique qui exprime la chaleur ou le froid de l'eau, qui sont des termes arbitraires. Aussi la température peut être définie comme une mesure d'énergie thermique. Cette énergie peut être transférée sous forme de flux de chaleur, provenant de l'air, de la lumière du soleil ou d'une autre source d'eau [11].

- **Unité de mesure de température :** Il existe trois unités de mesure de température qui sont : Degré Celsius (°C), Kelvin (K), Degré Fahrenheit (°F).

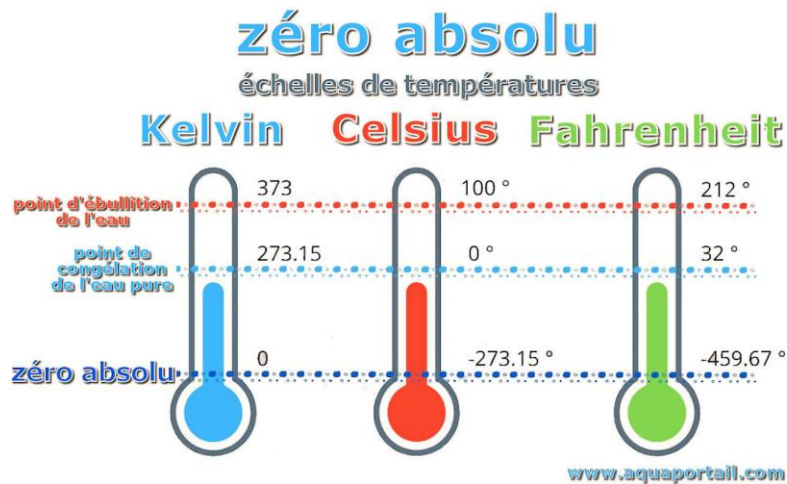


Figure 5 : Unités de mesure de température [12].

On utilise les formules de conversions suivantes pour passer d'une unité à l'autre :

$$^{\circ}\text{F} = (1.8 \times ^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

### 8.2.2. La conductivité de l'eau

La conductivité de l'eau est un paramètre physique qui exprime la capacité de l'eau à conduire l'électricité, et qui dépend de la concentration des ions dissous dans l'eau, plus les ions sont élevés plus la conductivité de l'eau est importante. Ce paramètre est important, généralement les ions conducteurs proviennent de sel dissous et des matières inorganiques comme les alcalis, les chlorures, les sulfures et les matières carbonatés, donc ce paramètre nous aide à évaluer la salinité de l'eau [13].

- **Solides dissous totaux (STD) (TDS : Total Dissolved Solids) :** Les solides dissous totaux sont les quantités de matières organiques et inorganiques comme le sel, qui n'ont pas de molécules de H<sub>2</sub>O, dissous dans l'eau [15].
  - a. **Types de solides dissous totaux :** Voici quelques solides dissous qui peuvent être présents dans l'eau :
    - Calcium
    - Chlorure
    - Magnésium
    - Chlore
    - Sodium
  - b. **Facteur TDS :** Pour calculer le TDS à partir d'une mesure de conductivité, on utilise un facteur TDS, qui dépend du type de solide dissous dans l'eau, et la plupart des appareils de mesure de conductivité utilisent une constante approximative d'environ de 0.65 [16].

- c. **Unité de mesure de TDS** : Le TDS est généralement exprimée en milligramme par litre (mg/L) ou partie par million (ppm).
- **Unité de mesure de conductivité** : La conductivité est généralement exprimée en [14]:
    - Siemens par mètre (S/m)
    - Micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
    - Micromhos par centimètre ( $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ )
    - Millimhos par centimètre (mmhos/cm)

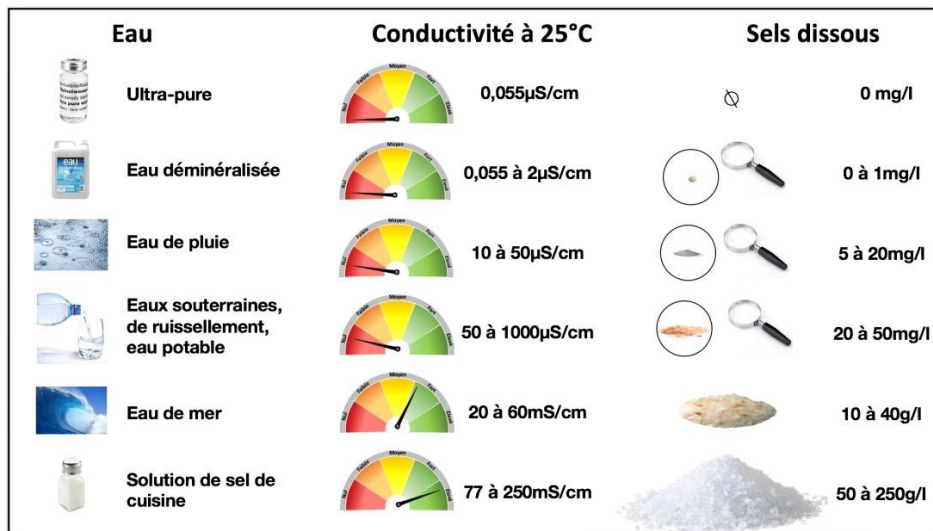


Figure 6 : Unités de mesure de conductivité.

### 8.2.3. Le potentiel d'hydrogène

Le potentiel d'hydrogène ou pH est un paramètre chimique qui est déterminé à partir d'une échelle bien déterminée, et il ne peut pas être mesuré en tant que quantité ou concentration, il s'agit d'un chiffre compris entre zéro et quatorze, qui définit le degré de basicité ( $>7$ ) ou d'acidité ( $<7$ ), le pH de sept est considéré comme neutre.

La mesure de pH est basée sur la concentration des ions hydrogènes ( $\text{H}^+$ ) et des ions hydroxyle ( $\text{OH}^-$ ) dans la substance, plus la quantité de  $\text{H}^+$  importante plus le pH est bas (acide), plus la quantité de  $\text{OH}^-$  est plus importante plus le pH est élevé (base), et on dit que le pH est neutre quand les quantités de  $\text{H}^+$  et  $\text{OH}^-$  sont les mêmes [17].

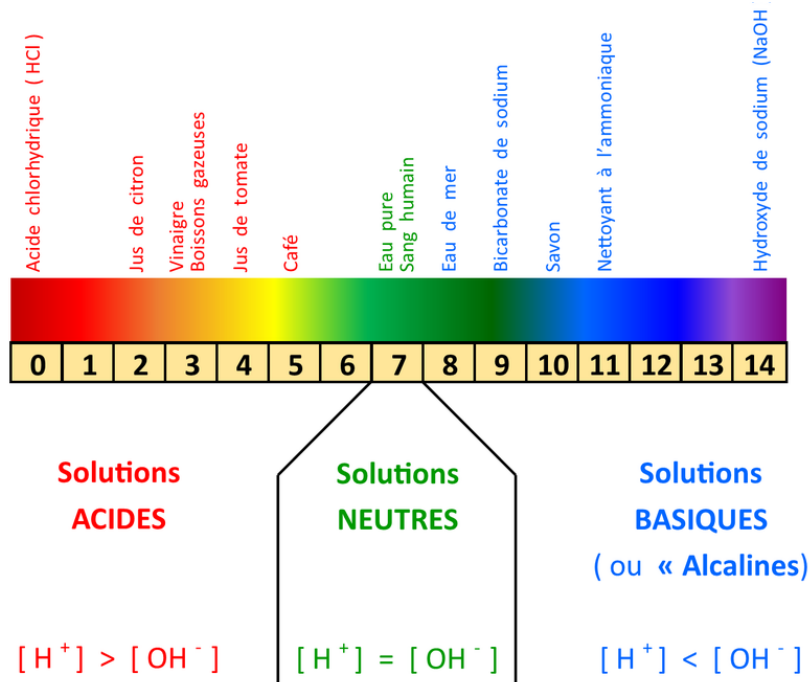


Figure 7 : Echelle de pH [18].

#### 8.2.4. La turbidité de l'eau

La turbidité est un paramètre physique, la mesure de la turbidité est utilisée pour indiquer la qualité de l'eau en fonction de la clarté. La turbidité de l'eau est basée sur la quantité de diffusion de lumière par les particules présentes dans l'eau, la quantité de lumière est proportionnelle à la quantité de particules. La turbidité de l'eau est causée généralement par la terre, les matières organiques et d'autres déchets des activités de l'être humain [19].

- **Unité de mesure de la turbidité :**

La turbidité est généralement exprimée en unité appelées unité de turbidité néphélométrique (NTU) ou unité de turbidité Jackson (JTU). Généralement, une mesure de turbidité inférieure à 5 NTU implique que l'eau est claire, tandis que si la mesure est environ 50 NTU, l'eau commence à paraître des troubles, et une mesure supérieure à 500 NTU l'eau devient opaque [19].

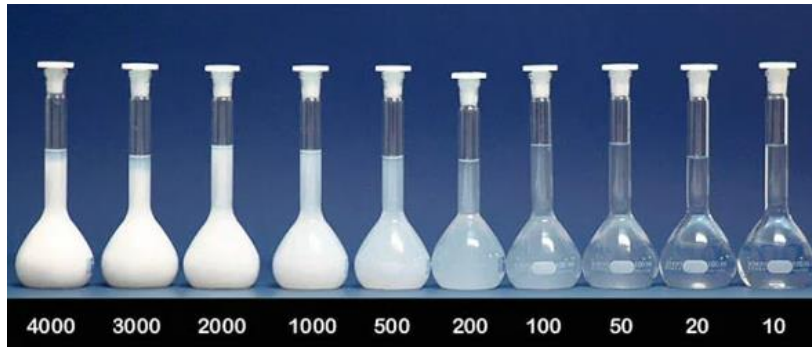


Figure 8 : Les différents degrés de turbidité [20].

## 9. La pollution de l'eau

La pollution est l'introduction des éléments indésirables ou nuisibles dans l'environnement, ces éléments peuvent être des déchets industriels, des substances chimiques ou d'autres éléments provenant des activités de l'être humain.

La pollution de l'eau est la contamination de l'eau (soit des rivières, des lacs, des océans, ...) par des éléments nocifs, qui peuvent affecter la qualité et la pureté de l'eau [21].

Il existe divers types de pollutions :

### 9.1. Pollution physique

La pollution physique de l'eau fait référence à la contamination de l'eau par des déchets, plastiques, métaux ou d'autres substances qui modifient la qualité et la clarté de l'eau. Ce type de pollution peut avoir différentes sources et impacts sur le milieu aquatique [21].

Exemples de pollutions physiques :

- **Déchets solides** : comprends les déchets de l'être humain comme le plastique, les emballages, les canettes...
- **Déchets industriels** : Les rejets industriels peuvent contenir des matériaux solides tels que des métaux lourds, des particules fines ou des déchets de fabrication.

### 9.2. Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau se produit lorsque des substances chimiques nocives sont introduites dans l'eau (les lacs, les océans ou les aquifères) ce qui altère sa composition chimique naturelle et peut avoir des dangers sur la santé humaine, la faune et la flore aquatiques [21].



Exemples de pollution chimique de l'eau :

- **Agriculture** : L'utilisation excessive des produits chimiques, de pesticides et d'herbicides dans l'agriculture peut entraîner le lessivage de ces produits chimiques dans les eaux souterraines ou les rivières, provoquant une pollution chimique.
- **Activités minières** : Les résidus miniers contiennent souvent des métaux toxiques qui peuvent être transportés par les eaux de ruissellement dans les cours d'eau, qui peuvent contaminer les sources d'eau potable et affectant la vie aquatique.

### 9.3.Pollution biologique

La pollution biologique de l'eau fait référence à la présence excessive et nuisible d'organismes biologiques (tel que les bactéries, virus, champignon, ...) dans les écosystèmes aquatiques, ce qui peut perturber l'équilibre naturel de ces environnements [21].

## 10. Analyse des eaux

Il faut passer par trois étapes pour vérifier la qualité de l'eau :

### 10.1. Echantillonnage

L'échantillonnage d'eau est le processus de prélèvement d'un échantillon d'eau pour l'analyse. L'échantillonnage est une étape importante de l'analyse car pour obtenir des résultats analytiques valides, il est important que l'échantillon d'eau soit représentatif, conservé dans de bonnes conditions jusqu'au moment de l'analyse et non contaminé par quoi que ce soit qui pourrait affecter les résultats de l'analyse.

### 10.2. L'analyse

L'analyse de l'eau est la façon dont nous déterminons les propriétés chimiques, physiques ou sensorielles de l'eau, généralement pour faire l'analyse on utilise du matériel et des méthodes telles que [22]:

- pH-mètre : pour savoir la valeur de potentiel d'hydrogène dans l'échantillon
- Mesure par sonde portative électrochimique.
- Photométrie (spectromètre) : donne des résultats rapides et précis

- Colorimétrie : les analyses faites avec cette méthode manquent de précisions.

### 10.3. L'interprétation

C'est le résultat d'analyse de l'eau, qui consiste à évaluer les résultats des tests effectués sur des échantillons d'eau afin de déterminer sa qualité et sa conformité aux normes applicables [23].

## 11. Les normes de rejet

L'eau potable doit répondre à certaine norme de qualités avant la consommation humaine, ces normes sont divisées entre des limites de qualité et des références de qualité.

Les normes peuvent inclure des limites pour divers paramètres, comme les concentrations de produits chimiques, de substances organiques, de nutriments (tels que l'azote et le phosphore), ainsi que des paramètres tels que la température, le pH.

Les normes de qualité des eaux varient d'un pays à l'autre. De manière générale, il existe des normes et des réglementations pour contrôler la qualité de l'eau potable [24].

### 11.1. Normes internationales

Les normes mises en place par l'OMS pour le contrôle de la qualité des eaux sont présentées dans le tableau suivant :

Table 1 : Normes de rejets internationales [25].

Paramètres	Unité	Normes Utilisées (OMS)
Sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S)	mg/L	0.05 à 1
pH	/	6.5 à 9.5
TDS	mg/L	<1000
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	mg/L	500
Couleur	/	Incolore
Odeur	/	Inodore
Dureté (CaCO <sub>3</sub> )	ppm	200

Manganèse (Mn)	mg/L	0.4
Sodium	mg/L	<20
Arsenic (As)	mg/L	0,01
Température	°C	≤ 30
Conductivité	μS/cm	Non mentionnée

### 11.2. Normes Algériennes

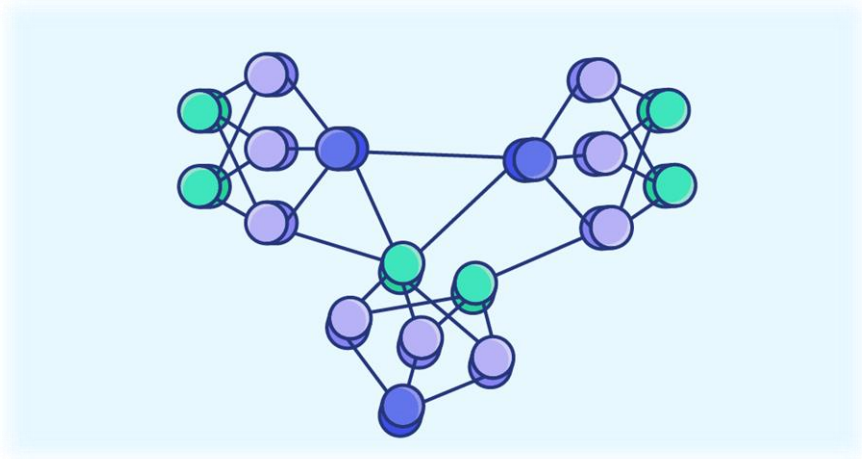
L'Agence Nationale de Gestion des Ressources en Eau (AGIRE) est l'organisme chargé de la gestion de l'eau en Algérie et du contrôle de la qualité de l'eau selon les normes algériennes. Les normes sont basées généralement sur les normes internationales [26].

## 12. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé le contexte de la problématique qui nous a incités à mettre en place ce projet. L'eau doit répondre à des normes de potabilités très strictes avant d'être consommée par l'être humain. Les paramètres physico-chimiques fréquemment contrôlés pour évaluer la qualité de l'eau incluent la température, le pH, la conductivité et la turbidité. Tous ces paramètres doivent faire l'objet d'une surveillance permanente afin de s'assurer qu'ils respectent les normes de potabilité. Pour garantir donc une consommation sans danger, l'eau doit donc être traitée et contrôlée. La mesure de ces paramètres descripteur de la qualité de l'eau est basé classiquement sur le prélèvement et le maintien des échantillons dans des conditions très strictes pour que les mesures soient justes mais la solution optimale c'est d'avoir des mesures en permanence et à distance en utilisant des capteurs spécifiques et un système de transmission de données.

Dans le prochain chapitre nous parlerons des notions de base sur les réseaux de neurones artificiels, qui une technique d'intelligence artificielle que nous allons employer dans notre projet pour la classification de l'eau suivant l'état de potabilité.

## Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels



## 1. Introduction

Le cerveau humain est considéré comme la machine à calcul la plus sophistiquée au monde. L'être humain a voulu donc le reproduire en créant l'intelligence artificielle avec ses propres moyens en s'inspirant du fonctionnement des neurones du cerveau, pour créer les réseaux de neurones artificiels.

Les réseaux de neurones artificiels ont été créés il y a plus de 81 ans, et ils sont toujours au cours de développement, en se basant sur le système neuronal humain. Du point de vue mathématique, les réseaux neuronaux sont considérés comme des systèmes avec des capacités d'apprentissage, ils peuvent donc générer de nouvelles données à partir des données expérimentales.

Dans ce chapitre, nous allons donner des généralités sur le fondement mathématique des réseaux neuronaux, en se focalisant en particulier sur l'architecture des réseaux multicouche qui est utilisée par la suite dans notre projet.

## 2. L'historique des réseaux de neurones artificiels

La première apparition des réseaux de neurones artificiels était en 1943, par la présentation de W.McCulloch et W.Pitts du neurone formel, qui est une abstraction du fonctionnement physiologique du neurone biologique, et le but de cette présentation est de démontrer que le cerveau fonctionne comme une machine de Turing (calcul).

Puis en 1949, dans son ouvrage '*The Organization of Behavior*', D.Hebb présente une règle d'apprentissage, qui est à nos jours utilisée dans de nombreux modèles de réseaux de neurones.

En 1958, un énorme pas a été fait, le développement du Perceptron par F.Rosenblatt, inspiré du système visuel, et il est capable d'apprendre par l'expérience. Le Perceptron possède deux couches, la couche de perception et la couche pour la prise de décision.

Durant la même période, un chercheur américain à Stanford nommé M.Minsky, a présenté le modèle d'Adaline (*ADaptive LINar Element*), qui sera par la suite la base des réseaux de neurones multicouches.

En 1969, après la critique publiée par M.Minsky et S.Papert sur le Perceptron, cela a eu un impact sur les recherches dans ce domaine, et elles vont diminuer jusqu'en 1972, T.Kohonen présente ses recherches sur les mémoires associatives et aussi propose des applications de reconnaissance des formes.

En 1982, J.Hopfield publie son étude du premier réseau complètement rebouclé.

De nos jours, les réseaux de neurones artificiels sont utilisés dans divers domaines (intelligence artificielle), et cela pour leurs propriétés et de leur capacité d'apprentissage [27].

### **3. Le neurone biologique**

Le cerveau humain est constitué d'un nombre énorme de cellules biologiques élémentaires nommé les cellules nerveuses. Les neurones biologiques sont donc l'unité fonctionnelle du système nerveux, ce sont des cellules vivantes permettant le transport et le traitement des informations [28].

Le neurone biologique est composé de quatre parties principales :

#### **3.1. Le corps cellulaire (soma)**

C'est la partie principale d'une cellule nerveuse. Elle est la partie centrale du neurone qui contient le noyau cellulaire. Dans cette partie il se déroule de nombreuses activités cellulaires essentielles, telles que la réception et le traitement des signaux, la production d'énergie et aussi d'autres fonctions cellulaires [28].

#### **3.2. Les dendrites (entrée du neurone)**

Sont les parties de neurones sous forme de tube qui reçoivent des informations des neurones précédents [28].

#### **3.3. L'axone (sortie du neurone)**

Généralement l'axone est plus grand que les dendrites, et sa fonctionnalité est de transmettre les informations vers d'autres neurones [28].

#### **3.4. Les synapses**

C'est une jonction qui relie entre l'axone d'un neurone et la dendrite d'un autre neurone et qui assure la transmission d'information par à l'aide de substances chimiques [28].

Le cerveau peut contenir jusqu'à cent milliards de neurones biologiques, et de mille à dix milles synapses par neurones, sachant que les neurones ne sont pas tous identiques, et n'ont pas le même comportement selon leur positionnement dans le cerveau. Le traitement de l'information dans le neurone a un seul sens, de la dendrite vers l'axone, en faisant la somme des signaux reçus par les dendrites. Dans le cas où l'amplitude du signal a dépassé un certain seuil, il sera envoyé vers les autres neurones avec l'axone, en réalisant le processus d'apprentissage [28].

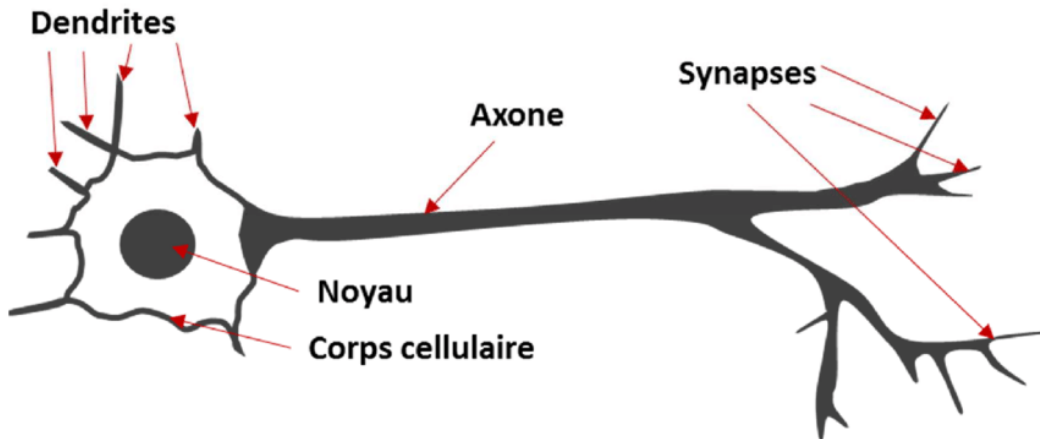


Figure 9 : Schéma d'un neurone biologique [29].

#### 4. Le neurone formel

Le neurone formel est inspiré du neurone biologique, c'est la représentation informatique et mathématique simplifiée de neurone biologique, ayant plusieurs entrées et une seule sortie. Ce modèle imite quelques fonctions du modèle neurophysiologique, comme le travail en parallèle, l'apprentissage et la mémorisation [30][31][32].

##### 4.1. Fonctionnement d'un neurone formel

Le neurone formel (neurone artificiel) fonctionne comme un processeur élémentaire, qui fait la somme pondérée, par les poids synaptiques, des entrées reçues d'autres neurones, et les résultats de cette somme seront transférés vers la sortie à travers une fonction d'activation (fonction de seuil) [33][34].

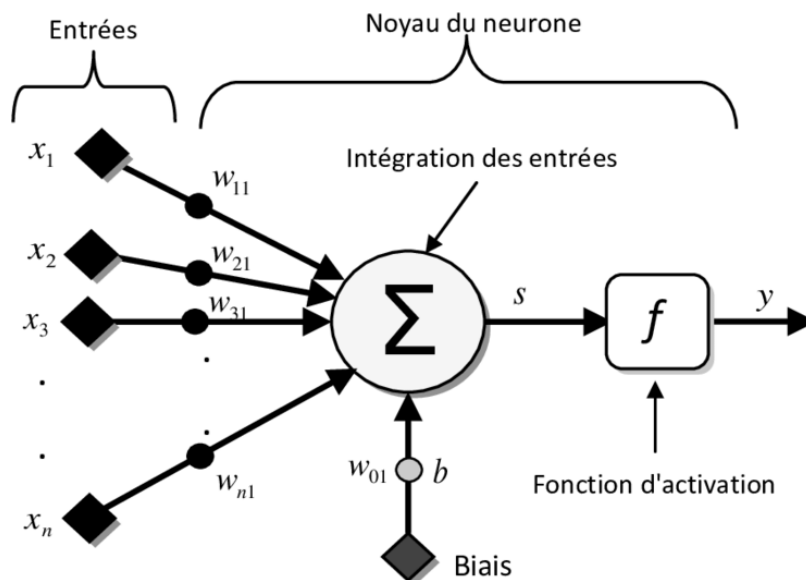


Figure 10 : Modèle d'un neurone artificielle.

Le fonctionnement du neurone artificiel se fait en deux phase : la pondération et la

sommation/ activation [35][36], et ceci peut être représenté par l'équation suivante [33]:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i + W_0 X_0$$

$$y = f(S)$$

Avec :

$X_i$  : La  $i$ ème composantes du vecteur d'entrée ;

$W_i$  : La  $i$ ème composantes du vecteur de poids synaptique ;

$S$  : La somme pondérée ;

$f$  : La fonction d'activation ;

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

$X_0 = 1$ .

Cette somme peut se réécrire sous une simple forme :

$$S = \sum_{i=0}^n W_i * X_i$$

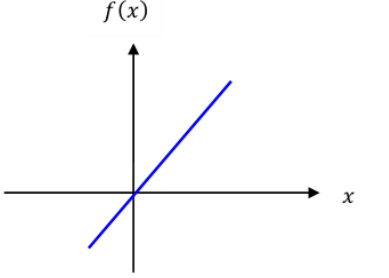
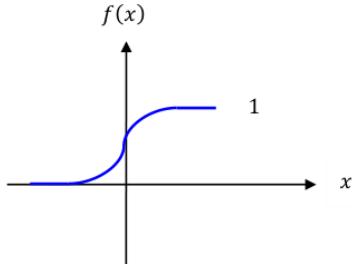
#### 4.2. Fonction d'activation

La fonction d'activation ou fonction de seuil est une fonction mathématique utilisée dans le domaine de traitement du signal, elle a pour rôle de reproduire le potentielle d'activation qu'on peut retrouver dans le neurone biologique, si le seuil de stimulation est atteint, elle permet le passage de l'information ou non.

Table 2 : Les fonctions d'activations des réseaux de neurones artificiels [37]

Nom de la fonction	Relation entrée / sortie	Allure
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

Le réseau de neurone est un ensemble de neurones interconnectés et organisés sous forme de couche : couche d'entrée, couche de sortie et une ou plusieurs couches intermédiaires qui présentent les couches cachées [38][39].

Chaque S neurones d'une même couche est lié aux R entrées, et chacune des connexions est lui associer un poids «  $w_i, x_i$  », ces poids sont écrits de cette manière :  $w_{i,j}$ , tels que l'indice 'i' indique la rangée, les numéros de neurones sur la couche, et l'indice 'j' désigne la colonne, le numéro de l'entrée, donc l'ensemble de ces poids constitue une matrice W de dimension SxR [40]:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

La figure suivante illustre un réseau de neurone à trois couches :

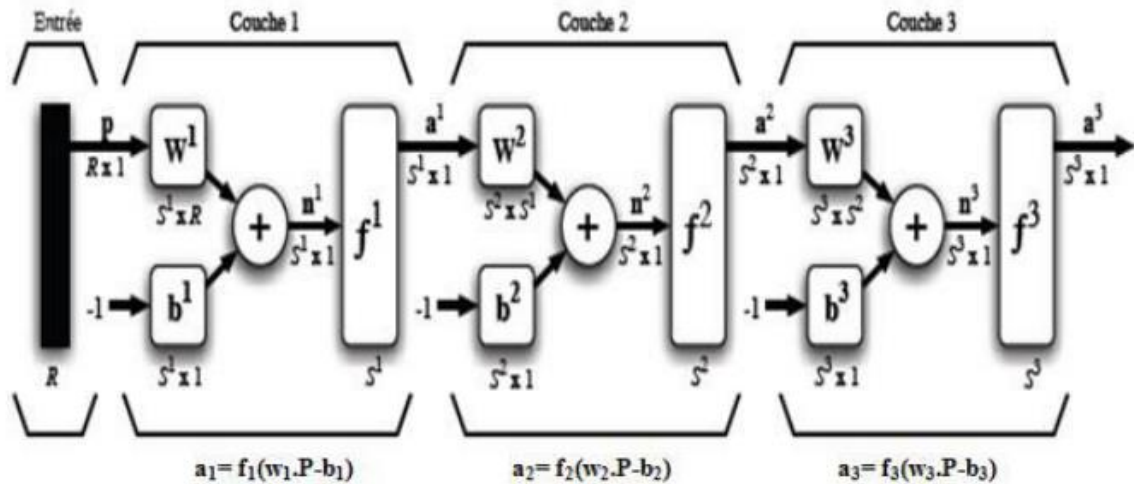


Figure 11 : Un exemple de réseau de neurones à trois couches [41]

## 5.2. Architecture des réseaux de neurones

L'architecture des réseaux de neurone diffère selon l'interconnexion des neurones à l'intérieur des couches, il existe donc deux grands types d'architecture [38] :

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

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

La structure de cette architecture est représentée par un ensemble de neurones artificiels interconnectés, et la propagation de l'information se fait dans un seul sens, de l'entrée à la sortie sans retour. Donc cette architecture réalise généralement une relation algébrique non linéaire entre les entrées et les sorties. Ce type d'architecture peut se diviser en deux groupes : réseau multicouches (Perceptron multicouches), et réseau monocouche (Perceptron monocouche).

Les réseaux neuronaux basés sur cette architecture sont utilisés dans les applications de classifications et de modélisations des processus statiques [38][42].

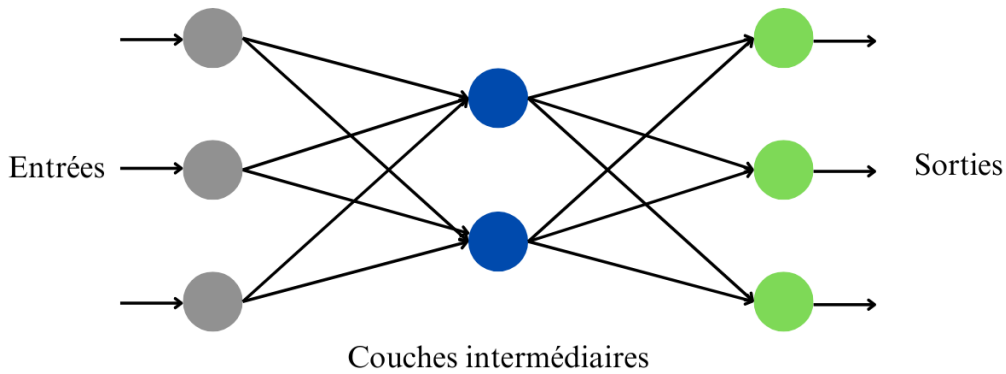


Figure 12 : Structure d'un réseau de neurones artificiels non bouclé.

### 5.2.2. Réseaux bouclés (feed-back)

La structure de cette architecture est le contraire de l'architecture non bouclée, il s'agit donc d'un réseau avec retour, cela veut dire que chaque neurone reçoit sur ses entrées les informations externes et les sorties d'autres neurones, autrement dit c'est un réseau totalement connecté.

Les réseaux neuronaux basés sur cette architecture sont utilisés dans les applications de filtrages et d'adaptations des systèmes dynamiques [38].

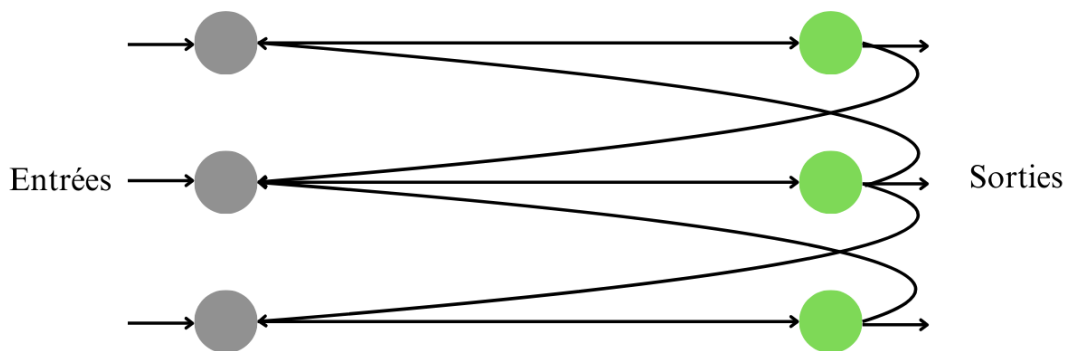


Figure 13 : Structure d'un réseau de neurones artificiels bouclé.

## 5.3. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage dans le domaine des réseaux de neurones est le processus de modification des poids ( $W_{i,j}$ ) et les biais ( $b$ ) afin d'adapter le fonctionnement de réseau à une tâche spécifique [43].

On distingue trois types d'apprentissage :

- Apprentissage supervisé ;
- Apprentissage semi supervisé ;
- Apprentissage non supervisé .

### 5.3.1. Apprentissage supervisé

Ce type d'apprentissage est basé sur des exemples (des couples d'entrées/sorties), donc on force le réseau de neurones à reproduire des sorties déjà connues. Le but de cet apprentissage est d'ajuster les paramètres du réseau pour minimiser l'erreur entre les sorties désirées et les sorties réelles [43].

### 5.3.2. Apprentissage semi supervisé

Ce type d'apprentissage est similaire au précédent, il permet d'obtenir des indications qualitatives (vrai ou faux) sur les performances du réseau [38].

### 5.3.3. Apprentissage non supervisé

Ce type d'apprentissage est dit compétitif ou coopératif, car on ne dispose pas de base d'apprentissage donc le réseau fonctionne tout seul on lui fournissant seulement des exemples d'entrées sans indiquer les sorties [44][45].

## 5.4. Les types des réseaux de neurones

La figure suivante représente les réseaux de neurones les plus utilisés :

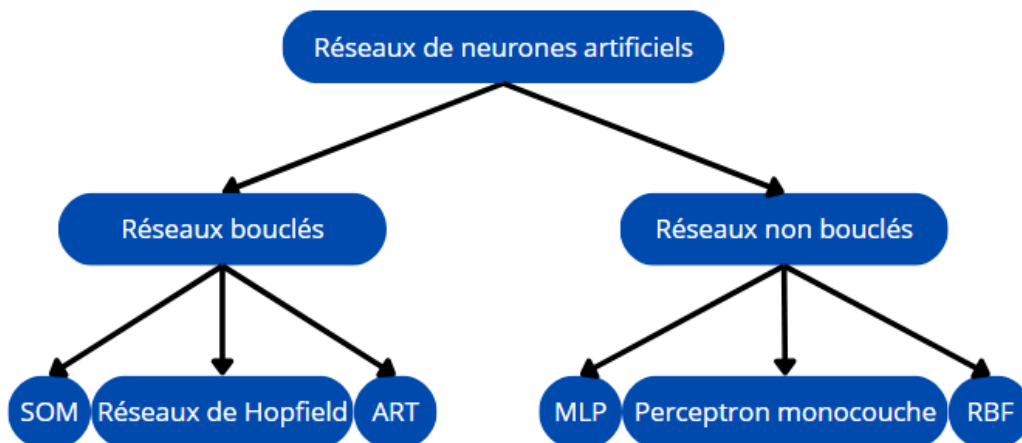


Figure 14 : Les grands types des réseaux de neurones artificiels.

### 5.4.1. Les réseaux de Hopfield

Inventé par le J.Hopfield, les réseaux de Hopfield sont des réseaux récurrents et entièrement connectés, chaque neurone est relié à tous les autres neurones sauf à lui-même avec des liaisons synaptiques. Donc ce type des réseaux fonctionne comme une mémoire associative non linéaire, avec apprentissage non supervisé [46].

### 5.4.2. Les réseaux de Kohonen ou les cartes auto-organisatrices

Les réseaux de Kohonen ou les cartes auto organisées 'SOM' (*Self Organised Maps* en anglais) représentent un modèle de neurone inspirés du fonctionnement

biologiques du système nerveux, il est proche de la réalité. Ces réseaux sont constitués de deux couches, une couche d'entrée et une couche de sortie, reliées entre eux, selon une topologie précise (carte carrée,...).

Ce type des réseaux utilise l'apprentissage non supervisé, ils ont des applications dans le traitement d'image, d'analyse de données, ... [47].

### 5.4.3. Les perceptrons

#### 5.4.3.1. Le perceptron simple (monocouche)

C'est le premier réseau de neurones artificiels créé par F.Rosenblatt en 1957 au laboratoire aéronautique de Cornell. C'est un modèle de classification linéaire simple. Ce réseau suit un apprentissage supervisé, son architecture générale est comme suit [48] :

- Une couche d'entrée : possède plusieurs cellules (capteurs) qui reçoivent les données.
- Une couche d'association (couche cachée) : c'est une couche qui contient plusieurs cellules qui assurent l'association entre les cellules d'entrée et les cellules de sortie.
- Une couche de sortie (couche de décision) : cette couche peut contenir un ou plusieurs neurones. Ce sont des neurones qui, calculent et affichent le résultat, prennent seulement deux états (-1 et 1 ou 0 et 1).

Généralement, le perceptron simple est utilisé pour la classification et pour résoudre les opérations logiques simples.

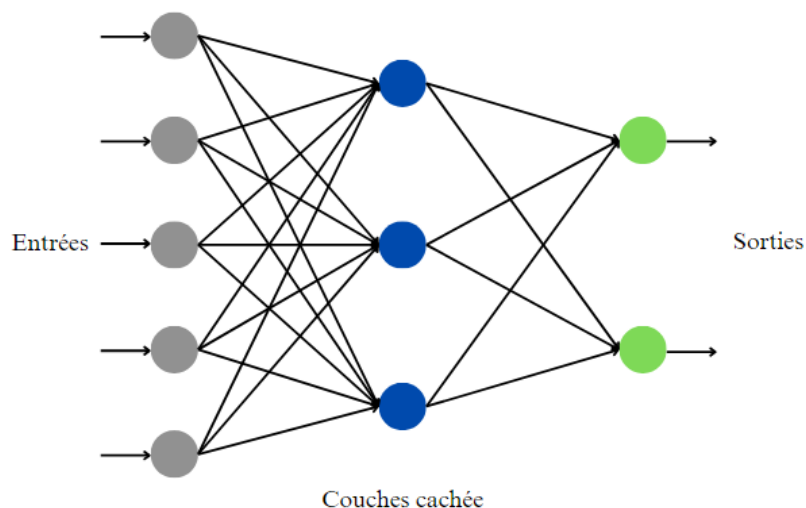


Figure 15 : Architecture d'un perceptron monocouche.

### 5.4.3.2. Le perceptron multicouche

Le perceptron multicouche (*Multi Layer Perceptron*, MLP en anglais) est un réseau ayant une architecture plus complexe, il se compose de plusieurs couches et plusieurs neurones, chacun avec son propre poids et sa propre fonction d'activation, généralement utilisé pour la reconnaissance d'image et la classification complexe.

#### a. Architecture

L'architecture du perceptron multicouche est basée sur l'amélioration de perceptron monocouche [39][49] :

- Une couche d'entrée qui contient des capteurs qui reçoivent les données.
- Une couche cachée : cette couche est construite de plusieurs autres couches internes, chaque couche contient plusieurs neurones connectés entre eux, les entrées de la deuxième couche seront les sorties de la première couche, donc les neurones de la première couche sont liés aux neurones de la deuxième couche et les neurones de la deuxième couche sont liée également aux neurones de la troisième couche, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière couche.
- Une couche de sortie : la couche qui prend la décision (le résultat)

Le MLP est un réseau de propagation vers l'avant (*feed-forward*), sa fonction d'activation est la fonction sigmoïde (  $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$  ).

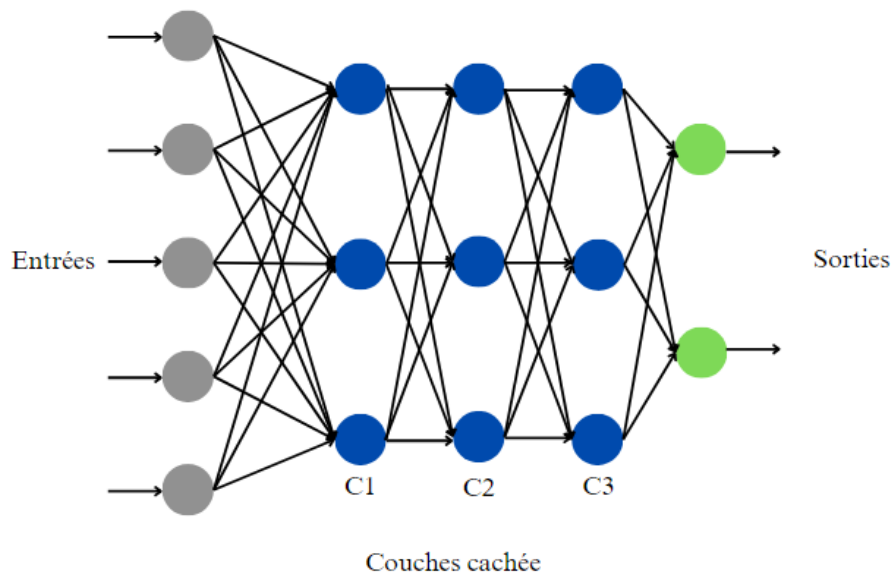


Figure 16 : Architecture d'un perceptron multicouche.

### b. Equation du réseau MLP

Selon les paramètres de réseau.

La couche d'entrée : Les entrées ( $x_i$ ) de  $x_0$  à  $x_n$ ,  $0 \leq i \leq n$

La couche de sortie : Les sorties ( $y_i$ ) de  $y_0$  à  $y_n$ ,  $0 \leq i \leq n$

La couche cachée : l'ensemble des couches ( $l_i$ ) de  $l_0$  à  $l_n$ ,  $0 \leq i \leq n$

Les calculs sont effectués séquentiellement et couche par couche et de l'entrée vers la sortie.

$$S_j^i = \sum_{i=0}^{N^{l-1}} w_{ji}^l \cdot u_i^{l-1}$$

$$u_j^l = f(S_j^l)$$

Avec :

$S_j$ : La somme pondérée  $j^{\text{ème}}$  du neurone de la couche ( $l$ ).

$N^l$ : Le nombre de neurone dans la couche ( $l$ ).

$U_j^l$ : La sortie du  $j^{\text{ème}}$  neurone dans la couche ( $l$ ).

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

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

$(w_{ji}^l \cdot u_i^{l-1})$ : La valeur du seuil interne du  $j^{\text{ème}}$  neurone dans la couche ( $l$ )

La fonction d'activation des neurones de la couche de sortie peut être linéaire ou non linéaire, d'autre part la fonction d'activation des neurones de la couche cachée est non linéaire.

### c. L'apprentissage avec la retro propagation (Back Propagation)

Dans la phase de l'apprentissage de réseau MLP, généralement il utilise le mode d'apprentissage supervisé et l'algorithme retro propagation (RP) pour la correction des erreurs, c'est un algorithme simple et facile, son principe est de réduire la valeur estimée de l'erreur entre les données calculées et le résultat souhaité, donc il faudra utiliser une fonction non linéaire [50].

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

- Initialiser les poids ( $W_i$ ) de connexions entre les entrées et les sorties.
- Calculer les valeurs de composantes de sortie à partir d'un vecteur appliqué à l'entrée.
- Calculer l'erreur.

- Déterminer la direction dans laquelle les poids sont modifiés (+ ou -) pour minimiser les erreurs.
- Modifier et ajuster les poids et répéter le processus précédent avec les vecteurs d'apprentissage jusqu'à ce que les résultats et la sortie du réseau soient suffisamment proches et que l'erreur soit minimale.

L'algorithme de rétro propagation minimise l'erreur et permet au perceptron multicouche de surmonter les limites du perceptron monocouche. Car il constitue un processus important avec de bonnes propriétés par rapport au réseau monocouche.

#### **d. La théorie de la généralisation**

La généralisation fait référence à la tâche effectuée par le réseau de neurone après l'apprentissage, on peut faire des tests sur ce réseau pour évaluer sa précision, le test est effectué avec des données qui n'ont été utilisées dans la phase d'apprentissage [51].

Il existe quatre facteurs qui influent sur le réseau de neurone :

- La complexité du problème.
- L'algorithme d'apprentissage.
- La complexité de l'échantillon (le nombre d'exemples).
- La complexité du réseau (nombre de poids).

La complexité du problème est déterminée par sa nature, la généralisation est influencée par l'algorithme d'apprentissage et par son aptitude à trouver le minimum local qui est assez profond, si non le minimum global.

La généralisation possède une taille de réseau fixe, et le nombre des exemples d'apprentissage est fixé aussi, donc le problème de la généralisation est :

- La taille de réseau est fixée, donc il faut savoir le nombre d'exemple d'apprentissage nécessaire pour atteindre une bonne généralisation.
- Le nombre d'exemples d'apprentissage est fixé, donc il faut savoir la taille du réseau qui donne la meilleure généralisation pour ces données.
- On cherche l'écart minimum à partir des complexités d'échantillons et du modèle, qui peut être la vraie capacité de généralisation.

#### **e. Amélioration de la généralisation**

Le réseau de neurones effectue des tests et des entraînements, donc plusieurs résultats et décisions doivent être prises concernant les paramètres utilisés pour obtenir les meilleures performances, pour cela on utilise la technique de l'arrêt précoce (*Early Stopping* en anglais), cette technique est basée sur l'utilisation de trois jeux de données :



un jeu d'apprentissage, un jeu de validation et un jeu de test, son principe est de mesurer et vérifier les performances lors de l'apprentissage sur la base d'apprentissage et la base de validation [52].

Lorsque le modèle est sur-ajusté, la performance d'apprentissage diminue, tandis que la performance de validation augmente. A une itération avant le commencement du sur-apprentissage, l'apprentissage devrait arrêter, et on vérifie la capacité de généralisation du réseau de neurones.

#### **f. Le classificateur du perceptron multicouche**

Dans le réseau MLP on a trois couches (entrée, sortie et cachée), mais il n'y a pas de règles ou lois qui limitent le nombre de couches et le nombre de neurones à utiliser dans la couche, le choix est établi selon l'utilisation du réseau.

L'utilisation d'un réseau de neurone dans la classification, le nombre de neurone à utiliser dans la couche d'entrée correspondent au nombre de vecteur d'entrée, d'un autre côté dans la couche de sortie le choix est selon le nombre de neurones correspond au nombre de classes estimées.

L'état de la sortie est défini par rapport à l'entrée par la fonction d'activation, pour cela il faut assurer que chaque neurone se connecte à tous les neurones des niveaux précédents, et chaque connexion avec son propre poids pondérant la sortie de neurone précédent. La somme supplémentaire est ensuite transmise à la fonction d'activation, qui détermine la sortie du neurone [53].

### **6. Application des réseaux de neurones artificiels**

Les réseaux de neurone sont utilisés dans divers domaines tels que : la biologique, l'aéronautique, l'électronique, l'automatique, l'informatique...etc.

Voici quelques exemples d'application :

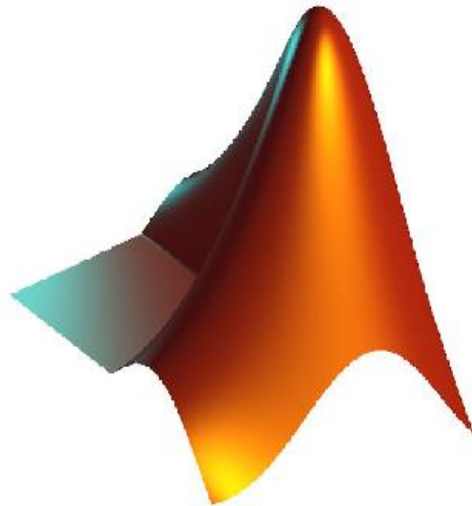
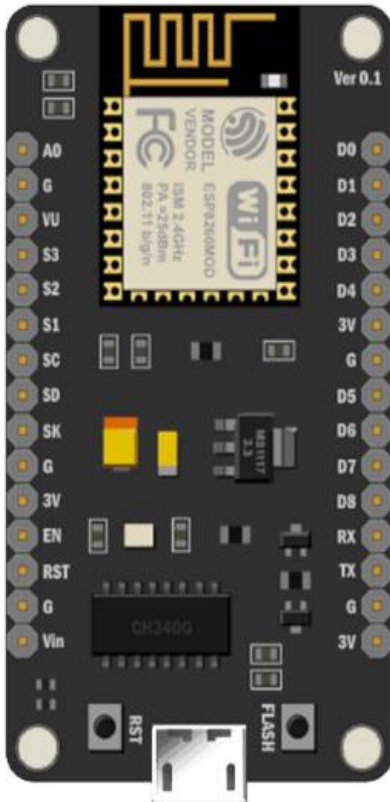
- Robotique : diagnostique des pannes, commande de processus, ...
- Traitement de données
- Surveillance : contrôle de qualité.
- Traitement d'image : compression d'images, reconnaissance de forme, classification.
- Traitement du signal : traitement de son, identification de sources, filtrage, classification.
- Les prévisions en marketing, la prédiction en météo ainsi que les estimations de probabilité de succès.

## **7. Conclusion**

La naissance des réseaux de neurones était le fruit de combinaison entre la neurologie comme idée de base, la physique comme terrain d'application et les mathématiques et l'informatique comme moyen de réalisation.

Au cours de ce chapitre, nous avons évoqué les généralités sur les réseaux de neurones artificiels, et nous avons parlé particulièrement du réseau multicouche qui est le réseau utilisé dans notre application. Le dernier chapitre sera consacré à réalisation du projet et son évaluation.

## Chapitre III : La réalisation et la présentation des résultats



**MATLAB**

## 1. Introduction

Pour assurer la bonne qualité d'eau potable destiné pour la consommation humaine, de nombreuses méthodes de traitement et d'analyse d'eau ont été élaborées et qui sont basées principalement sur la mesure des paramètres physico-chimique où plusieurs grandeurs sont souvent mesurées en permanence tels que le pH, la température, la conductivité et la turbidité. L'idéale est d'avoir toutes ces données issues des capteurs à distance et que le système de mesure ait une capacité décisionnelle concernant la qualité de l'eau.

Dans ce chapitre. Nous présenterons toutes les étapes de réalisation de notre projet, un système de télésurveillance de la qualité de l'eau, dans toutes ses parties : la préparation de la plateforme utilisée pour la visualisation des résultats, la création de réseau de neurones artificiels pour la classification des eaux, et enfin la présentation des résultats obtenus durant la phase de test.

## 2. Description de système

Pour ce projet, nous allons réaliser un système de télésurveillance de la qualité des eaux basé sur la carte ESP32 et 4 capteurs (capteur de pH, turbidité, conductivité et température), le système réalisé est capable non seulement de mesurer les paramètres physico-chimique en utilisant ses capteur, mais aussi de classier l'eau suivant sa potabilité en utilisant la technique des réseaux de neurones artificiels, ce réseau est entraîné sur une base de données réelle collectée sur plusieurs année au niveau d'une station de traitement des eaux située à la wilaya de Bouira. Les signaux issus des capteurs ainsi que la décision du réseau de neurones sont ensuite affichés sur la plateforme Blynk.

## 3. Description des composants

Dans ce projet, nous avons utilisé les composants suivants :

### 3.1. Esp32

L'ESP32 est une carte de développement et un microcontrôleur puissant et polyvalent développé par *Espressif Systems*. Il est très populaire dans le domaine des projets IoT (Internet of Things) grâce à ses nombreuses fonctionnalités intégrées et sa connectivité sans fil.

L'ESP32 est un microcontrôleur 32 bits basé sur le cœur Tensilica Xtensa LX6 à double cœur, bien que certaines variantes n'ont qu'un seul cœur. Il est conçu pour des applications embarquées où la connectivité sans fil est essentielle.

## Caractéristiques principales

### Processeur:

- Microcontrôleur 32 bits Tensilica Xtensa LX6
- Double cœur (ou simple cœur dans certaines variantes)
- Fréquence d'horloge jusqu'à 240 MHz
- Performances jusqu'à 600 DMIPS

### Mémoire:

- RAM interne : 520 KB SRAM
- Mémoire flash : généralement 4 MB (mais peut varier selon le module)

### Connectivité:

- Wifi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)
- Bluetooth v4.2 BR/EDR et BLE (Bluetooth Low Energy)

### Interface et périphériques:

- GPIO : jusqu'à 34 broches d'entrée/sortie numériques
- ADC : jusqu'à 18 canaux ADC 12 bits
- DAC : 2 canaux DAC 8 bits
- Capacitive touch sensors
- UART : jusqu'à 3 interfaces UART
- SPI : jusqu'à 4 interfaces SPI
- I2C : jusqu'à 2 interfaces I2C
- I2S (pour interface audio)
- PWM (Pulse Width Modulation)
- SD/SDIO/MMC Host Controller
- Ethernet MAC Interface avec Dedicated DMA et IEEE 1588 Precision Time Protocol

### Sécurité:

- Cryptographie : AES, RSA, SHA-2, HMAC, RNG

- Boot sécurisé
- Flash Encryption

**Gestion de l'énergie:**

- Divers modes de gestion de l'énergie, y compris deep sleep, light sleep, et mode modem sleep
- Régulateur de puissance intégré

**Autres caractéristiques:**

- Température de fonctionnement :  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$  (selon la variante)
- Support pour Over-the-Air (OTA) updates

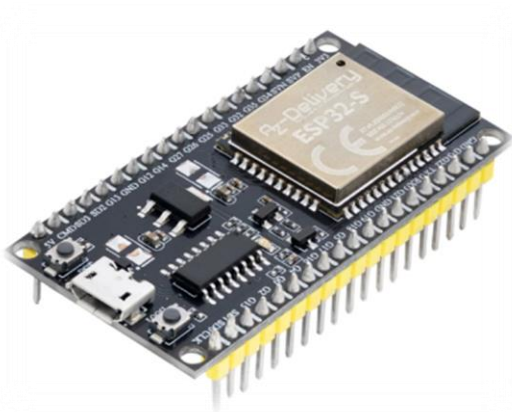


Figure 17 : ESP32

**3.2. Capteur de pH**

Le capteur pH-4502C est un module de capteur de pH conçu pour mesurer le niveau d'acidité ou d'alcalinité d'une solution. Il est largement utilisé dans des applications telles que l'aquaculture, les systèmes hydroponiques, le contrôle de l'eau et d'autres projets nécessitant des mesures précises du pH.

Le capteur de pH-4502C est un module complet comprenant une sonde de pH et une carte de circuit imprimé pour l'amplification et la conversion du signal de la sonde en une tension analogique utilisable par un microcontrôleur ou un système d'acquisition de données.

**Caractéristiques principales**

**Sonde de pH:**

- Type de sonde : électrode de verre
- Plage de mesure : pH 0 à 14
- Température de fonctionnement : 0°C à 60°C
- Type de connexion : BNC
- Longueur du câble : environ 1 mètre

**Module de Circuit:**

- Tension d'alimentation : 5V DC
- Sortie : signal analogique (0V à 3V, correspondant à la plage de pH)
- Ajustement : potentiomètre pour calibrage (généralement deux, pour la mise à zéro et la sensibilité)
- Connecteurs : broches pour alimentation (VCC, GND) et sortie analogique (AO)

**Calibrage:**

- Le module dispose de potentiomètres pour calibrer le point zéro et la sensibilité de la sonde.
- Habituellement calibré à l'aide de solutions tampons de pH 4, 7 et 10 pour obtenir des mesures précises.

**Dimensions:**

- Taille du module de circuit : environ 42mm x 32mm x 20mm

**Autres Caractéristiques:**

- Indicateur LED pour l'état de fonctionnement
- Capacité de longue durée de vie avec une utilisation correcte
- Facilité d'intégration avec des microcontrôleurs tels que Arduino, Raspberry Pi, ESP32, etc.



Figure 18 : Capteur de pH (pH-4502C).

### 3.3. Capteur de température

Le capteur de température DS18B20 est un capteur numérique de température à usage général, largement utilisé dans une variété d'applications en raison de sa précision, de sa facilité d'utilisation et de son interface simple.

Le DS18B20 est un capteur de température numérique à une ligne, ce qui signifie qu'il nécessite uniquement une broche de données pour communiquer avec un microcontrôleur ou un autre périphérique prenant en charge le protocole OneWire. Il utilise la technologie de mesure de température à conversion analogique-numérique et offre une résolution de 12 bits.

#### Caractéristiques principales

##### Plage de Mesure:

- Température :  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$
- Résolution : 9 à 12 bits (réglable)

##### Précision:

- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  (de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $+85^{\circ}\text{C}$ )

##### Interface:



- Protocole de communication OneWire
- Communication série à OneWire

**Alimentation:**

- Tension d'alimentation : 3.0V à 5.5V
- Consommation de courant : < 1mA (typique)

**Formats de sortie:**

- Conversion en degrés Celsius, Fahrenheit ou Kelvin

**Calibrage:**

- Le capteur est généralement calibré en usine et ne nécessite pas de calibrage utilisateur.

**Dimensions:**

- Boîtier TO-92 standard avec une taille compacte

**Compatibilité:**

- Compatible avec une large gamme de microcontrôleurs, y compris Arduino, Raspberry Pi, ESP32, etc.

**Étanche:**

- Des versions étanches du DS18B20 avec une sonde en acier inoxydable sont également disponibles pour des applications nécessitant une mesure de température dans des environnements humides ou liquides.



Figure 19 : Capteur de température DS18B20

### 3.4. Capteur de conductivité

Le capteur de conductivité «TDS Meter V1.0» est un dispositif utilisé pour mesurer la conductivité électrique d'une solution, ce qui permet d'estimer la concentration totale des solides dissous dans cette solution.

Le TDS Meter V1.0 est un dispositif compact et portable conçu pour mesurer la conductivité électrique d'une solution en mesurant la conductivité des ions dissous dans cette solution. Il est généralement utilisé dans des applications telles que la mesure de la qualité de l'eau, le contrôle de la solution nutritive dans l'agriculture hydroponique et d'autres applications nécessitant une évaluation de la concentration des solides dissous.

#### Caractéristiques principales

##### Plage de Mesure:

- Conductivité électrique : généralement de 0 à 9990  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (microsiemens par centimètre), selon le modèle et la calibration
- Résolution : variable, souvent autour de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$

##### Unités de Mesure:

- Microsiemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
- Millisiemens par centimètre ( $\text{mS}/\text{cm}$ )
- Partie par million (ppm) ou milligrammes par litre ( $\text{mg}/\text{L}$ )

**Calibration:**

- Certains modèles peuvent être calibrés à l'aide de solutions d'étalonnage de conductivité connues pour garantir des mesures précises.
- La calibration est souvent nécessaire pour maintenir la précision des mesures dans le temps.

**Alimentation:**

- Alimenté par piles (généralement des piles) ou par une source d'alimentation externe (comme un adaptateur USB)

**Dimensions:**

- Compact et portable, généralement de la taille d'un stylo ou d'un petit dispositif de poche.

**Matériaux :**

- La sonde de conductivité est généralement en acier inoxydable pour assurer la durabilité et la précision des mesures.



Figure 20 : Capteur de conductivité

### 3.5. Capteur de turbidité

Le capteur de turbidité WAVGAT est un dispositif compact et robuste conçu pour mesurer la turbidité d'une solution liquide en détectant la quantité de lumière diffusée ou bloquée par les particules en suspension dans la solution. Il est utilisé dans une variété d'applications, y compris le contrôle de la qualité de l'eau, la surveillance environnementale et industrielle, et d'autres applications nécessitant une évaluation de la clarté de la solution.

#### Caractéristiques principales

##### Principe de Fonctionnement:

- Utilise généralement une source de lumière (LED) et un photodétecteur pour mesurer la quantité de lumière diffusée ou bloquée par les particules en suspension dans la solution.
- La turbidité est généralement mesurée en NTU (*Nephelometric Turbidity Units*) ou en FTU (*Formazin Turbidity Units*).

##### Plage de Mesure:

- La plage de mesure typique peut varier, mais elle peut aller de quelques NTU à plusieurs centaines de NTU, en fonction du modèle.

##### Alimentation:

- Alimenté par une source d'alimentation externe, généralement une tension comprise entre 3.3V et 5V.

##### Calibration:

- Certains capteurs peuvent nécessiter une calibration initiale pour garantir des mesures précises.
- La calibration peut être effectuée en utilisant des solutions de turbidité connues comme référence.

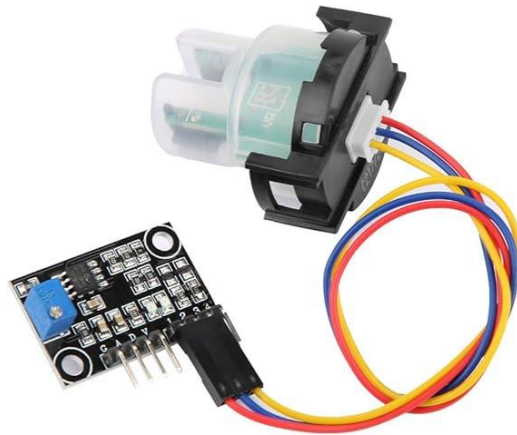


Figure 21 : Capteur de turbidité

## 4. Création du réseau de neurones

### 4.1. Matlab

MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles.

Ce logiciel permet de créer des réseaux de neurones artificiels avec plusieurs méthodes, dans notre cas nous avons opté pour l'outil 'nntool' qui est plus facile à utiliser.

### 4.2. La base de données

Pour entrainer le réseau de neurones artificiel, il faut utiliser une base de données contenant plusieurs vecteurs d'entrée et de sortie, et chaque vecteur d'entrée contient 4 valeurs numériques, ordonnées comme suit : pH, conductivité, température, turbidité.

La base de données utilisée est constituée de plusieurs mesures réelles effectuées sur l'eau de surface traitée, soutirée du barrage « Tilesdit » de la wilaya de Bouira durant l'année 2020, à partir de divers paramètres physico-chimiques. Suivant les capteurs disponibles, nous avons pris les paramètres suivants :

- pH
- Température
- Conductivité
- Turbidité

### 4.3. Choix de l'architecture du réseau de neurones

Comme nous l'avons mentionné auparavant, il existe plusieurs types de réseaux de

neurones artificiels, pour notre application nous avons opté pour le perceptron multicouche.

Le réseau choisi est composé de :

- Quatre (04) entrées (pH, température, turbidité et conductivité) pour la couche d'entrée
- Un seul neurone pour la couche de sortie (classification à deux classes : potable et non potable).
- Pour la couche cachée nous avons utilisée différent nombre de neurone afin de faire une comparaison et de choisir le nombre idéal de neurones.
- Les fonctions d'activation :
  - Pour la couche cachée
    - $f(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} + 1$
  - Pour la couche de sortie
    - $f(x) = x$

## 5. Acquisition de données

### 5.1. Présentation de l'application Blynk

Blynk est une plateforme IoT parmi les plus populaires actuellement, elle est utilisée pour connecter des appareils au cloud, concevoir des applications pour les contrôler et les surveiller à distance. Blynk peut être utilisée soit directement sur leur site web (<https://ny3.blynk.cloud/>), ou de télécharger l'application sur le smartphone.

Le choix de cette plateforme est basé sur la facilité et la simplicité d'utilisation, et aussi pour son degré de sécurité.

### 5.2. Création d'une interface pour notre projet

- **Créer un compte Blynk**

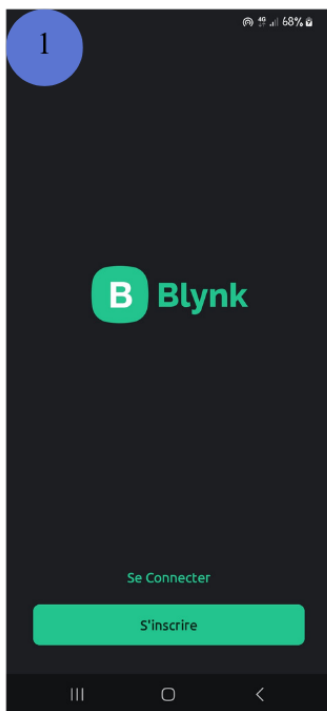
Pour accéder à Blynk, il faut d'abord créer un compte, et pour cela on doit ouvrir soit le site web ou l'application mobile comme dans notre cas, ensuite suivre les étapes comme suit :

- Cliquer sur l'icône s'inscrire
- Saisir votre adresse mail et accepter les conditions générales d'utilisation.
- On reçoit un mail demandant la création d'un mot de passe pour le compte.
- Enfin il ne reste qu'à accéder au compte créé.

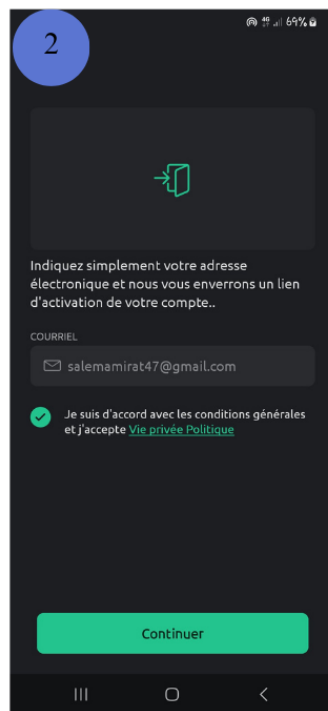
- **Créer un nouveau dispositif**

Pour créer un nouveau dispositif, voici les étapes à suivre :

- Cliquer sur l'icône « Créer un nouveau dispositif ».
- Donner un nom au modèle
- Puis cliquer sur le modèle créé.
- Enfin cliquer sur l'icône '+' pour ajouter les widgets utiles pour le projet.



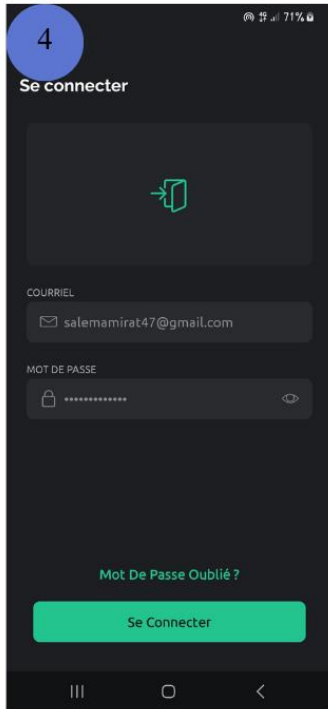
Cliquer sur l'icône s'inscrire



Saisir votre adresse mail et accepter les conditions générales



Vous recevrez un message sur votre mail demandant de créer un mot de passe pour votre compte



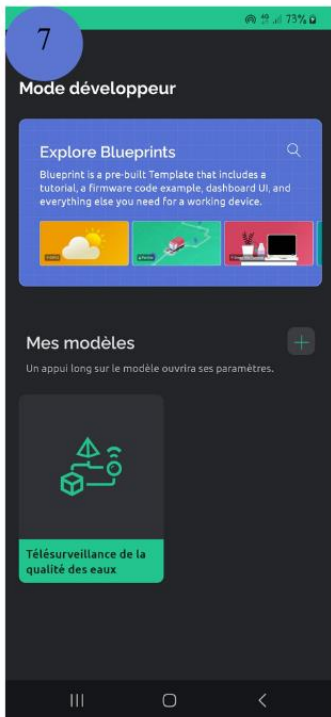
Enfin vous pouvez vous connecter à votre compte



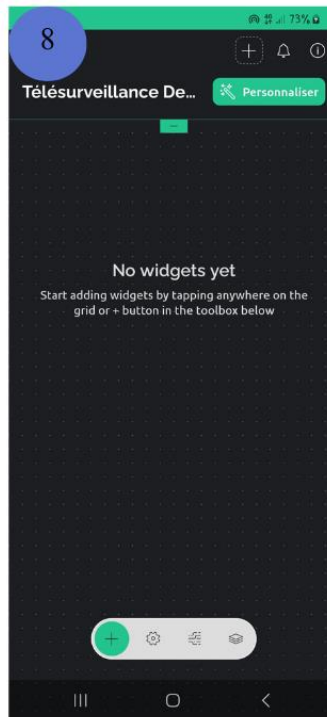
Cliquer sur l'icône "Créer un nouveau dispositif"



Donner un nom à votre modèle



Puis cliquer sur le modèle créé



Enfin cliquer sur l'icône '+' pour ajouter les widgets utiles pour le projet



- **Configuration de micrologiciel**

Après la création et la configuration du modèle, il faut récupérer trois paramètres (ID, nom et clé d'authentification) qu'on doit utiliser dans notre programme Arduino.



The screenshot shows the 'Informations sur le micrologiciel' (Microcontroller Information) page. It includes a 'Mise à jour OTA' (OTA Update) button. The configuration details are as follows:

VERSION DU FIRMWARE	DERNIÈRE COMPILATION
0.0.0	Jun 17 2024 20:59:09
SSL	VERSION DE LA BIBLIOTHÈQUE BLYNK
Désactivé	1.3.2

Below the table, the 'CONFIGURATION DU MICROLOGICIEL' (Microcontroller Configuration) section is highlighted with a red box, containing the following code:

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2J-ODwvxt"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Contrôle de qualité d eau "
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "***** - 0x6G"
```

Figure 22 : Clé de configuration du microcontrôleur

## 6. Programmation Arduino

### 6.1. Arduino IDE

L'environnement de développement intégré (IDE pour : *Integrated Development Environment*), est un logiciel (*open source*) multiplateforme de programmation de carte à microcontrôleur (Arduino, ESP32,...), basé sur le langage Arduino.

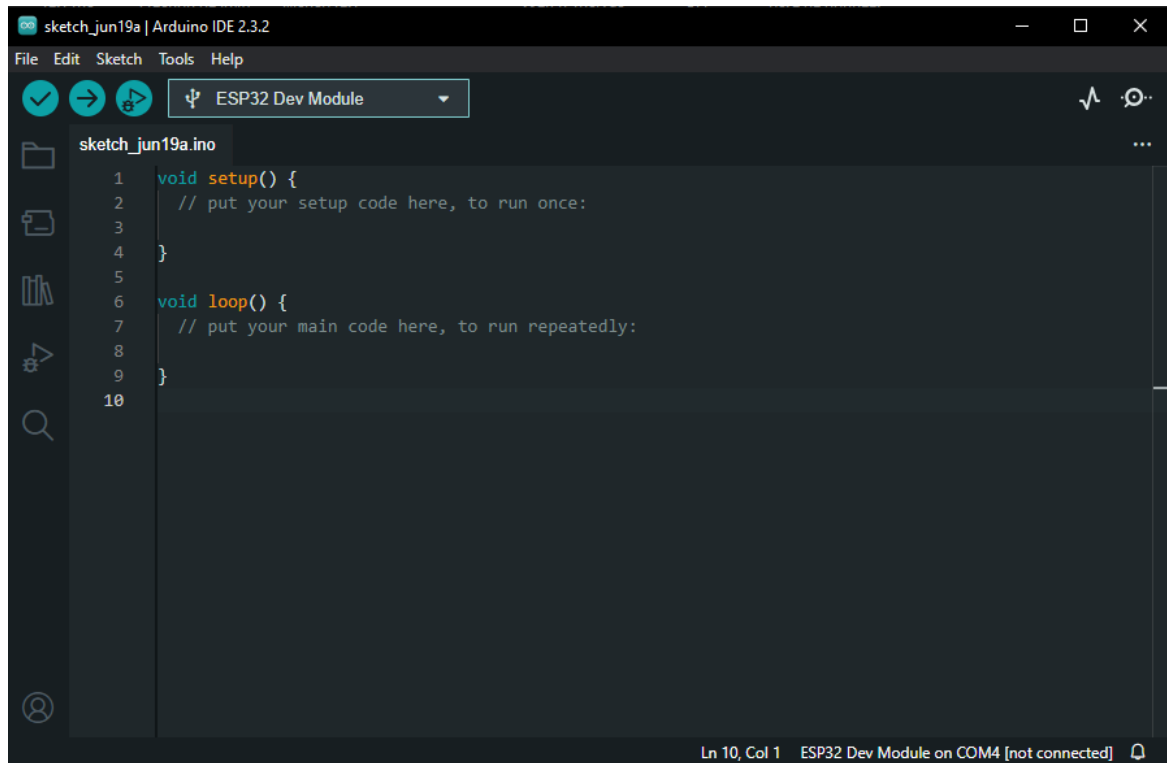


Figure 23 : Interface de logiciel Arduino IDE

## 7. Le schéma et le câblage

### 7.1. Tableau du câblage

Tableau de câblage

Table 3 : Capteur de pH

Les pins de capteur de pH	Pin ESP32
PO	34
VCC	5V
GND	GND

Table 4 : Capteur de température

Les pins de capteur de température	Pin ESP32
DATA	4
VCC	5V
GND	GND

Table 5 : Capteur de turbidité

Les pins de capteur de turbidité	Pin ESP32
A	35
V	5V
G	GND

Table 6 : Capteur de conductivité

Les pins de capteur de conductivité	Pin ESP32
A	36
+	5V
-	GND

## 7.2. Schéma Fritzing

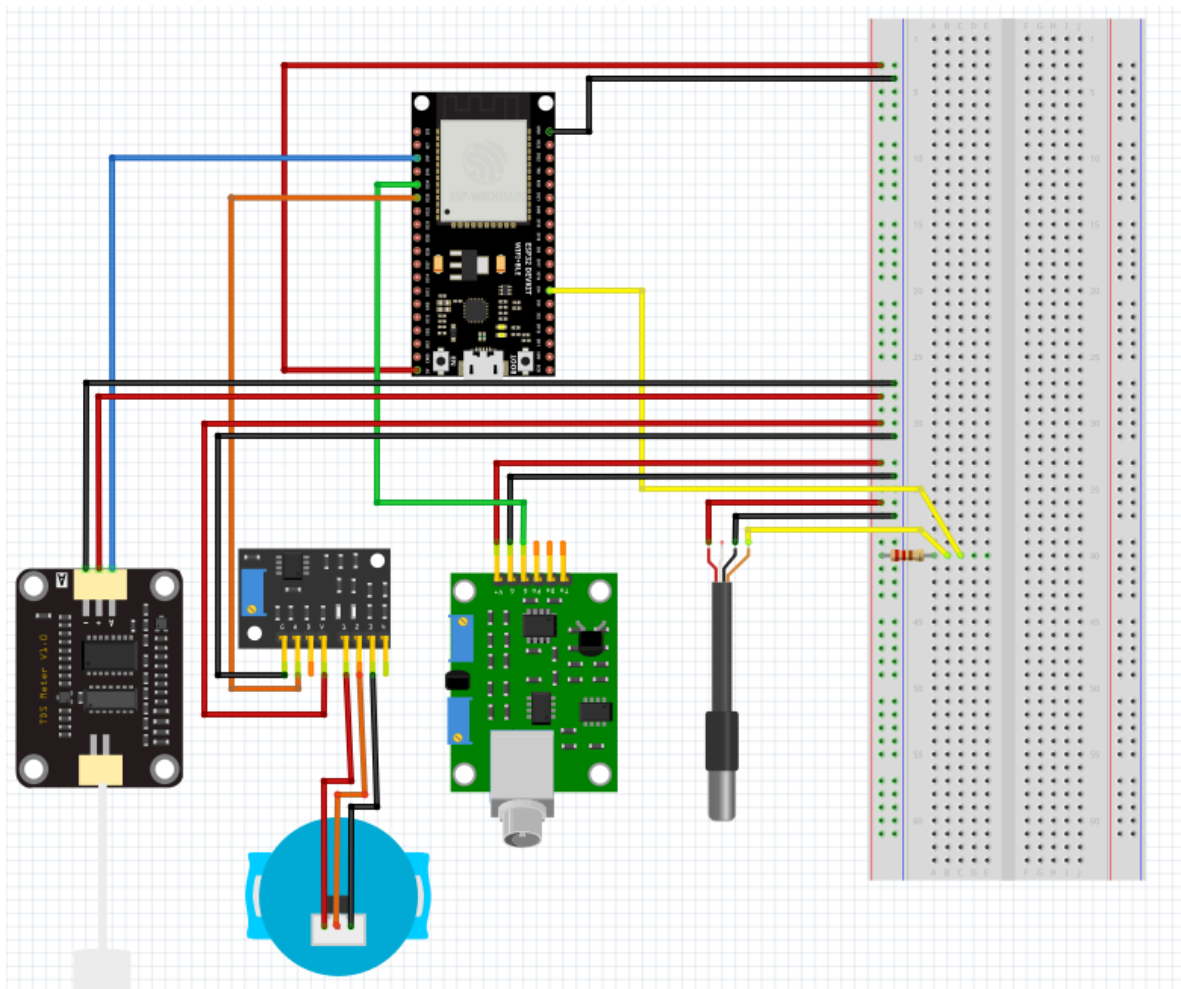


Figure 24 : Schéma Fritzing

## 8. Schéma synoptique

Ce schéma synoptique représente le fonctionnement général de notre système de télésurveillance de qualité des eaux.

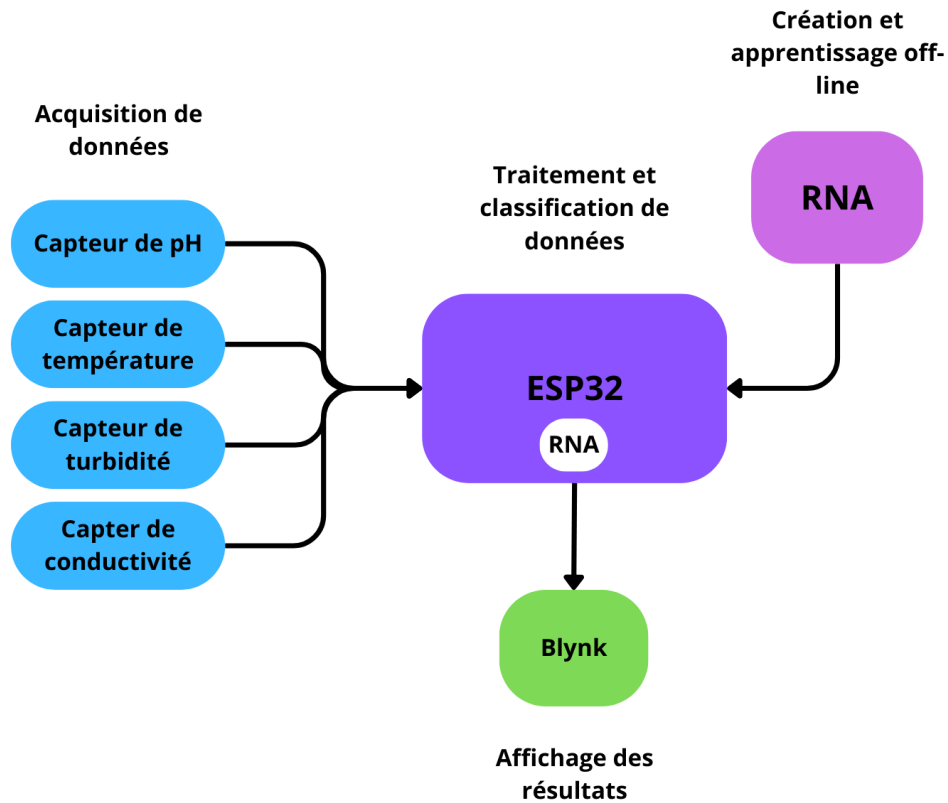


Figure 25 : Schéma synoptique

## 9. Mise en œuvre et évaluation

### 9.1. Architecture de réseau de neurones artificiels

#### 9.1.1. Phase d'apprentissage

Pour l'apprentissage, nous avons choisis la base de données citée auparavant, qui contient 1000 vecteurs entrées/sortie.

#### 9.1.2. Evaluation des performances

Après la phase d'apprentissage, nous avons évalué notre réseau, en calculant les erreurs de sortie. Il existe plusieurs critères d'erreurs, on a choisis les suivant :

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

$$MSE = \sum_I^N (|Y_1(i) - T_1(i)|)^2 / N$$

- La racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE (*Root Mean Square Error*)

$$RMSE = \sum_I^N [(|Y_1(i) - T_1(i)|)^2 / N]^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

**N**: Nombre d'échantillon d'essai

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

Voici une comparaison entre les différents modèles proposés en utilisant les critères d'erreurs précédentes et les performances du réseau.

Table 7 : Les performances et les erreurs correspondantes à chaque modèle

Modèle	Architecture RNA	MSE	RMSE	R
1	4x5x1	0,1014	0,318434	0,94041
2	4x10x1	0,0379	0,194679	0,97812
3	4x15x1	0,0306	0,174929	0,98226
4	4x20x1	0,0142	0,119164	0,99177
5	4x25x1	0,0455	0,213307	0,97404
6	4x50x1	0,0376	0,193907	0,97824

D'après les résultats de tableau précédent, on remarque que la meilleure performance est obtenue par le quatrième modèle, selon les critères d'erreur et la performance du réseau.

### 9.1.3. Implémentation du réseau dans la carte ESP32

Après avoir choisi l'architecture la plus performante, nous avons développé le programme de classification utilisant les poids et les biais et la fonction d'activation du réseau ainsi implémenté dans la carte ESP32. Le programme a pour tâche d'acquérir les signaux des quatre capteurs et de classer l'eau suivant les calculs effectuées par le réseau de neurones, ensuite transmettre toutes ces données vers la plateforme Blynk.

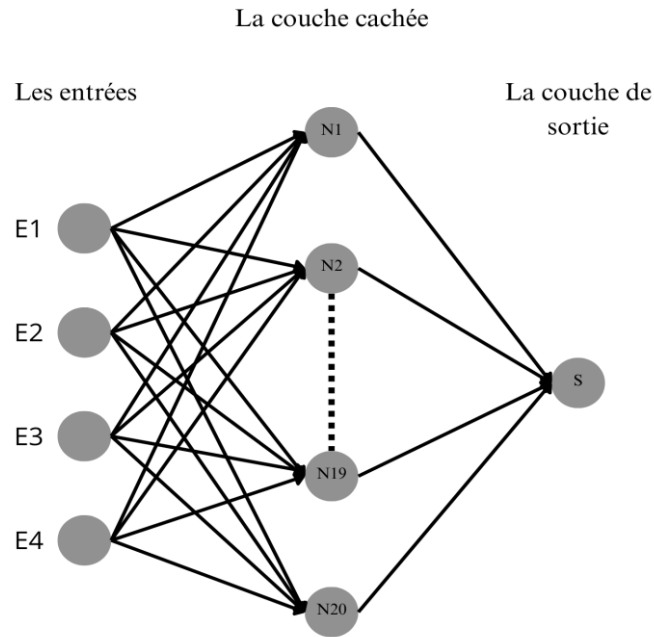


Figure 26 : Schéma de notre réseau de neurones artificiels

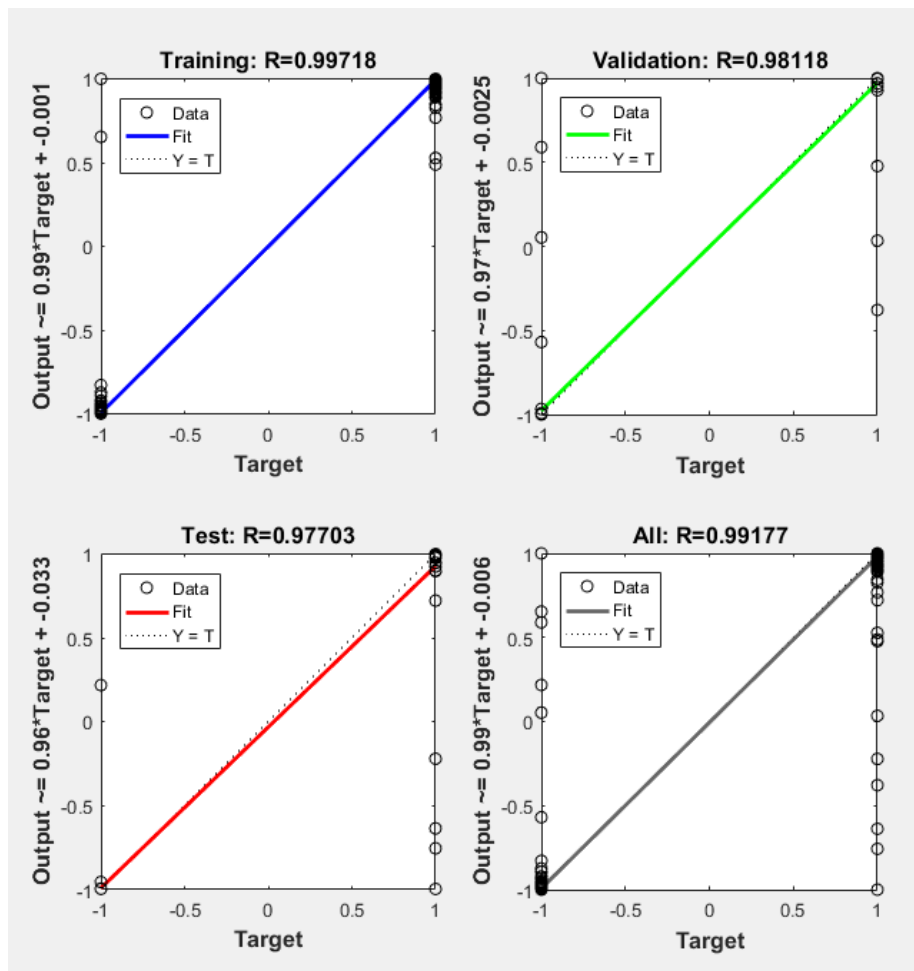


Figure 27 : Les performances du réseau de neurones artificiels

## 9.2. Les résultats obtenus sur la plateforme Blynk

Après la réalisation du système, voici deux exemples des deux cas possibles (eau potable/ eau non potable) :

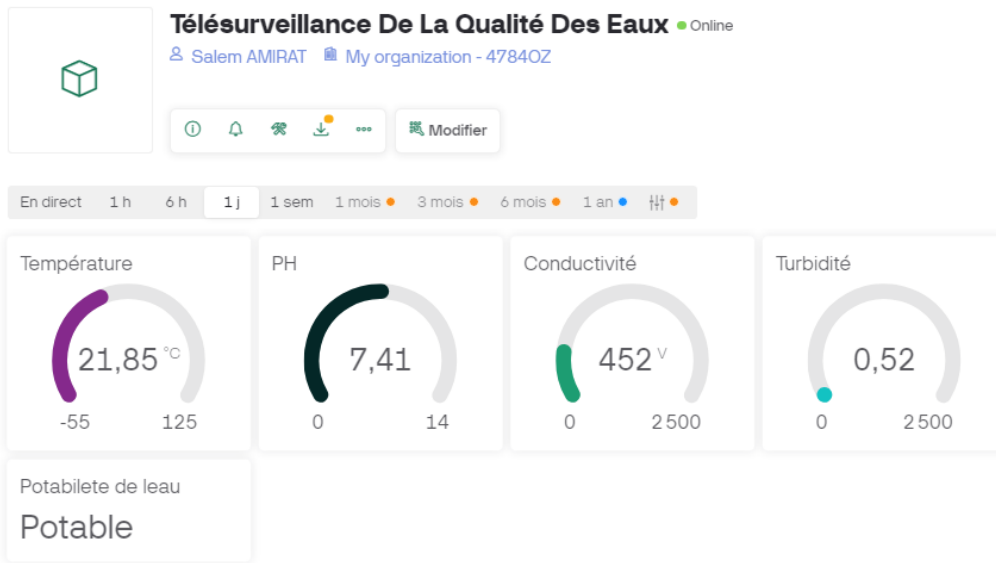


Figure 28 : Exemple de l'eau potable



Figure 29 : Exemple de l'eau non potable

Dans la première figure on remarque que l'eau est potable comme indiqué par le réseau de neurones, car les normes de potabilités sont respectées.

Dans la deuxième figure, l'eau n'est pas potable, parce que la valeur de pH est en dessous la norme de potabilité, même si les autres paramètres sont dans les normes.

## 10. Image de système réalisé

Voici notre système de télésurveillance basé sur la carte ESP32 et le capteur de pH, température, turbidité et conductivité relié avec des câbles et une plaque d'essai.

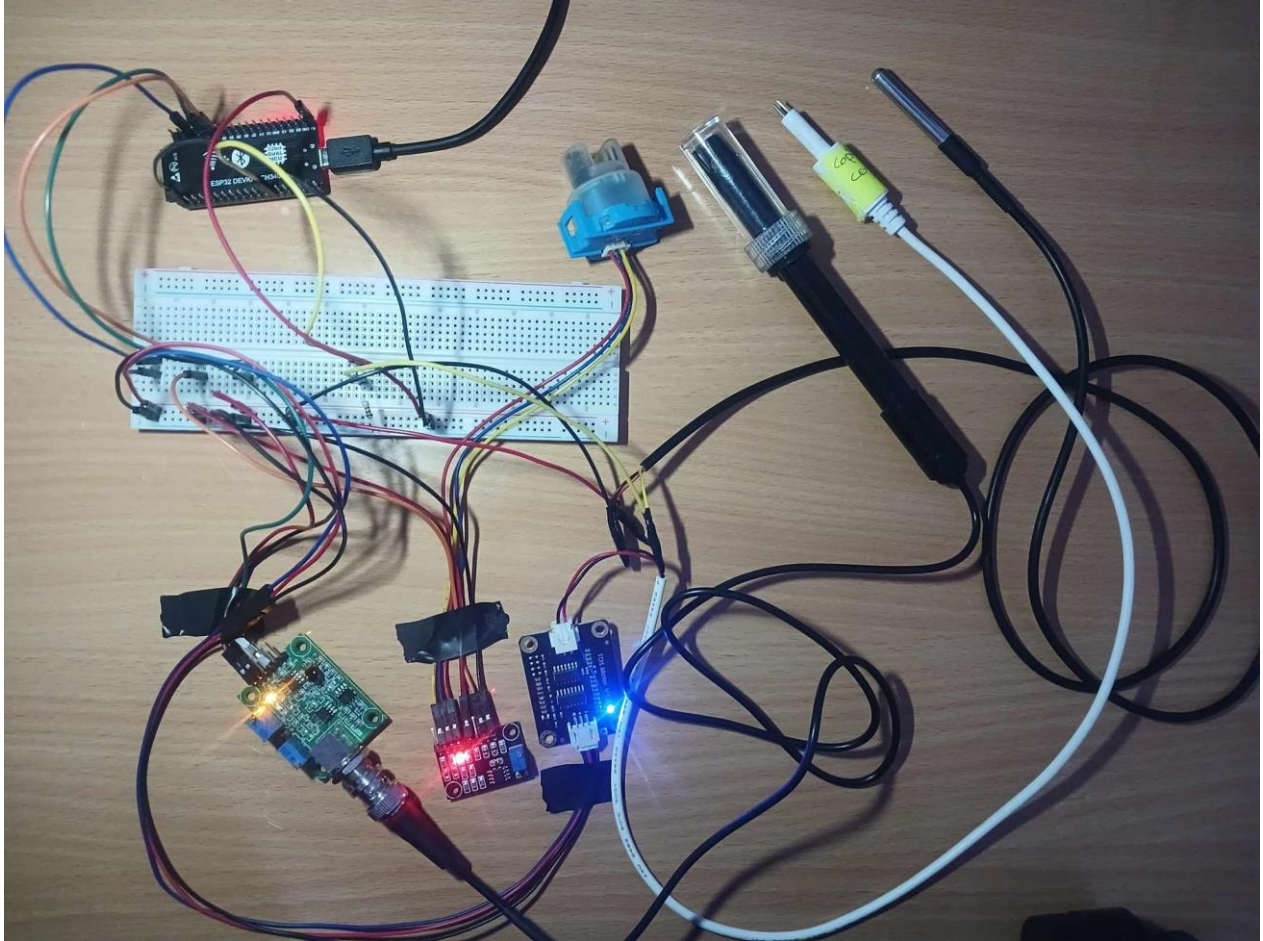


Figure 30 : Image de système réalisé

## 11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre système de télésurveillance et de contrôle de la qualité de l'eau, dans un premier temps nous avons parlé de la partie hardware c'est-à-dire des différents composants utilisés pour la réalisation (le microcontrôleur et les capteurs). Ensuite la partie software où nous avons créé et testé plusieurs réseaux de neurones avec le logiciel Matlab afin de choisir le meilleur modèle selon les critères d'erreurs et de performance. Enfin, on a présenté la plateforme Blynk qu'on a utilisé par la suite pour l'affichage des résultats obtenus auparavant par les capteurs et le réseau de neurones.



## Conclusion générale

Le contrôle et la surveillance de la qualité de l'eau représente un enjeu très important à l'heure actuelle où l'utilisation de cette ressource est en constante croissance à cause de l'augmentation de la population, de plus, la pollution des ressources d'eau potable est en augmentation à cause de plusieurs facteurs. La surveillance en permanence de la qualité de cette ressource est d'extrême importance.

C'est dans cet esprit que nous avons réalisé ce projet qui permet de mesurer en permanence quatre paramètres descripteurs de la qualité de l'eau en utilisant des capteurs précis (capteur de pH, de température, de conductivité et de turbidité) reliés à une carte ESP32, et de classer l'eau suivant sa potabilité en utilisant un RNA employé comme classifieur qui est élaboré en se basant sur une base de données réelle, l'aspect télésurveillance est assuré grâce à l'interface Blynk permettant une visualisation de tous ces résultats.

L'objectif principal est bien atteint car les résultats obtenus sont très satisfaisants et le système réalisé fonctionne bien. Tous de même, il reste ouvert à d'autres améliorations, à savoir : l'ajout d'autres capteurs pour augmenter la qualité de surveillance, l'enrichissement de la base de données pour augmenter la précision de la décision, l'utilisation d'autres protocoles de connexion et la réalisation d'une interface spécifique.

## Références bibliographiques

- [1] A. R. Garcia, « *Etude De La Congélation Comme Technique De Traitement Des Eaux : Applications Spécifiques* », Déc. 2004.
- [2] <https://pixels.com/featured/h2o-water-molecule-model-and-chemical-formula-peter-hermes-furian.html> Consulter : Mars 2024.
- [3] M-S. Ouali, « *Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux* », Deuxième édition. ISBN : 978-9961.0.0520.0.
- [4] 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.
- [5] <https://www.assistancescolaire.com/eleve/5e/physique-chimie/reviser-une-notion/5pea02> Consulter : Mars 2024.
- [6] <https://www.pinterest.fr/pin/567312884302151487/> Consulter : Mars 2024.
- [7] <https://visionwater.eu/fr/types-deau/> Consulter : Mars 2024.
- [8] Organisation Mondiale De La Santé, « *Directives De Qualité Pour L'eau De Boisson : 4e Ed. Intégrant Le Premier Additif* ». Organisation Mondiale De La Santé, 2017.
- [9] S. Attab, « *Amélioration De La Qualité Microbiologique Des Eaux Epurées Par Boues Activées De La Station D'épuration Haoud Berkaoui Par L'utilisation D'un Filtre A Sable Local* », Juill. 2013.
- [10] <https://www.cieau.com/espace-enseignants-et-jeunes/les-enfants-et-si-on-en-apprenait-plus-sur-leau-du-robinet/la-definition-de-leau-potable/#:~:text=Les%20param%C3%A8tres%20organoleptiques%20%3A%20ils%20concernent,pas%20de%20valeur%20sanitaire%20directe> Consulter : Mars 2024.
- [11] « *Water Temperature* », Environmental Measurement Systems <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/water-temperature/> Consulter le: Mars 2024.
- [12] <https://www.aquaportail.com/pictures2109/zero-absolu-degre-kelvin-celsius-fahrenheit.jpg> Consulter: Mars 2024.
- [13] « *Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids* », Environmental Measurement Systems <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/> Consulter: Mars 2024.
- [14] « *Electrical Conductivity Basics | Mho Siemens | Electronics Notes* »,

[https://www.electronics-notes.com/articles/basic\\_concepts/resistance/electrical-conductivity-conductance.php#:~:text=The%20electrical%20conductivity%20units%20are,the%20reciprocal%20of%20one%20ohm](https://www.electronics-notes.com/articles/basic_concepts/resistance/electrical-conductivity-conductance.php#:~:text=The%20electrical%20conductivity%20units%20are,the%20reciprocal%20of%20one%20ohm) Consulter: Mars 2024.

[15] « *What Is TDS in Water & Why Should You Measure It?* », Fresh Water Systems <https://www.freshwatersystems.com/blogs/blog/what-is-tds-in-water-why-should-you-measure-it#:~:text=The%20number%20of%20dissolved%20particles,of%20your%20overall%20water%20quality> Consulter: Mars 2024.

[16] Giselle, « *Quelle Est La Conductivité Aux Facteurs De Conversion TDS ? - Fiche Pratique Sur Lavise.Fr* », Lavise, 26 Juillet 2018 <https://www.lavise.fr/fiches/100708.html> Consulter le: Mars 2024.

[17] « *Ph Of Water* », Environmental Measurement Systems, <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/ph/> Consulter: Mars 2024.

[18] <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/traitement-de-l-eau/ph-conductivit%C3%A9-et-alcalinit%C3%A9/> Consulter: Mars 2024.

[19] « *Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity* », Environmental Measurement Systems <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/> Consulter: Mars 2024.

[20] « *Turbidity Standards - Quick Reference Guide* », The Laboratory People, 15 Mars 2013 <https://www.camlab.co.uk/blog/turbidity-standards-quick-reference-guide> Consulter: Mars 2024.

[21] B. F. Zohra, « *Etude Et Dimensionnement D'une Station D'épuration Des Eaux Usées De L'agglomération Urbaine De Sfisef (Wilaya De Sidi Bel Abbes)* », Master's Thesis, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2013.

[22] D.Armand, « *L'eau en danger* ». Edition : Milan. Toulouse, France, 1998. ISBN : 0000 0003 6035 04874.

[23] A.Pochon, « *Du champ à la source : retrouver l'eau pure* ». Edition : Trégueux : CEDAPA. France, 1991. ISBN : 2852570122 9782852570122.

[24] D. Blanchon, « *Auly Teddy, Hoffmann Frédéric Et Meyer Anne-Marie, 2011 - Le Petit Vocabulaire De l'Environnement. Bordeaux : Éditions Confluences, 88 P.* », Vol. 64, No 255, P. 450-451, Juill. 2011, Doi: 10.4000/Com.6354.

[25] World Health Organization, *A Global Overview Of National Regulations And Standards For Drinking-Water Quality*. Geneva: World Health Organization, 2018.

<https://apps.who.int/iris/handle/10665/272345> Consulter: Mars 2024.

[26] « *JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13, Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine* », 9 mars 2014, <https://www.joradp.dz/FTP/JO-FRANCAIS/2014/F2014013.pdf> , Consulter : Mars 2024.

[27] <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/robotique-presentation-historique-reseaux-neuronaux-31/#historique> Consulter : Avril 2024.

[28] <https://blog.clevy.io/fr/introduction-aux-reseaux-de-neurones-2-3-neurone-biologique-et-neurone-formel/> Consulter : Avril 2024.

[29] [https://www.researchgate.net/figure/Schematisation-dun-neurone-biologique-Ces-diverses-parties-peuvent-se-resumer-en-3\\_fig88\\_340225038](https://www.researchgate.net/figure/Schematisation-dun-neurone-biologique-Ces-diverses-parties-peuvent-se-resumer-en-3_fig88_340225038) Consulter: Avril 2024.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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.

[34] R. Lippmann, « *An introduction to computing with neural nets* ». IEEE ASSP Magazine, volume 4, n° 2, pp 4-22, Avril 1987.

[35] 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.

[36] S. Haykin, « *Neural networks: a comprehension foundation* ». 2nd Edition, Prentice Hall, 1999.

[37] « *Fouille de Données Data Mining Classification - Partie 4* », Cours d'Intelligence Artificielle, Master 1 Informatique, Université de Bouira.

[38] 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.

[39] J.A. Freeman, D.M. Shapriua, « *Neural Networks: algorithms, Application and Programming* ». Techniques Addison Wesley Publishing Company, INC, 1991.

[40] M.Parizeau : « *Réseau de neurone* ». Thèse de doctorat. Université de Laval, France, 2006.

- [41] D. HOWARD, M. BEALE? « *Neural Network Toolbox, For Use with MATLAB* » [http://cda.psych.uiuc.edu/matlab\\_pdf/nnet.pdf](http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/nnet.pdf) Consulter: Avril 2024.
- [42] 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.
- [43] M.H. Hassoun, « *Fundamentals of Artificial Neural Networks* ». The MIT Press, 1995.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] J.J. Hopfield, « *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities* ». Proc. Nat. Acad. Sci., pp 2554-2558, 1982.
- [47] T. Kohonen, « *Self-organized formation of topological correct feature maps* ». Biological Cybernetics, pp 59-69, 1982.
- [48] F. Rosenblatt, « *The Perceptron: A Perceiving and Recognizing Automaton* ». Technical report, Cornell Aeronautical Lab, New York (USA), 1957.
- [49] 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.
- [50] M. Weinfeld, « *Réseaux de neurones* ». Technique de l'ingénieur, H1990, 2003.
- [51] P. Gallinari, S. Thiria, Y. Lechevallier, O. Gascuel et S. Canu, « *Statistiques et méthodes neuronales* ». Chapitre 14, pp.230-243. Dunod, Paris, 1997.
- [52] <https://www.deeplearning4j.org> Consulté : Avril 2024.
- [53] D. Graupe, « *Principals of artificial neural* ». 2nd Edition, World Scientific Publishing, 2007.