

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté des Sciences

Département des Sciences Agronomiques



**Filière :** Sciences Agronomiques

**Option :** Aménagement Hydro-Agricole

**Mémoire de fin d'études :**

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Sciences Agronomiques

**Thème :**

*Modélisation des Variables Bio-Physico-Chimique des  
Eaux Usées Par les Réseaux de Neurones Artificielle : Une  
étude de cas STEP BATNA.*

**Présenté par :**

- Djareddir Rayane
- Djelamani Sarra
- Zouaia Chaima
- Guerries Rayane
- Mouats Rayene

**Membres de Jury:**

Dr : HEBAL Aziz	(MCA) <b>Président</b>	Université du 20 Août 1955- Skikda
Mr : SAADOUNE Abdelaziz	(MAA) <b>Examineur</b>	Université du 20 Août 1955 - Skikda
Pr : HEDDAM Salim	(PR) <b>Promoteur</b>	Université du 20 Août 1955 - Skikda

**Année universitaire : 2022-2023**



# Remerciements

*Tous d'abord, nous remercions ALLAH le Tout Puissant de nous avoir éclairé la voie du savoir et donné la santé, la volonté et la force pour achever ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs et sincères remerciement à tous ceux qui nous ont aidé de Près ou de loin à élaborer ce travail et plus particulièrement à :*

*Mr .Heddam Salim pour la confiance qu'il nous a accordé en acceptant de nous encadrer ,pour sa présence, son aide et ses suggestions.*

*Nous remercions cordialement les membres du jury Mr.Hebal Aziz et Mr.Saadoune Abdelaziz qui nous ont fait l'honneur de l'examiner.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'ensemble des Enseignants de l'université de 20 Aout 1955 SKIKDA qui ont contribué à notre formation et pour avoir enrichi notre connaissances scientifiques et techniques.*

*Ainsi qu'à tout le personnel de la station d'épuration des eaux usées de la Wilaya de SKIKDA et la direction de l'ONA.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.*



# Dédicaces

*A mon père.*

*Au premier homme de ma vie, celui qui n'a jamais ménagé ses efforts pour moi, celui qui n'a cessé de me propulser, celui qui voit en moi ce que je n'ose pas voir.*

*A ma mère.*

*A la femme de ma vie, la plus belle et la plus attentionnée, celle qui a toujours cru en moi même lorsque je doutais, celle qui m'a épaulé et celle qui a toujours été de mon cotés.*

*A ma chère sœur Kawthar qui ne m'a jamais lâchée la main.*

*A mon adorable frère Ayoub qui ne lui me refuse jamais rien.*

*Je remercie aussi mes grands-mères Djamila et Fatma et mes grands- pères Ali et Rabah que dieu leur fasse miséricorde.*

*Et en fin Merci à toute ma famille et mes amies je vous aime.*

*Djareddir rayane*



## **Dédicaces**

***C'est avec un grand plaisir et une grande fierté que je dédie ce modeste travail ;***

***Aux êtres les plus chers au monde, Mon défunt père Allah yarahmou en implorant Dieu tout de l'accueillir en son vaste paradis.***

***A Ma chère mère pour son courage et sa dévotion en leur exprimant tout mon respect et mon amour et en leur témoignant toute ma reconnaissance et ma gratitude pour leurs efforts et leurs sacrifices fournis pour ma réussite.***

***A mes sœurs ; Soumia, Roufaida , Maria.***

***A mon frère ; Ahmed Amir.***

***A ma petite princesse ; Chahde.***

***A mon adorable élève; nidal***

***A tous mes amis ;***

***Chaima Zouaia, Khawla Kettouche, mariem souilah Hasna Mebarek falouti Amira Bouchellik, qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.***

***A tous ceux que j'aime.***

***Gueries Rayane***



# Dédicaces

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail, au quelle j'ai consacré tous mon cœur, ma foi, et toute mon espérance et que J'ai pu terminer grâce à la volonté de dieu.*

*Je le dédie :*

*A mon père ;*

*L'aboutissement de ce travail est le couronnement de tout ce que tu à fait pour moi. Je te le dédie, qu'il soit à la hauteur de tes attentes.*

*A ma mère ;*

*Ma douce et tendre, Ce travail est le fruit de tes prières et de tes encouragements. Que Dieu te donne longue vie pour que tu puisses profiter des fruits de l'arbre que tu as planté.*

*A ma grande mère FATIMA, Que dieu la garde*

*A mes chers frères ;*

*Mon frère IMED et Ma sœur MERIEM, Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et santé.*

*A mes adorables Amies ;*

*Rayane, Sabrina, Khawla, Amira, Kenza, je vous aime.*

*A tous ceux qui ont contribué à ma réussite.*

**Zouaia Chaima**

# Dédicaces

**Tout d'abord, notre succès jusqu'à aujourd'hui n'a été facilité que par Dieu. Dieu soit loué, et ce travail n'aurait pas été entre vos mains aujourd'hui, sans le succès de Dieu.**

**Je veux le dédier aujourd'hui à :**

***A mon principal soutien et mentor dans chaque travail que je fais,  
Aux mère et père les plus merveilleux du monde qui ont m'a  
transmis leur générosité et m'ont appris que Je pardonne, aime et  
fais de mon mieux et je me souviens de Dieu à chaque pas que j'ai  
l'intention de faire, et les mots ne seront jamais suffisants pour  
remercier ma chère mère et mon chère père...Sihem et Ahcen.***



***Mouats Rayene***

# Dédicaces



*Je remercie notre bon dieu « ALLAH » le tout puissant de m'avoir guidé,  
aidé et donné la force et le courage pour accomplir ce travail.*

*Je dédie l'aboutissement de mes efforts durant toutes ces  
années : A ma mère,*

*Ma seule lumière, Qui a aidé et guidé mes pas par sa tendresse, à qui tous  
les mots du monde n'arriveront jamais à la décrire.*

*A mon père,*

*qui a toujours été là pour moi, qui n'a jamais ménager ses efforts pour  
moi*

*A mon grand- père mon modèle, ma fierté je ne serai le décrire un grand  
homme à qui je dois beaucoup*

*A la mémoire de ma très chère grand-mère qui elle attendait ma réussite avec  
impatience je t'aime DIDA*

*A ma sœur*

*ma confidente mon pilier*

*qui est toujours à mes côtés*

*A ma famille mes amies que j'aime beaucoup*

**SARRA DJELAMANI**



## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى إعداد نموذج رياضي لحساب الطلب البيوكيميائي للأوكسجين لمدة 5 أيام ( $DBO_5$ ) المقاس على مستوى محطة معالجة المياه القذرة لمدينة باتنة. قمنا باستعمال تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية من نوع بارسابترون متعدد الطبقات (MLPNN) مع مقارنة النتائج بالمنحدر الخطي المتعدد (MLR). قمنا بجمع ومراجعة قاعدة بيانات تحتوي على القياسات اليومية لنوعية المياه على مستوى مدخل (entré) ومخرج المحطة (sortie) وهذا حتى نتأكد من أخذ صورة واضحة على نوعية المياه الغير معالج والمعالج. بالنسبة لنوعية المياه استعملنا المتغيرات التالية: (i) درجة حرارة الماء (Tw)، (ii) درجة الحموضة (PH)، (iii) حجم الماء (Q)، (iv) المواد العالقة (MES)، (v) الناقلية الكهربائية (SC)، (vi) الطلب الكيميائي على الأوكسجين (DCO)، الطلب البيوكيميائي على الأوكسجين لمدة 5 أيام ( $DBO_5$ ) المتوفرة على مستوى محطة معالجة المياه القذرة والتي توافقت الفترة الممتدة من 2006/03/1 إلى 2009/04/7 والمقدرة بـ 1134 معلومة يومية. لإعداد النماذج الرياضية قمنا بتقسيم المعطيات إلى قسمين: 70% من أجل تدريب وتطوير النموذج (Apprentissage) و30% الباقية من أجل التحقق من فعالية النتائج (Validation). الهدف هو حساب  $DBO_5$  بدلالة  $SC, MES, Q, PH, Tw, DCO$  وهذا اعتماداً على تجريب عدة تشكيلات لنوعية الماء وفي المجمل قارنا ما بين 12 نموذج رياضي (MLPNN1 à MLPNN12) (MLR1 à MLR12). من أجل تقييم النماذج الرياضية استعملنا 4 معاملات: معامل الارتباط الخطي (R)، معامل الناش سبتكوف (NSE)، متوسط الخطأ المطلق (MAE)، وجذر متوسط الخطأ المربع (RMSE). أثبتت النتائج المتحصل عليها فعاليتها على مستوى مدخل المحطة (entré) حيث كانت نماذج MLPNN احسن من نتائج MLR بمعاملات جيدة قدرت بـ:  $R=0.814$  ;  $NSE=0.659$  ;  $RMSE=58.216$  ;  $MAE=42.970$  ، مقارنة بالقيم  $R=0.740$  ;  $NSE=0.540$  . أما النتائج على مستوى مخرج المحطة فكانت ضعيفة جداً. أثبتت هذه الدراسة انه يمكن استعمال الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للنمذجة الرياضية والتي قد تساهم وتساعد بفعالية في اتخاذ القرار.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة الرياضية، الشبكات العصبية الاصطناعية، محطة معالجة المياه القذرة، الطلب البيوكيميائي للأوكسجين، تدريب النموذج.

## Résumé

La présente étude entre dans le cadre de la préparation du mémoire de fin d'étude (master II) en aménagement Hydro-Agricole. L'objectif était le développement d'un modèle mathématique à base de réseau de neurones artificiels (ANN) pour la modélisation de la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours ( $DBO_5$ ) au niveaux de la station d'épuration (STEP) des eaux usées de la ville de Batna. Nous avons utilisé un perceptron multicouche (MLPNN) avec une comparaison avec le modèle à base de régression linéaire multiple (MLR). Nous avons utilisé une base de données journalières contenant les mesures de plusieurs variables à l'entrée et à la sortie de la STEP, à savoir : La température de l'eau ( $T_w$ ), le potentiel d'hydrogène (PH), la conductivité électrique (SC), le volume des eaux usées (Q), les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours ( $DBO_5$ ). La base de données correspond à la période allant de 01/03/2006 à 07/04/2009 avec au total 1134 données. Pour le développement des modèles nous avons divisé la base de données en deux parties : 70% pour l'apprentissage et 30% pour la validation des modèles. La configuration des modèles était la modélisation de la  $DBO_5$  comme variable à modéliser (Output) en utilisant les  $T_w$ , PH, SC, Q, MES, DCO comme (Inputs). Au total nous avons tester 12 combinaisons des inputs (MLPNN1 à MLPNN12) et (MLR1 à MLR12), pour la validation et la vérification de la capacité prédictive des modèles nous avons utilisé 4 indices de performance : Le coefficient de corrélation (R), Nash Sutcliffe (NSE), l'erreur absolue moyen (MAE) et la racine carrée de l'erreur moyen (RMSE). Nous avons obtenu de bon résultats avec les modèles MLPNN à l'entrée de la STEP avec des indices de l'ordre de  $R=0.814$ ,  $NSE=0.659$ ,  $RMSE=58.216$ ,  $MAE=42.970$ , par contre les valeurs obtenues par le modèle MLR était de l'ordre de  $R=0.740$ ,  $NSE=0.540$ ,  $RMSE=67.63$ ,  $MAE=49.503$ . Cependant les résultats obtenus à la sortie de la STEP étaient très faibles. La présente étude à montrer la possibilité d'utilisation des réseaux de neurones artificiels comme outils de modélisations et d'aide à la décision.

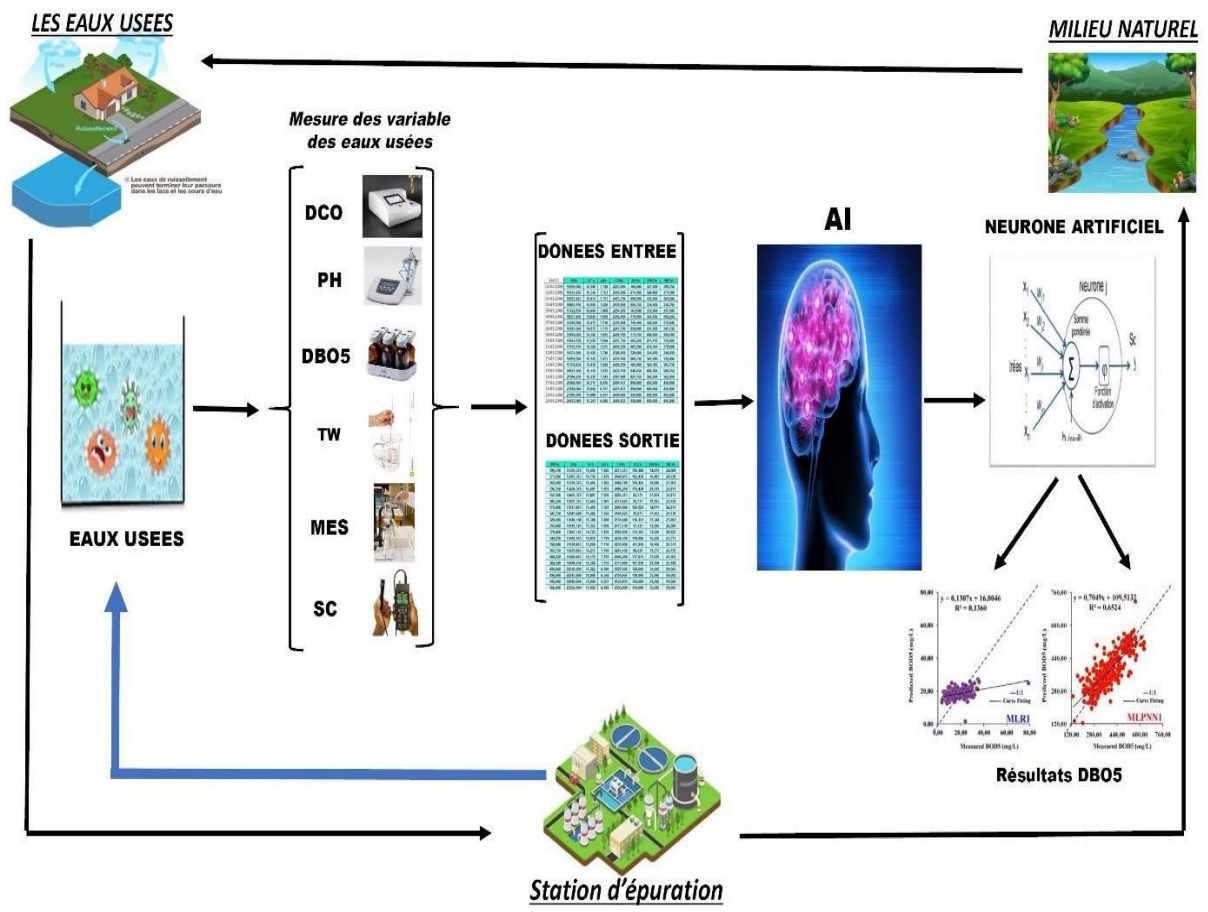
**Mots-Clés.** Modélisation, réseaux de neurones artificiels, MLPNN, ANN, STEP,  $DBO_5$ , qualité des eaux usées, apprentissage, validation.

## Abstract

The present master's thesis in agriculture water management was focused on modelling biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>) using artificial neural network in wastewater treatment plant (STEP). Using daily data collected at Batna wastewater treatment plant, Algeria, we have tried to develop an artificial neural network model for better prediction of BOD<sub>5</sub> measured at the inlet and outlet of the STEP. In total, 1134 daily data corresponding to the period ranging from 01/03/2006 à 07/04/2009 was used for the developing the models. The influent and effluent wastewater quality variables measured at the inlet and outlet of the STEP were respectively: (i) raw water temperature ( $T_w$ ), (ii) raw water pH, (iii) raw water specific conductance (SC), (iv) the wastewater flow ( $Q$ ), (v) the total suspended solid (MES), (vi) the chemical oxygen demand (DCO), and (vii) the biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>). The BOD<sub>5</sub> was the variable to be modelled. Dataset was divided into two parts: (i) the training subset with ratio of 70% and (ii) the validation subset with 30% ratio. The multilayer perceptron neural network (MLPNN) was use as machine learning and their performances were compared with those of the standalone multiple linear regression (MLR). The performances of the developed models were evaluated using four performances metrics namely, the mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE), the correlation coefficient (R), and the Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE). Obtained results revealed that, the MLPNN was more accurate exhibiting performances indices of approximately,  $R \approx 0.814$ ,  $NSE \approx 0.659$ ,  $RMSE \approx 58.216$ ,  $MAE \approx 42.970$ , compared to the values of  $R \approx 0.740$ ,  $NSE \approx 0.540$ ,  $RMSE \approx 67.63$ ,  $MAE \approx 49.503$ . At the outlet of the STEP, the obtained results were extremely poor showing the limitation of the models in providing accurate predictive accuracies. However, the acceptable results obtained at the inlet of the STEP were very promising and can help in developing a good modelling approach in future studies.

**Keywords.** Modelling, artificial neural network, ANN, MLPNN, BOD<sub>5</sub>, COD, STEP, wastewater quality, training, validation.

# Graphical Abstract & Résumé Graphique



## Liste des Tableaux

---

### *Chapitre I : Généralités sur l'Épuration des Eaux Usées*

---

Tableau I.1. Concentrations de polluants dans les eaux usées urbaines	05
Tableau I.2. Principaux types de pollution des eaux continentales	10
Tableau I.3. Avantages et inconvénients des traitements biologiques	16

---

### *Chapitre II : Présentation de la station d'épuration (STEP) de la ville de Batna*

---

Tableau II.1. Débits des effluents de la STEP de Batna	23
Tableau II.2. Caractéristiques des effluents de la STEP de Batna	23

---

### *Chapitre IV : Présentation de la Base de Données et Description de l'Approche de Modélisation*

---

Tableau IV.1. Statistiques descriptive de la base de données utilisées : Entrée de la STEP	46
Tableau IV.2. Statistiques descriptive de la base de données utilisées : Sortie de la STEP	47
Tableau IV.3. The input combinations of different models	47

---

### *Chapitre V : Résultats de la Modélisation de la Demande Biochimique en Oxygène Pendant Cinq Jours (DBO<sub>5</sub>)*

---

Tableau V.1. Performances des différents MLPNN et MLR modèles : Entrée de la STEP	59
Tableau V.2. Performances des différents MLPNN et MLR modèles : Sortie de la STEP	62

## Liste des Figures

### Chapitre I : Généralités sur l'Épuration des Eaux Usées

<b>Figure I.1.</b> Schéma d'un réseau unitaire	06
<b>Figure I.2.</b> Schéma d'un système séparatif	06
<b>Figure I.3.</b> Schéma d'un système pseudo-séparatif	07
<b>Figure I.4.</b> Les différents procédés d'épuration des eaux usées	11
<b>Figure I.5.</b> Le prétraitement	12
<b>Figure I.6.</b> Coagulation et Flocculation	13
<b>Figure I.7.</b> Mode de fonctionnement de lit bactérien	14
<b>Figure I.8.</b> Fonctionnement de disque biologique	15
<b>Figure I.9.</b> Traitement par boue activée	15
<b>Figure I.10.</b> Lagunage naturel	16

### Chapitre II : Présentation de la station d'épuration (STEP) de la ville de Batna

<b>Figure II.1.</b> Localisation de station Batna	22
<b>Figure II.2.</b> Station d'épuration de Batna	22
<b>Figure II.3.</b> Schéma général de la station d'épuration de la ville de Batna	24
<b>Figure II.4.</b> Photo Pré-dégrillage grossier	25
<b>Figure II.5.</b> Photo vis d'Archimède	25
<b>Figure II.6.</b> Photo du dégrilleur mécanique	26
<b>Figure II.7.</b> Photo du dessableur-déshuileur	26
<b>Figure II.8.</b> Échantillonnage primaire (eau brute)	26
<b>Figure II.9.</b> Photo des décanteurs primaires	27
<b>Figure II.10.</b> Photo du bassin d'aération	28
<b>Figure II.11.</b> Décanteurs secondaires (Clarificateurs)	29
<b>Figure II.12.</b> Canal de comptage et de mesure (eau épurée)	29
<b>Figure II.13.</b> Photo de la station de dosage d'hypochlorite de sodium	29
<b>Figure II.14.</b> Photo du bassin de stabilisation	30
<b>Figure II.15.</b> Photo de l'épaississeur	31
<b>Figure II.16.</b> Photo du filtre à bandes	31
<b>Figure II.17.</b> Photo des lits de séchage des boues	31
<b>Figure II.18.</b> Photo du pH mètre HACH utilisé	33
<b>Figure II.19.</b> Photo du DBO mètre HACH	34
<b>Figure II.20.</b> Photo du bloc chauffant	35
<b>Figure II.21.</b> Photo du spectrophotomètre	35

---

**Chapitre III : Présentation des Modèles à base des Réseaux de Neurones  
Artificiels (ANN)**

---

<b>Figure III.1.</b> Neurones biologiques	39
<b>Figure III.2.</b> Schéma d'un neurone formel	40
<b>Figure III.3.</b> Topologie des réseaux de neurones	40
<b>Figure III.4.</b> Exemple de réseaux de neurones non bouclées	41
<b>Figure III.5.</b> Réseau de Neurones Monocouche	41
<b>Figure III.6.</b> Le Perceptron Multicouches MLPNN	42
<b>Figure III.7.</b> Réseau neuronal perceptron multicouche bouclé	42
<b>Figure III.8.</b> Apprentissage supervisé	43
<b>Figure III.9.</b> Apprentissage non supervisé	44

---

**Chapitre IV : Présentation de la Base de Données et Description de l'Approche  
de Modélisation**

---

<b>Figure IV.1.</b> Lancement du logiciel Statistica	49
<b>Figure IV.2.</b> Accès à la base des modèles réseau de neurones artificiels	49
<b>Figure IV.3.</b> Sélection de la plage des données à utiliser	50
<b>Figure IV.4.</b> Sélection de la fonction de régression	50
<b>Figure IV.5.</b> Division de la base de données en apprentissage et validation	51
<b>Figure IV.6.</b> Identification des variables de sortie (Target) et d'entrée (Inputs)	51
<b>Figure IV.7.</b> Choix de la fonction d'activation des neurones	52
<b>Figure IV.8.</b> Lancement de l'apprentissage et affichage des résultats	52
<b>Figure IV.9.</b> Choix du meilleur modèle	53
<b>Figure IV.10.</b> Affichage des résultats partie apprentissage et partie validation	53
<b>Figure IV.11.</b> Transfert des données vers un fichier Excel	54

---

**Chapitre V : Résultats de la Modélisation de la Demande Biochimique en  
Oxygène Pendant Cinq Jours (DBO<sub>5</sub>)**

---

<b>Figure V.1.</b> Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO <sub>5</sub> à l'entrée de la STEP : validation data & modèles MLPNN	57
<b>Figure V.2.</b> Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO <sub>5</sub> à l'entrée de la STEP : validation data & modèles MLR	58
<b>Figure V.3.</b> Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO <sub>5</sub> à la sortie de la STEP : validation data & modèles MLPNN	60
<b>Figure V.4.</b> Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO <sub>5</sub> à la sortie de la STEP : validation data & modèles MLR	61



## *Table des Matières*

<b>Introduction Générale</b>	<b>01</b>
<b><i>Chapitre I : Généralités sur l'Épuration des Eaux Usées</i></b>	<b>03</b>
I.1. Introduction	04
I.2. Définition d'une eau usée	04
I.3. Origine des eaux usées	04
I.3.1. Origine domestique	04
I.3.2. Origine pluviale	04
I.3.3. Origine industrielle	05
I.4. Composition des eaux usées	05
I.5. Les réseaux d'assainissement	05
I.5.1. Les réseaux unitaire	05
I.5.2. Les réseaux séparatifs	06
I.5.3. Système pseudo-séparatifs	06
I.6. Caractéristique des eaux usées	07
I.6.1. Les caractéristiques physique	07
I.6.1.1. La température	07
I.6.1.2. Goût et Odeur	07
I.6.1.3. Couleur	07
I.6.1.4. Turbidité	08
I.6.2. Les caractéristiques chimique	08
I.6.2.1. Les matières en suspension (MES)	08
I.6.2.2. Conductivité électrique	08
I.6.2.3. PH	08
I.6.2.4. La demande biologique en oxygène (DBO)	08
I.6.2.5. La demande chimique en oxygène (DCO)	08
I.6.2.6. L'azote	09
I.6.2.7. Le Phosphore	09
I.6.2.8. L'Oxygène Dissous	09
I.6.3. Les caractéristiques biologique	09
I.7. La pollution	09
I.7.1. Définition de la pollution	09
I.7.2. Types de pollution	10
I.7.2.1. Pollution physique	10
I.7.2.2. Pollution chimique	10
I.7.2.3. Pollution biologique	10
I.8. Procédés d'épuration des eaux usées	11
I.8.1. Procédés d'épuration physico-chimique	11
I.8.1.1. Prétraitement	11
I.8.1.2. Traitement primaire	12
I.8.2. Procédés d'épuration biologique (secondaire)	13

I.8.2.1. Les traitements aérobies	13
I.8.2.2. Traitement anaérobies	16
I.8.3. Le traitement tertiaire	17
I.8.4. Traitement des boues	17
I.8.4.1. Origine, nature et composition des boues	17
I.8.4.2. Différentes étapes de traitement des boues	18
I.8.4.3. Stabilité ou digestion des boues	18
I.8.4.4. Traitement de l'épaississement et de concentration des boues	18
I.8.4.5. Déshydratation	18
I.8.4.6. Le séchage	18
I.9. La réutilisation des eaux usées épurées	18
I.9.1. Usage agricole	19
I.9.2. Usage industriel	19
I.9.3. Usage domestique et municipal	19
I.10. Conclusion	19

## ***Chapitre II : Présentation de la station d'épuration (STEP) de la ville de Batna***

20

II.1. Introduction	21
II.2. Historique et localisation de la STEP de BATNA	21
II.3. Situation géographique et données de base de la STATION	22
II.4. Description du procédé de fonctionnement de la STEP de Batna	24
II.4.1. Ligne d'eau	24
II.4.1.1. Zone 01 : Prétraitement	24
II.4.1.2. Zone 02 : Décantation primaire	26
II.4.1.3. Zone 03 : Traitement Biologique	27
II.4.1.4. Zone 04 : Décantation secondaire et Désinfection	28
II.4.2. Ligne des boues	30
II.4.2.1. Zone 05 : Stabilisation des boues	30
II.4.2.2. Zone 06 : Déshydratation des boues	30
II.5. Matériel et méthodes des analyses effectuées dans la STEP de Batna	32
II.5.1 Echantillonnage	32
II.5.2 Matériels de prélèvement	32
II.6. Analyses effectuées	32
II.6.1. Mesure de la température	32
II.6.2. Mesure du Ph	32
II.6.3. Matières en suspension (MES)	33
II.6.4. Mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO5)	34
II.6.5. Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)	35
II.7. Conclusion	36

<b><i>Chapitre III : Présentation des Modèles à base des Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)</i></b>		<b>37</b>
III.1. Introduction		38
III.2. Historique		38
III.3. Neurones biologique		38
III.4. Neurones formel		40
III.5. Architecture des réseaux de neurones		40
III.5.1. Réseaux de neurones non bouclé		41
III.5.1.1. Perceptron Monocouche		41
III.5.1.2. Perceptron Multicouches		41
III.5.2. Réseaux de neurones bouclés		42
III.6. Modélisation par les réseaux de neurones		43
III.6.1. Les étapes de la modélisation		43
III.7. Type d'apprentissage		43
III.7.1. Apprentissage supervisé		43
III.7.2. Apprentissage non supervisé		43
III.8. Conclusion		44
<b><i>Chapitre IV : Présentation de la Base de Données et Description de l'Approche de Modélisation</i></b>		<b>45</b>
IV.1. Introduction		46
IV.2. Critères de validation des modèles		48
IV.3. Développement des modèles MLPNN avec le logiciel STATISTICA.		49
IV.4. Conclusion		54
<b><i>Chapitre V : Résultats de la Modélisation de la Demande Biochimique en Oxygène Pendant Cinq Jours (DBO<sub>5</sub>)</i></b>		<b>55</b>
V.1. Introduction		56
V.2. Résultats de la modélisation de la DBO <sub>5</sub> : Entrées de la STEP		56
V.3. Résultats de la modélisation de la DBO <sub>5</sub> : Sortie de la STEP		59
V.4. Conclusion		62
<b>Conclusion générale</b>		<b>63</b>

## ***Introduction Générale***

L'eau est essentielle pour la vie. L'importance de l'eau pour la vie comme composant de l'écosystème mondial n'est plus à démontrer. Cette ressource qui répond aux besoins fondamentaux de l'homme est un élément-clé du développement en particulier pour générer et entretenir la prospérité par le biais de l'agriculture, de la pêche, de la production d'énergie, de l'industrie, des transports et du tourisme. En outre, l'eau est vitale pour tous les écosystèmes du monde. La plupart des activités humaines qui utilisent de l'eau produisent des eaux usées. Étant donné que la demande d'eau dans son ensemble augmente, la quantité d'eaux usées produites, et leur charge polluante globale sont en augmentation constante dans le monde entier.

La pollution de l'eau affectant les rivières, mers, eaux souterraines et les lacs est le résultat du rejet d'eaux usées dans la nature sans ou avec un traitement insuffisant, entraînant ainsi une dégradation de l'habitat et une perturbation de l'équilibre de l'écosystème. L'épuration des eaux usées a pour résultat de produire une eau propre, apte à être rejetée dans le milieu naturel, en faisant appel aux procédés de séparation liquide-solide. Les phénomènes physiques, physico-chimiques et biologiques mis en jeu permettent de concentrer les éléments polluants de l'eau et leur produit de transformation dans des suspensions plus ou moins concentrées dénommées boues. Réutiliser les eaux usées d'une collectivité consiste à récupérer les eaux d'égout, les traiter dans une station d'épuration (STEP) pour ensuite être déversées soit dans le milieu naturel ou être utilisées pour d'autres usages et en particulier en agriculture et dans d'autres domaines (industries, recharge des nappes, besoins municipaux).

L'intelligence artificielle est un domaine de l'information qui se concentre sur le développement de système informatique capable d'exécuter des tâches qui nécessitent l'intelligence humaine, elle utilise des algorithmes d'apprentissage automatique, des réseaux de neurones artificiels, des systèmes experts et d'autres techniques pour simuler l'intelligence humaine. L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la gestion des ressources en eau, et cela permet le développement des modèles mathématiques capables d'apporter des aides à la décision, de simuler et prédire.

L'objectif de notre travail, de recherche est de développer un modèle mathématique qui permet d'estimer la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours ( $DBO_5$ ), en fonction de six variables caractérisant la qualité des eaux usées, à savoir le potentiel d'hydrogène (pH), la température de l'eau ( $T_w$ ), la conductivité électrique de l'eau (SC), les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO), et le volume des eaux usées (Q). Les variables sont mesurées à l'entrée et à la sortie de la STEP de la villa de Batna, et cela pour évaluer le degré d'influence de chaque variable sur la  $DBO_5$ .

Pour atteindre nos objectifs nous avons scindé notre travail en cinq chapitres:

- ❖ Le premier chapitre : généralités sur l'épuration des eaux usées.
- ❖ Le deuxième chapitre : présentation de la STEP de la ville de Batna.
- ❖ Le troisième chapitre : présentation des modèles à base de réseaux de neurones artificiels.
- ❖ Le quatrième chapitre : Présentation de la base de données et description de l'approche de modélisation.
- ❖ Le cinquième chapitre : Résultats de la modélisation de la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours ( $DBO_5$ ).

*Chapitre I : Généralités sur l'Épuration des Eaux  
Usées*

---

## **I.1. Introduction**

Les eaux usées sont principalement des eaux qui ont perdu leurs puretés par la présence des polluants issus des différents usages : domestiques, industriels, agricoles ou autres. Cette contamination des eaux les a rendues impropres à l'utilisation par les êtres humains, les animaux et les plantes. Elles sont considérées comme polluées et doivent être donc traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs. (Selghin, 2001)

## **I.2. Définition d'une eau usée**

Définit les eaux usées comme étant des eaux ayant été utilisées pour des usages domestiques, industriels ou même agricole, constituant donc un effluent Pollué et qui sont rejetées dans un émissaire d'égout (Ramade, 2000). Ces eaux usées ne doivent pas être jetées dans les milieux naturels avant qu'elles ne soient traitées pour éliminer ces polluants indésirables.

## **I.3. Origine des eaux usées**

Les eaux résiduaires urbaines (ERU) sont constituées par:

- Des eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole
- Des eaux pluviales ou de ruissellement urbain. (Rodier et al, 2005)

### **I.3.1. Origine domestique**

Les eaux d'origine domestique sont issues de l'utilisation de l'eau (potable dans la majorité des cas) par les particuliers pour satisfaire tous les usages ménagers (Rejesk, 2002).

Les eaux usées domestiques constituées par :

- Eaux ménagers (lavage corporel et du linge, eaux de cuisine).
- Eaux de vanne chargées des fèces et d'urines.
- Eaux de lavage de voirie. (Ouali, 2001)

### **I.3.2. Origine pluvial**

Elle contient des matières minérales et organique dans les trois phases solide, liquides gazeuse et dans les trois états de dispersion : débris grossiers, suspension (émulsion, colloïdes, molécules dissoutes dissociées ou non les eaux usées véhiculent microorganisme pathogène saprophytes et Verus. (Ouali, 2001)

### I.3.3. Origine industriel

Les rejets des usines, mais aussi les rejets des d'activités artisanales ou commerciales : blanchisserie, restaurant, laboratoires d'analyses médicales...etc. (Baumont et al, 2005)

### I.4. Composition des eaux usées

La composition des eaux usées est extrêmement variable en fonction de leur origine (industrielle, domestique, etc.). Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. En fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et du danger sanitaire qu'elles représentent, ces substances peuvent être classées en quatre groupes : les micro-organismes, les matières en suspension et organiques, les éléments traces minéraux et organiques, et les substances nutritives. (Baumont et al, 2004)

**Tableaux I.1.** Concentrations de polluants dans les eaux usées urbaines (Grommaire-mertz, 1998).

Paramètres	Concentrations
MES	100 à 500 mg/L
DCO	250 à 100 mg/L
DBO5	100 à 400 mg/L
Cadmium	1 à 10 ig/L
Cuivre	83 à 100 ig/L
Plomb	5 à 78 ig/L
Zinc	100 à 570 ig/L

### I.5. Le réseau d'assainissement

Les réseaux de collecte ou « égouts » ont pour fonction de recueillir les eaux usées de toutes origines et de les acheminer vers les stations d'épuration. Il en existe trois types : les réseaux unitaires, réseaux séparatifs et les réseaux pseudo séparatif.

#### I.5.1. Les réseaux unitaires

Un réseau d'égout unitaire est un réseau qui canalise toutes les eaux usées du territoire qu'il dessert, que ces eaux soient d'origine domestique, pluviale, industrielle ou commerciale. (Brière, 2000). La qualité et le volume des eaux qui arrivent, alors, à la station d'épuration sont très variables. Pour éviter qu'un débit supérieur à sa capacité n'arrive à la station d'épuration, des ouvrages de déviation (réservoirs et déversoirs d'orage) sont répartis sur le réseau. (Baumont, 1998)

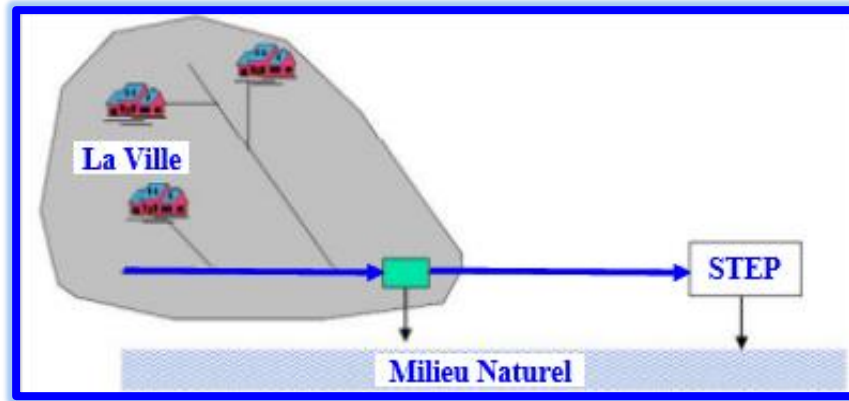


Figure I.1. Schéma d'un réseau unitaire

### I.5.2. Les réseaux séparatifs

Deux réseaux sont mis en place, l'un pour collecter les eaux usées, l'autre pour les eaux de ruissellement. En principe seules les eaux usées arrivent à la station d'épuration pour traitement, c'est-à-dire que les eaux de pluie ne sont pas traitées et rejetées directement. La station ne doit donc théoriquement recevoir qu'un effluent brut de qualité relativement régulière et de débit relativement bien déterminé. (Baumont, 1998)

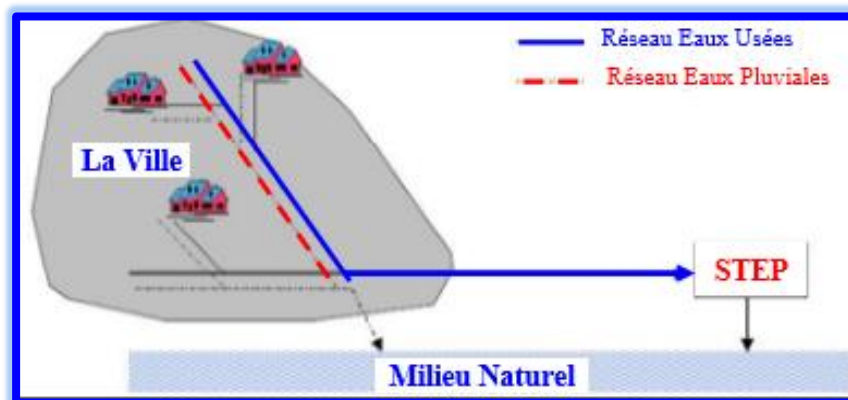


Figure I.2. Schéma d'un système séparatif

### I.5.3. Système pseudo-séparatif

Le système pseudo séparatif est un système dans lequel on divise les apports des eaux pluviales en deux parties : (i) l'une provenant uniquement des surfaces de voirie qui s'écoulent par des ouvrages particuliers, i.e., caniveaux aqueducs, fossés avec évacuation directe dans la nature, et (ii) l'autre provenant des toitures et cours intérieures qui sont raccordées au réseau d'assainissement à l'aide des mêmes branchements que ceux des eaux usées domestiques.

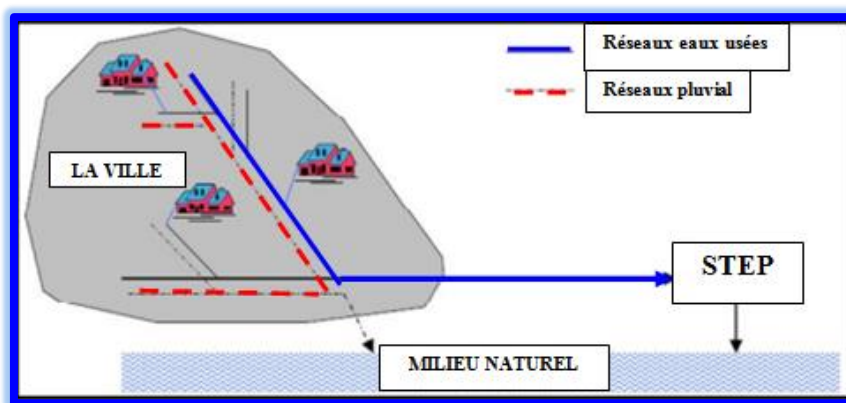


Figure I.3. Schéma d'un système pseudo-séparatif

## I.6. Caractéristiques des eaux usées

### I.6.1. Caractéristiques physique

Les propriétés physiques sont dans de nombreux cas relativement faciles à mesurer et certaines peuvent facilement observable par le profane.

#### I.6.1.1. Température

Fondamentalement important pour son effet sur d'autres propriétés, par ex. Accélération des réactions chimiques, diminution de la solubilité des gaz, amplification des goûts et des odeurs, etc. (Tebutt, 1998)

#### I.6.1.2. Goût et odeur

En raison des impuretés dissoutes, souvent de nature organique, par ex phénols et chlore-phénols. Ce sont des propriétés subjectives qui sont difficiles mesurer. (Tebutt, 1998)

#### I.6.1.3. Couleur

Même l'eau pure n'est pas incolore ; il a une teinte bleu-vert pâle en gros tomes. Il est nécessaire de différencier la vraie couleur due au matériau dans solution et couleur apparente due aux matières en suspension. Couleur jaune naturel dans l'eau des bassins versants des hautes terres est due aux acides organiques qui ne sont en aucun cas manière nocive, étant similaire à l'acide tannique du thé. Néanmoins, de nombreux es consommateurs s'opposent à une eau très colorée pour des raisons esthétiques et les eaux colorées peuvent être inacceptables pour certaines utilisations industrielles, par ex. Production de papiers d'art de haute qualité. (Tebutt, 1998)

#### **I.6.1.4. Turbidité**

La présence de solides colloïdaux donne au liquide un aspect troublé qui est esthétiquement inesthétique et peut être nocif. Turbidité dans l'eau peut être due à des particules d'argile et de limon, à des rejets d'eaux usées ou industrielles déchets ou à la présence d'un grand nombre de micro-organismes. (Tebutt, 1998)

#### **I.6.2. Caractéristiques chimique**

##### **I.6.2.1. Les matières en suspension (MES)**

Comprennent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. (Tessier, 2003)

##### **I.6.2.2. Conductivité électrique**

La conductivité d'une solution dépend de la quantité de sels dissous présents et pour les solutions diluées, il est d'environ proportionnel au contenu TDS, donné par conductivité (S/m). (Tebutt, 1998)

##### **I.6.2.3. Le pH**

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de « pH » permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Le pH de l'eau pure à 25 °C, qui est égal à 7, a été choisi comme valeur de référence d'un milieu neutre. (Ouanouki, 2014)

##### **I.6.2.4. La demande biologique en oxygène (DBO)**

Est un paramètre global qui exprime la quantité d'oxygène qu'une biomasse épuratrice va consommer pour décomposer les matières organiques contenues dans l'effluent. Elle est donc représentative de la somme des matières organiques biodégradables. Elle est généralement mesurée en 5 jours (DBO5). (Gaid, 1993)

##### **I.6.2.5. La demande chimique en oxygène (DCO)**

Est, elle, représentative de la quantité de matières organiques oxydables par voie chimique. Le rapport entre ces deux paramètres peut donner une idée de la biodégradabilité de l'effluent. Les mêmes textes cités ci-dessus rappellent que : « La DBO et la DCO sont deux moyens d'apprécier la teneur en matières organiques oxydables. La dégradation de celles-ci dans le milieu naturel s'accompagne d'une consommation d'oxygène et peut entraîner un abaissement excessif de la concentration d'oxygène dissous. ». (Gaid, 1993)

#### **I.6.2.6. L'azote**

Peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique. La présence d'azote organique ou ammoniacal se traduit par une consommation d'oxygène dans le milieu naturel et par une entrave à la vie des poissons. (Gaid, 1993)

#### **I.6.2.7. Le phosphore**

Peut également se trouver sous forme minérale (en provenance des lessives ou des rejets industriels) ou organique. Élément indispensable à la vie des algues, la présence de phosphore entraîne un risque d'eutrophisation du cours d'eau ou du lac, c'est-à-dire que celui-ci peut se voir envahi par un développement excessif de la population algale. (Gaid, 1993)

#### **I.6.2.8. L'Oxygène Dissous**

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu. La concentration en oxygène dissous est exprimée en mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>. (Rejsek, 2002)

### **I.6.3. Caractéristiques Biologiques**

Les eaux usées transportent de nombreux micro-organismes dont certains sont pathogènes : bactéries, virus, protozoaires, helminthes. Comme l'identification des organismes pathogènes dans l'eau est longue, le comptage des germes test est utilisé pour les contrôles de routine. Les germes test les plus fréquemment utilisés sont les coliformes fécaux (formés essentiellement d'*Escherichia coli*) et parfois aussi de streptocoques fécaux. (Behra, 2013)

## **I.7. La pollution**

### **I.7.1. Définition de la pollution**

La pollution est due à toute substance physique, chimique ou biologique rejetée dans une eau naturelle qui perturbe l'équilibre de cette eau, induit d'importantes nuisances (mauvaise odeur, fermentation, inconforts divers, risques sanitaires, etc.) et qui se répercute, à court ou à long terme, sur notre organisme à travers la chaîne alimentaire.

## I.7.2. Type de pollution

### I.7.2.1. Pollution physique

L'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement dans des centrales thermiques réchauffe les rivières dans lesquelles le rejet s'effectue. Cette élévation de température diminue la teneur en oxygène de l'eau et donc la capacité de vie des différentes espèces. La pollution thermique agit sur la température de l'eau, la pollution mécanique altère sa transparence par les matières en suspension. D'autres pollution physiques agissent sur l'acidité, la salinité, la radioactivité, etc. Ces pollutions physiques perturbent les écosystèmes et diminuent la biodiversité. (Bordet, 2007)

### I.7.2.2. Pollution chimique

La pollution minérale des eaux résulte de la libération dans ces dernières de divers métaux toxiques et des substances inorganiques telles les nitrates, les phosphates et autres sels minéraux nutritifs utilisés en agricultures comme fertilisants, enfin de divers résidus rejetés par la métallurgie et d'autres activités. (Ramade, 2005)

### I.7.2.3. Pollution biologique

Les eaux usées transportent de nombreux micro-organismes dont certains sont pathogènes : bactéries, virus, protozoaires, helminthes. Les bactéries pathogènes les plus fréquemment rencontrées sont les salmonelles dont la concentration en nombre est de l'ordre de  $10^3$  pour 100 ml d'effluent. (Behra, 2013)

**Tableau I.2.** Principaux types de pollution des eaux continentales (Lévêque, 1996).

Type de pollution	Nature	sources
<b>physique</b>		
Pollution thermique	Rejets d'eau chaude	Centrales thermiques
Pollution radioactive	Radio-isotopes	Installations nucléaires
<b>Chimique</b>		
Fertilisants	Nitrates, phosphates	Agriculture, lessives
Métaux et metalloïdes	Mercuré, cadmium, plomb, aluminium, arsenic ...	Industrie, agriculture, pluies, acides, combustion
Pesticides	Insecticides, herbicides, fongicides	Agriculture, industries
Organochlorés	FCB, solvants	industries
Détersifs	Agents tensio-actifs	Effluents domestique
Hydrocarbures	Pétrole et dérivés	Industrie pétrolière, transports
<b>Microbiologique</b>		
	Bactéries, virus, champignons	Effluents urbains et d'élevage

## I.8. Procédés d'épuration des eaux usées

Quand les eaux usées, urbaines ou industrielles, ne sont pas épurées avant leur rejet dans le milieu naturel, l'altération de ce dernier et les déséquilibres qui s'y produisent ont non seulement des effets immédiats sur les utilisations de l'eau, mais aussi des conséquences à plus long terme et parfois irréversibles sur l'environnement. Les caractéristiques des stations d'épuration doivent être telles que l'effluent rejeté n'altère pas l'état du milieu récepteur dans une mesure incompatible avec les exigences d'hygiène et de salubrité publique (Figure I.4).

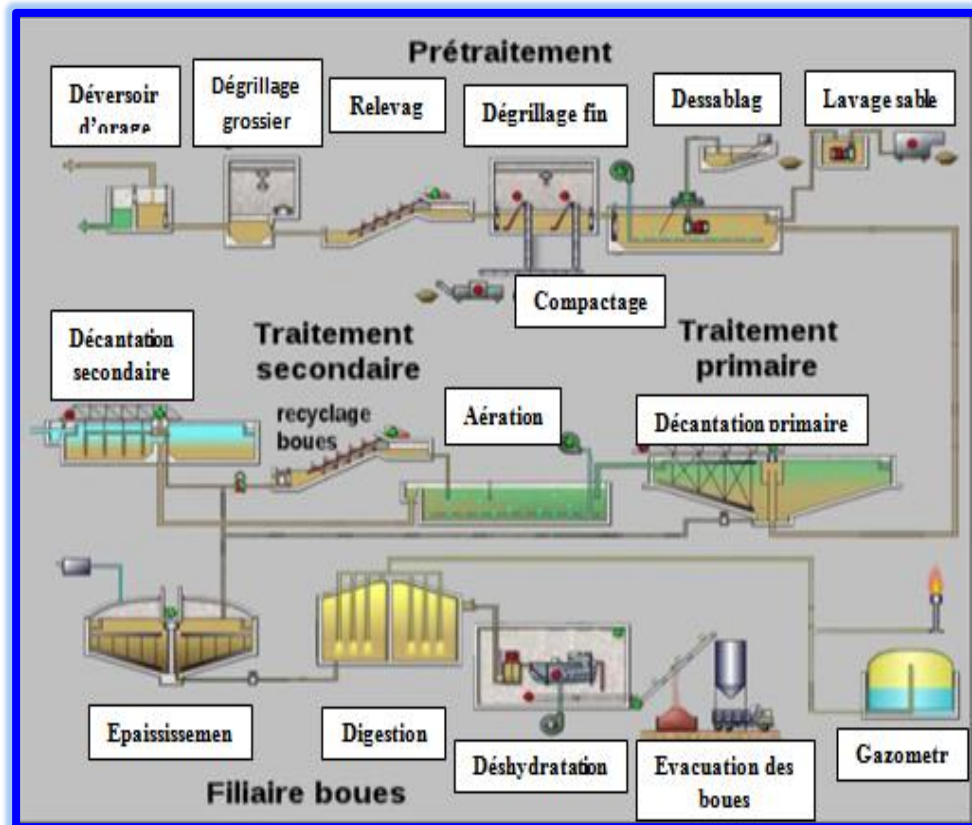


Figure I.4. Les différents procédés d'épuration des eaux usées.

### I.8.1. Procédés d'épuration Physico-Chimique

#### I.8.1.1. Prétraitement

Avant leur traitement, les eaux brutes doivent subir un prétraitement qui a pour objectif d'extraire la plus grande quantité possible de matière pouvant gêner le traitement ultérieur. De nature physique, le prétraitement regroupe les opérations suivantes (Ouali, 2001) :

- **Dégrillage** : Il permet d'éliminer les déchets volumineux tels que les flacons, les pierres, les plastiques, les tissus, ...etc. Le principe consiste à faire passer les eaux usées à travers

des grilles métalliques afin d'en retirer les déchets volumineux (Alexandre et al., 1998)  
Les déchets retirés sont déposés en décharge.

- Dessablage : Le dessablage concerne les particules minérales de granulométrie supérieure à 100µm, dont la vitesse de chute est inférieure à 0,3 m/s. L'élimination des sables présents dans les eaux usées est une opération indispensable pour (Satin et al., 1999) : (i) Éviter les dépôts dans les canalisations induisant leur bouchage ; (ii) Protéger les pompes et autres organes mécaniques contre l'abrasion ; (iii) Éviter de perturber les autres stades de traitement ; et (iv) Réduire la production des boues.
- Dégraissage, déshuilage : c'est une opération destinée à éliminer les graisses et les huiles présentes dans les eaux résiduaires (stations-service, abattoirs, industries alimentaires etc.



Figure I.5. Le prétraitement

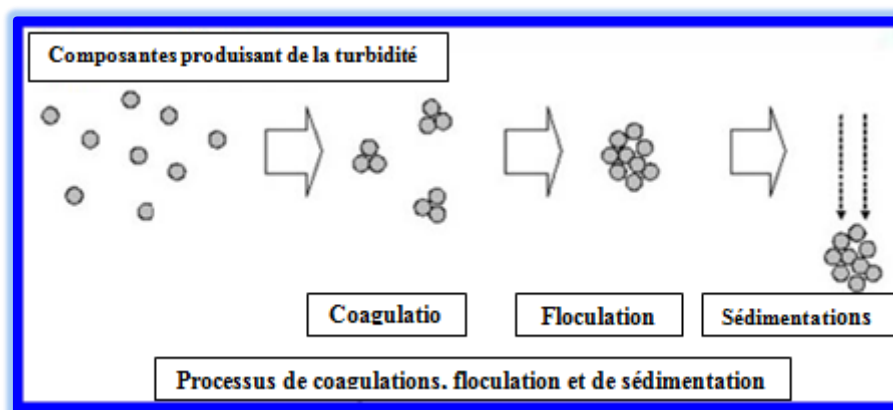
### I.8.1.2. Traitement primaire

Le Traitement primaire des eaux usées regroupe les opérations nécessaires pour éliminer :

- Les matières décanables, c'est le rôle de la décantation.
- La turbidité (substances colloïdales) qui est traitée par coagulation-floculation appelée encore clarification.

La décantation qui est l'élimination des matières en suspension présentes dans le milieu liquide est réalisée par sédimentation, en utilisant uniquement les forces de gravité. La décantation, processus essentiel du traitement primaire, a pour but : (i) De retenir une fraction importante de la pollution organique ; (ii) D'alléger la charge du traitement biologique ultérieure ; (iii) De réduire les risques de colmatage des systèmes de traitement biologiques par culture fixée (lits bactériens, disques biologiques, etc.) ; et (iv) D'éliminer 30 à 35% de la DBO5 et 60% à 90% des matières décantables (pour une eau usée domestique) (Ladjel, 2006).

La Coagulation-Floculation est utilisée pour éliminer la turbidité et la couleur d'une eau, qui sont principalement causées par des particules très petites, i.e., colloïdales. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation : la coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension. La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts, entre les particules déstabilisées. (Ladjel,2006)



**Figure I.6.** Coagulation et Floculation

## I.8.2. Procédés d'épuration biologiques (secondaire)

Le traitement secondaire est un traitement purement biologique des eaux usées et a pour objet de réduire la teneur en matière organique présentes dans ces eaux et leur dégradation biologique par les micro-organismes.

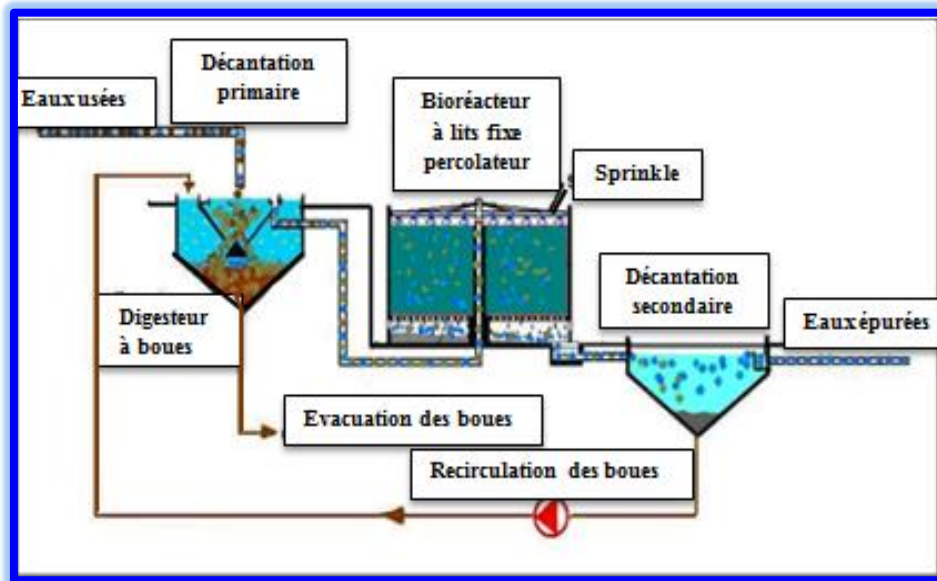
### I.8.2.1. Les traitements aérobies

Les bactéries utilisées exigent un apport permanent d'oxygène. Les bactéries utilisées exigent un apport permanent d'oxygène. Deux grandes familles peuvent être distinguées : les procédés à cultures fixes (microorganismes fixés sur des supports), les procédés à culture libre (micro-organismes maintenus en suspension dans le mélange à épurer). Nous pouvons citer les plus courantes selon (Degremont 2005) :

- Les procédés aérobies à culture fixée : le lit bactérien ou les disques biologiques.
- Les procédés aérobies à culture libre : le lagunage et Les boues activées.

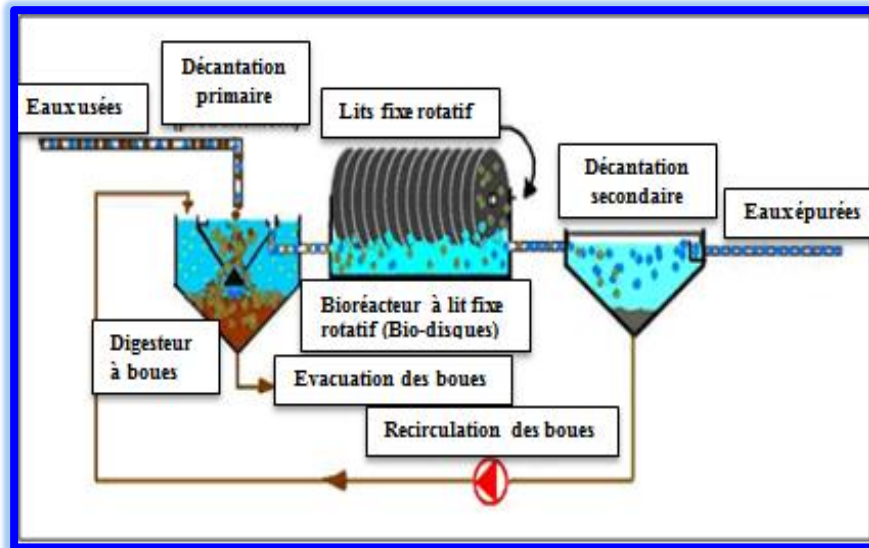
Les lits bactériens, L'autre méthode courante de traitement secondaire repose sur l'utilisation des filtres (lits) biologiques, et consiste à vaporiser les eaux usées sur un lit de roche ou de plastique moulé. Les éléments constitutifs du lit doivent être assez volumineux pour laisser l'air pénétrer jusqu'au fond, mais assez petits pour une maximaliser la superficie

où a lieu l'activité bactérienne. Un film biologique constitué de microbes aérobies se développe à la surface des roches ou du plastique. Grâce à la circulation de l'air dans le lit, les micro-organismes du film transforment par oxydation une grande partie de la matière organique des eaux usées en dioxyde de carbone et en eau. Les filtres (lits) biologiques éliminent de 80 à 85% de la DBO, de sorte qu'ils sont généralement moins efficaces que le système d'activation des boues. (Gerard et al., 2003)



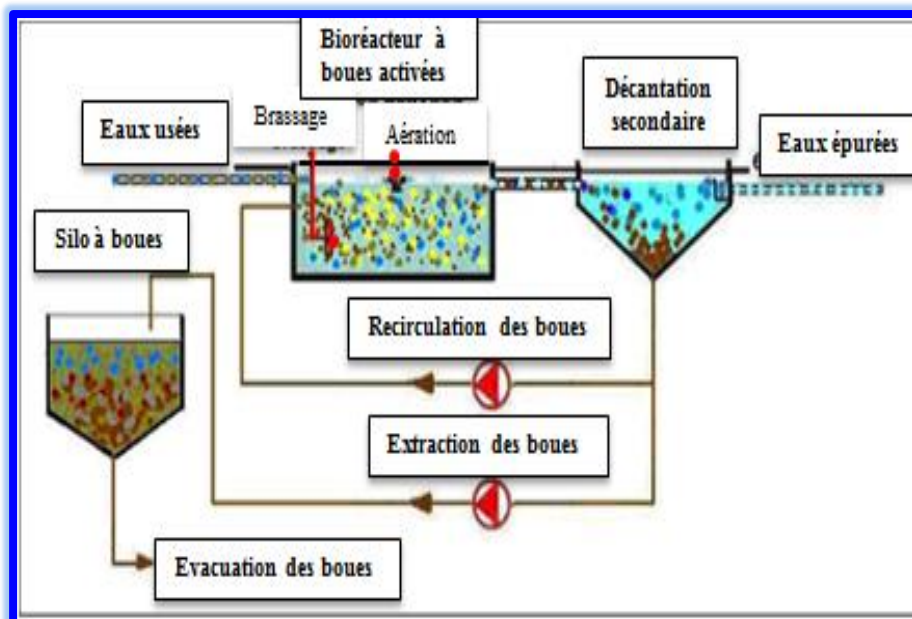
**Figure I.7.** Mode de fonctionnement de lit bactérien

Les disques biologiques qui constituent un autre système reposant sur l'utilisation de films biologiques et utilisé pour le traitement secondaire des eaux usées. Un ensemble des disques d'environ un mètre de diamètre est monté sur un axe. Les disques tournent lentement et leur partie inférieure, soit 400% de la superficie, baigne dans les eaux usées, la rotation de l'eau produit une aération et met le film biologique en contact avec les eaux usées. Elle favorise aussi le détachement du film biologique accumulé lorsqu'il en vient à former une couche trop épaisse. Cette accumulation est analogue à celle du floculat dans un système d'activation des boues. (Gerard et al., 2003)



**Figure I.8.** Fonctionnement de disque biologique

Le traitement par boues activées est un système fonctionnant en continu dans lequel, des micro-organismes sont mis en contact avec les eaux usées contenant des matières organiques. De l'oxygène est injecté dans le mélange, permettant de fournir aux bactéries cet élément vital à leurs besoins respiratoires. En fait, on peut considérer que le système à boues activées est une extension artificielle des phénomènes d'épuration naturels. Dans un cours d'eau ou une rivière, les phénomènes entrant en jeu sont identiques à ceux présents dans les systèmes à boues activées, seule varie la concentration en micro-organismes dans le milieu et à fortiori, la vitesse de la réaction de dégradation. (Gaid, 1984)



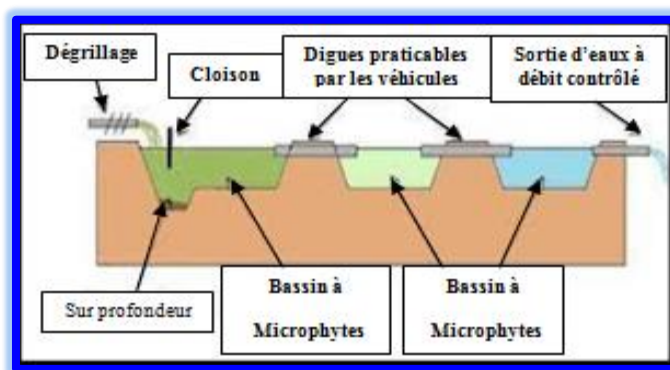
**Figure I.9.** Traitement par boue activée

**Tableau I.3.** Avantages et inconvénients des traitements biologiques (El Haite, 2010).

Méthodes Biologiques	Avantage	Inconvénients
<b>Boues Activées</b>	Emprise au sol réduite, Grande performance d'élimination de la DBO de la DCO et de MES.	Coût d'investissement élevé, Sensibilité aux variations hydraulique et organique, Nécessité d'un entretien, fréquent des ouvrages (main d'œuvre qualifiée), Coût d'exploitation (énergétique) élevé, Faibles performances en matière d'élimination des agents pathogènes.
<b>Lits Bactériens</b>	Occupation au sol relativement faible, Bonnes performances en terme de réduction de la DBO, de la DCO et de MES, Faible consommation en énergie.	Ne supporte pas les variations de débit et de concentration des effluents, Nécessite un entretien: fréquent des ouvrages, Nuisances par le développement des insectes.
<b>Disques Biologiques</b>	Très bonne réactivité en cas de surcharges par rapport aux boues activées, Moins d'équipement électromécanique, un seul moteur par fil, Consommation électrique faible.	Limitation de la capacité de la STEP à 100000 EH, Possibilité de la pollution olfactive.

Le lagunage est un système biologique d'épuration qui repose sur la présence équilibrée de bactéries aérobies en cultures libres et d'algues. L'oxygène nécessaire à la respiration bactérienne est produit uniquement grâce aux mécanismes photosynthétiques des végétaux en présence de rayonnements lumineux. (Josep, 2002)

- ✓ Le lagunage naturel utilise comme seule source d'énergie le vent et le soleil. L'apport d'oxygène est assuré par les échanges avec l'atmosphère au niveau du plan d'eau et par les végétaux à chlorophylle.



**Figure I.10.** Lagunage naturel (Rejasse, 2009).

- ✓ Le lagunage aéré consiste à intensifier l'activité aérobie par un brassage et une aération artificielle par des aérateurs mécaniques flottants ou fixes ou une insufflation d'air. (Grosclaude, 1999)

### I.8.2.2. Traitements Anaérobies

Les traitements anaérobies font appel à des bactéries n'utilisant pas de l'oxygène, est un processus microbiologique de conversion de la matière organique, faisant intervenir

essentiellement des populations bactériennes, ainsi que des protozoaires et quelques champignons anaérobies. Le traitement anoxique est typiquement employé pour traiter des eaux usées contenant de grandes quantités de matières organiques insolubles, telles que les fibres, la cellulose résultant des industries laitière et agroalimentaire. Le processus de dégradation anoxique proprement dit se déroule dans de grands réservoirs clos appelés digesteurs ou bioréacteurs. Le principe de la digestion anaérobie est décrit comme la conversion de la matière organique en biomasse et en biogaz, composé essentiellement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). La digestion anaérobie d'un produit organique complexe comporte quatre étapes différentes, à savoir : l'hydrolyse, l'acidogène, l'acétogénèse et la méthanogènes. (Atab, 2001)

### **I.8.3. Le traitement tertiaire**

Dans certains cas des traitements tertiaires sont nécessaires, notamment lorsque l'eau épurée doit être rejetée en milieu particulièrement sensible. A titre d'illustration les rejets dans les eaux de baignade, dans des lacs souffrant d'un phénomène d'eutrophisation, sont concernés par ce troisième niveau de traitement. Ils peuvent comprendre des traitements de désinfection, une réduction des odeurs etc... Le choix de traitement supplémentaire dépend évidemment du polluant à éliminer et de l'épuration souhaitée. (Satin et al., 1999)

### **I.8.4. Traitement des boues**

#### **I.8.4.1. Origine, nature et composition des boues**

Dans une installation de traitement des eaux résiduaires, la production des boues a lieu à divers points de la chaîne de traitement :

- Lors de la traversée du décanteur primaire, les matières sédimentées de l'effluent, constituent les boues primaires.
- Lors de la transformation de la pollution organique au cours d'une épuration de type boues activées ou lit bactérien, constituent les boues secondaires.
- Par toutes réactions physico-chimiques de coagulation-floculation avec les matières en suspension de l'effluent.
- Les boues primaires, secondaires, ou physico-chimiques constituent ce que l'on appelle les boues fraîches. (Bechac, 1984)

### **I.8.4.2. Différentes étapes de traitement des boues**

Les techniques actuelles d'épurations des eaux usées domestiques ou industrielles, ainsi que les seuils de rejet de plus en plus exigeants et les quantités à traiter de plus en plus grandes, entraînent au cours de différentes phases de traitement une importante production de boues, constituées en générale de 95% à 98% d'eau. Les traitements imposés aux boues s'effectuent classiquement en différentes étapes : épaissement, digestion anaérobie, déshydratation, séchage.

### **I.8.4.3. Stabilité ou digestion des boues**

La stabilisation des boues réside essentiellement dans l'élimination ou la réduction du pouvoir fermentescible des boues organiques, notamment des matières à évolution bactérienne rapide afin d'éviter l'émission d'odeurs désagréables. (Koller, 2009)

### **I.8.4.4. Traitement de l'épaississement et de concentration des boues**

L'épaississement est la première étape pour réduire le volume des boues tout en augmentant la concentration pour permettre la déshydratation. Le concentrateur statique présente deux phases de fonctionnement : La clarification permet d'obtenir un surnageant pauvre en matière en suspension, l'épaississeur est alors considéré comme un décanteur, puis sous l'action de la pesanteur, la teneur des boues en matière en suspension progresse. (Koller,2009)

### **I.8.4.5. Déshydratation**

Les procédés de déshydratation ont pour objectif de faire passer la boue de l'état liquide à une consistance plus ou moins solide, qui devra évidemment répondre aux exigences de la destination finale choisie. (Rodier, 2009)

### **I.8.4.6. Le séchage**

Conduit à une réduction de volume jusqu'à plus de 60 %, voire 90% de siccité nécessaire. Il peut être aussi utilisé en couplage avec un four afin de dépasser la siccité requise (supérieure à 30 %) pour rendre la boue toujours auto combustible.

## **I.9. La réutilisation des eaux usées épurées**

La réutilisation des eaux usées épurées propose de récupérer directement cette eau, de la traiter à nouveau et de l'utiliser à tous types de fins comme. (Baumont, 1999)

### **I.9.1. Usage agricole**

Le principal avantage de la réutilisation des eaux usées en culture est plus souvent la disponibilité de l'eau disponible pour les plantations que la purification par le sol ou la disponibilité de nutriments. Des mesures doivent être prises pour éviter les dépôts et la corrosion au sein du réseau de distribution et un traitement préalable de décantation des effluents bruts est dans l'ensemble des cas à l'irrigation. (Monod, 1989)

### **I.9.2. Usage industriel**

Les eaux usées après traitement sont souvent une source d'eau vraiment adaptée aux besoins industriels, en particulier pour le refroidissement et le lavage. Très souvent, une élimination radicale de la pollution organique est importante et donc le traitement biologique est alors suivi d'un traitement de finition L'eau, après un traitement tertiaire vraiment complet, comprenant entre autres une étape de déminéralisation, a souvent l'habitude d'alimenter des chaudières basses. (Monod, 1989)

### **I.9.3. Usage domestique et municipal**

La réutilisation des eaux usées traitées chez l'habitant ou au niveau de la ville est réalisable à différents niveaux de qualité et en cohérence avec plusieurs schémas (Monod, 1989)

- Recyclage partiel à l'intérieur d'immeubles.
- L'alimentation des réseaux municipaux de lavage et des réseaux d'incendies.
- Réalimentation partielle des nappes d'eaux souterraines, (lits filtrants...).
- Constitution des barrières hydrauliques souterraines empêchant l'introduction d'eau de mer dans les aquifères côtiers.
- Réinjection dans le circuit d'eau potable.

## **I.10. Conclusion**

En conclusion, l'épuration des eaux usées est un processus essentiel pour protéger l'environnement et la santé publique. Les eaux usées contiennent des polluants tels que des bactéries, des virus, des matières organiques, des métaux lourds et des produits chimiques qui peuvent causer des dommages environnementaux graves et nuire à la santé humaine.

***Chapitre II : Présentation de la station d'épuration  
(STEP) de la ville de Batna***

---

## **II.1. Introduction**

En général, les stations d'épuration sont des installations essentielles pour épurer les eaux usées et protéger la santé publique et l'environnement. Leur fonctionnement consiste à éliminer les polluants présents dans les eaux usées, tels que les matières organiques, les nutriments et les produits chimiques, avant de les déverser dans les cours d'eau ou de les réutiliser à des fins non-potables.

## **II.2. Historique et Localisation de la STEP de BATNA**

Dans le cadre de la protection de l'environnement et de l'élimination des risques de pollution des nappes du champ captant de la ville de Batna (283.000 habitants), et des centres environnants d'une part (Tazoult 19.000 habitants), et la mise à la disposition de nouvelles ressources au profit de l'agriculture d'autre part, il a été envisagé dès 1975, la réalisation d'une station d'épuration des eaux usées (ONA,2011) . Deux marchés ont été passés avec la Société Française Degremont qui ont porté sur la fourniture des équipements et la prestation de service. Un troisième marché passé avec la société Nationale Sotraba concerne la réalisation des ouvrages de génie civil. Les travaux de réalisation n'ont pu être effectivement lancés qu'en 1983. À cette date, Degremont a fourni les équipements ainsi que les plans d'exécution. Ces deniers ont permis à SOTRABA de réaliser la partie génie civil concernant la ligne de traitement des eaux. L'avant-projet initial s'était avéré insuffisante. Il a été procédé en 1987 l'achèvement du génie civil concernant la ligne de traitement des boues. Le projet a rencontré des difficultés pour la réalisation, il a été repris en Août 2000 en vue de la réhabilitation, l'achèvement des travaux et la gestion de la station d'épuration de ville de Batna. Les travaux de réalisation et de gestion ont été démarrés en 2002, avec l'entreprise VATECH WABAG (société autrichienne) et la station a été réceptionnée et mise en service en septembre 2005. En Octobre 2005, la station a été réceptionnée pour début d'exploitation. Elle a été gérée jusqu'à septembre 2011 par cette société. Depuis octobre 2011, la station, est gérée par l'ONA (office national de l'assainissement) (ONA, 2011).

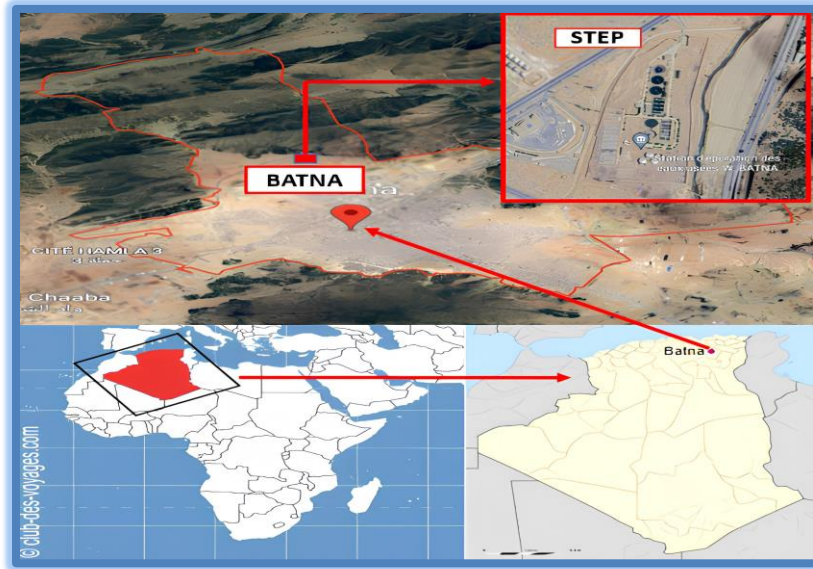


Figure II.1. Localisation de station Batna

### II.3. Situation géographique et données de basse de la Station

La station d'étude est située au nord de la ville de Batna au bord de l'oued El Gourzi. Elle est limitée au sud et l'est par la route nationale RN03, au nord par un large terrain qui s'ouvre sur un vaste relief et à l'ouest par la gare routière du nord (Figure II.2).

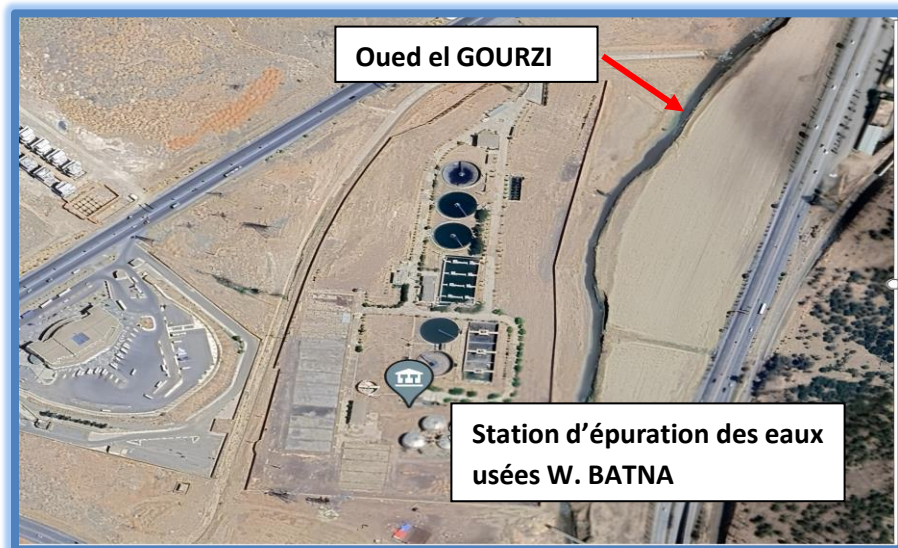


Figure II.2. Station d'épuration de Batna (Google Earth ,2022)

La station a été conçue selon les données suivantes : Les charges hydrauliques d'origine urbaine ont été déterminées en se basant sur une dotation unitaire de (100 L/hab. j), et les charges

polluantes d'origine urbaine ont été déterminées en se basant sur unedotation unitaire de 45g DBO<sub>5</sub>/hab. j.

**Tableau II.1.** Débits des effluents de la STEP de Batna (ONA, 2011).

Paramètre	Unité	Valeur de paramètre		
		Urbaine	Industriel	Total
Équivalent habitant	EH	140000	60000	200 00
Débit moyen journalier	m <sup>3</sup> /j	11200	8675	19875
Débit de pointe journalier (temps sec)	m <sup>3</sup> /j	16800	10410	27210
Débit moyen horaire (temps sec)	m <sup>3</sup> /h	-	-	828
Débit moyen horaire (temps de pluie)	m <sup>3</sup> /h	-	-	1134
Débit de pointe horaire (temps sec)	m <sup>3</sup> /h	1050	600	1650
Débit de pointe horaire (temps de pluie)	m <sup>3</sup> /h	1575	600	2175

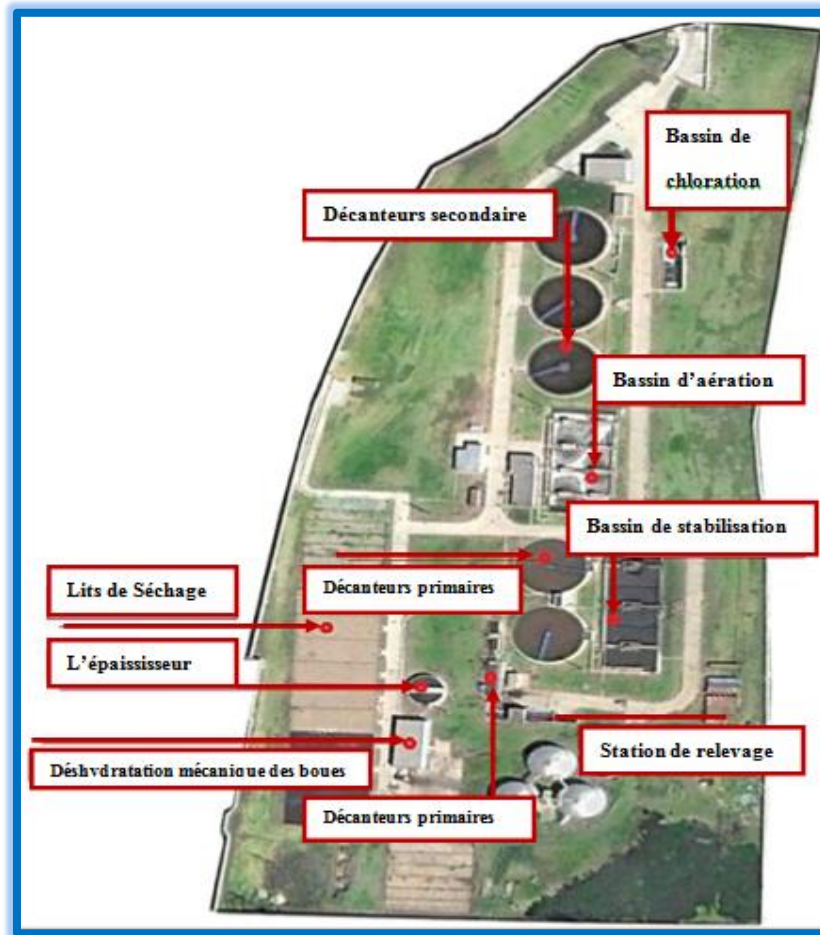
**Tableau II.2.** Caractéristiques des effluents de la STEP de Batna (ONA, 2011).

Désignation	Valeur du paramètre Kg/j	Mg/l
Charge massique de DBO <sub>5</sub> à l'entrée de la STEP	9725	489
Charge massique de DCO à l'entrée de la STEP	19450	978
Charge massique de MES à l'entrée de la STEP	13995	704
Charge massique de Norg à l'entrée de la STEP	600	30
Charge massique de NTK à l'entrée de la STEP	2200	110
Charge massique de PT à l'entrée de la STEP	320	16

Ces valeurs sont garanties dans la mesure où les charges hydrauliques et polluantes de l'effluent brut sont conformes aux données de base ci-dessus décrites. Par ailleurs, l'unité de traitement à réhabiliter (STEP de Batna) fonctionnera à moyenne charge et ne permettra pas l'abattement significatif de l'azote et du phosphore.

## II.4. Description du procédé de fonctionnement de la STEP de Batna

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Batna est prévue pour traiter un débit journalier moyen de 19 875 m<sup>3</sup>/j (ONA, 2011). La chaîne de traitement est composée de deux lignes : une ligne d'eau et une ligne de boues. Le débit est divisé sur certains ouvrages afin d'améliorer la fiabilité, les opérations de maintenance et la souplesse de fonctionnement de la station.



**Figure II.3.** Schéma général de la station d'épuration de la ville de Batna

La filière de traitement comprend ainsi en totalité et successivement :

### II.4.1. Ligne d'eau

#### II.4.1.1 Zone 01 : Prétraitement

L'ouvrage de Dessablage Déshuilage se compose d'un canal rectangulaire de 4 m de large et 15 m de long, avec une hauteur d'eau moyenne de 2.5 m représentant donc un volume total de 150 m<sup>3</sup> (ONA, 2011). Le dessablage-déshuilage est assuré par un pont transversal de reprise du sable, ce pont constitué principalement d'une passerelle en profilés supportée par deux ensembles de

roulements reliés à un groupe motoréducteur d'entraînement. La mesure du débit à l'entrée de la STEP se fait au niveau du canal de liaison dessableur-déshuileur et ouvrage de By-pass. L'échantillonneur analyse l'eau brute et délivre les signaux de mesure suivants :

- Matières en suspension (MES).
- Conductivité.
- PH et Température.



**Figure II.04.** Photo Pré-dégrillage grossier



**Figure II.05.** Photo vis d'Archimède



**Figure II.06.** Photo du dégrilleur mécanique



**Figure II.07.** Photo du dessableur-déshuileur



**Figure II.08.** Échantillonnage primaire (eau brute)

#### **II.4.1.2. Zone 02 : Décantation Primaire**

Les effluents ainsi prétraités seraient ensuite dirigés sur un ouvrage de répartition puis sur deux décanteurs primaires cylindro-coniques de caractéristiques suivantes (ONA, 2011) :

- Diamètre = 28m.
- Hauteur cylindrique = 3m.
- Volume = 2035m<sup>3</sup>

Les décanteurs, équipés de deux ponts racleurs radiaux, actionnés par deux motoréducteurs d'entraînement, sont de type à raclage mécanique des boues et de flottants.



**Figure II.09.** Photo des décanteurs primaires

#### **II.4.1.3 Zone 03 : Traitement Biologique**

Afin d'assurer microbien et le besoin énergétique pour la biodégradation des matières organiques, un apport d'oxygène est donc indispensable pour le traitement biologique, une teneur d'oxygène dissout de l'ordre de 0.5 à 2.5 mg/l devrait être maintenue dans le système d'aération. Pour ce fait, l'effluent en provenance des décanteurs primaires est introduit en tête du bassin d'aération de forme rectangulaire dimensionné sur les dimensions suivantes (ONA, 2011):

- Longueur au plan d'eau = 50.90 m.
- Largeur au plan d'eau = 25.90 m.
- Hauteur d'eau = 3.20 m.
- Volume total = 4218 m<sup>3</sup>.



**Figure II.10.** Photo du bassin d'aération.

#### **II.4.1.4. Zone 04: Décantation secondaire et désinfection**

La liqueur mixte de boues activées est ensuite dirigée sur les ouvrages de décantation secondaire, après passage dans un ouvrage de répartition. Chaque ouvrage, de forme cylindro-conique, a les dimensions suivantes (ONA, 2011):

- Diamètre = 29 m.
- Hauteur cylindrique = 2.60 m.
- Volume = 2025 m<sup>3</sup>.

Chaque décanteur, équipé d'un pont roulant radial, actionné par un motoréducteur d'entraînement, est de type à raclage de fond et siphonage des boues, le siphonage est réalisé au moyen d'une pompe à vide déplaçable. A la sortie des décanteurs secondaires, le débit traité sera mesuré sur un venturi en canal ouvert avant rejet dans l'Oued Gourzi. L'échantillonneur analyse l'eau épurée échantillonnée proportionnellement à la mesure du débit, et délivre les signaux de mesure suivants :

- Matières en suspension (MES).
- Conductivité.
- PH et Température.

Les eaux épurées provenant des décanteurs secondaires aboutissent au bassin de chloration pour être désinfectées. Enfin une station de dosage d'hypochlorite de sodium équipée de :

- Propre coffret de puissance et commande.
- Trois cuves de stockage de capacité de 5000 litres chacune.

- Indicateur de niveaux min, max et marche à sec.
- Deux pompes doseuses
- Une pompe de transfert.



**Figure II.11.** Décanteurs secondaires (Clarificateurs)



**Figure II.12.** Canal de comptage et de mesure (eau épurée)



**Figure II.13.** Photo de la station de dosage d'hypochlorite de sodium

## II.4.2 Ligne de boues

### II.4.2.1 Zone 05 : Stabilisation des boues

Après oxyder toute la matière organique polluante biodégradable, les micro-organismes, présentés dans les boues activées en excès et mixtes, nécessitent un apport supplémentaire d'oxygène afin d'achever le processus biologique avec le deuxième stade correspondant à la biosynthèse et à la respiration endogène. Pour ce fait, la boue mixte est introduite en tête du bassin de stabilisation de forme rectangulaire subdivisé en trois bassins en série ayant les dimensions suivantes (ONA, 2011) :

- Longueur au plan d'eau = 21.50 m.
- Largeur au plan d'eau Hauteur d'eau = 21.50 m ; Hauteur d'eau = 3.8 m.
- Volume d'un seul bassin = 1757 m<sup>3</sup>. Volume total = 5270 m<sup>3</sup>.



**Figure II.14.** Photo du bassin de stabilisation

### II.4.2.2 Zone 06 : Déshydratation des boues

Les boues ainsi stabilisées seront injectées en tête de l'épaississeur, afin d'améliorer la concentration de ces boues en termes de matières solides. En effet, la concentration de la boue stabilisée avant l'épaississement est de l'ordre 28 g/l, quant à l'après épaississement, elle peut atteindre 35g/l, les eaux surnageantes seront récupérées en tête de la station.



**Figure II.15.** Photo de l'épaississeur



**Figure II.16.** Photo du filtre à bandes



**Figure II.17.** Photo des lits de séchage des boues

## **II.5. Matériels et méthodes**

### **II.5.1. Échantillonnage**

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier ses caractéristiques physicochimiques et microbiologiques. Il est donc nécessaire de mettre en place une organisation structurée, de développer une méthodologie adaptée à chaque cas, de procéder à un choix judicieux des points de prélèvement et d'utiliser le matériel convenable. Donc il est bien évident qu'un prélèvement correct est indispensable à l'obtention des résultats analytiques significatifs.

### **II.5.2. Matériels de prélèvement**

- Une perche pour les prélèvements en profondeur ;
- Recipient en plastique.

## **II.6. Analyses effectuées**

### **II.6.1. Mesure de la température**

La température a un impact important sur l'activité des bactéries car chaque gamme de bactéries est adaptée à une plage de température. Cependant, de manière pratique, il est difficile de contrôler la température à l'intérieur d'un réacteur biologique. Une température élevée dans le bassin d'aération supérieure à 35°C augmente sensiblement le taux de multiplication des microorganismes. Il s'en suit une mauvaise floculation de la boue.

### **II.6.2. Mesure du pH**

Le pH étant un paramètre influençant à la fois le niveau d'activité, la croissance des bactéries et la solubilité des composés. Il est important de le contrôler dans le bassin d'aération, d'autant plus que les bactéries sont sensibles à sa variation. Le pH a été déterminé à l'aide d'un pH mètre, basé sur la méthode électrométrique à l'électrode de référence. L'appareil utilisé est un pH-mètre permettant des mesures du pH/potentiel Rédox avec électrode combinée de pH et électrode combinée Rédox recommandées pour les eaux usées avec les solutions tampon pH/ Rédox, avec une sonde (accessoire) pour mesurer la température.



**Figure II.18.** Photo du pH mètre HACH utilisé

### **II.6.3. Matières en suspension (MES)**

Les MES s'obtiennent soit par filtration des effluents peu chargés soit par centrifugation des solutions avec séchage jusqu'à obtenir un résidu sec, soit par filtration sur filtre en fibre de verre (Figure 3-3).

- La norme EN-NF 872 (Méthode par filtration sur filtre en fibre de verre)
- La méthode par centrifugation. Cette méthode s'applique si la qualité de l'échantillon provoque le colmatage du papier filtre ou lorsqu'il est très chargé en suspension. Si la durée de la filtration dépasse 30mm. L'utilisation de la méthode par centrifugation est recommandée.

#### **Méthode par filtration sur filtre en fibre de verre**

- Pompe à vide à membrane pour la mesure de MES selon NF EN 872 de volume 13 litres/mn avec une pression du vide à l'intérieur  $< 1 \text{ mb}$  « de l'ordre (0.065 mb).
- Entonnoir de 300 ml avec support de filtre et pince de fixation ; deux Fioles 1000ml.
- Disque filtrant en fibre de verre ou autre papiers filtres MES à  $0,45 \mu\text{m}$  (parmi ceux qui conviennent Sartorius, Wattmann, millipore).
- Étuve  $105^\circ\text{C}$ .
- Balance de précision de laboratoire  $\pm 0.1 \text{ mg/l}$ .
- Un dessiccateur.

### Méthode par centrifugation

- Centrifugeuse avec une accélération de 28000 à 32000 m.s<sup>2</sup>.
- Étuve 105°C.
- Balance de précision de laboratoire  $\pm 0.1$  mg/l.
- Un dessiccateur.
- Éprouvette de 100 ml, assiettes.

### II.6.4. Mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO5)

La DBO<sub>5</sub> est obtenue après cinq jours d'incubation à 20°C et à l'obscurité afin d'éviter la photosynthèse.

- DBO mètre.
- Incubateur à 20°C  $\pm 1$  °C (Étuve pour DBO à 20°C).
- Flacons d'incubation (Flacon à DBO5 bran de 250 ml à col rodé).
- NaOH.
- L'échantillon peu ou non dilué est renfermé dans un flacon avec un certain volume d'air qui assure la ré oxygénation. La consommation d'oxygène est suivie en continu grâce à un manomètre par chute de pression. L'appareil est équipé d'un agitateur pour assurer l'oxygénation de l'échantillon en permanence et d'un dispositif pour éliminer le gaz carbonique par fixation sur alcali (KOH, NaOH).



Figure II.19. Photo du DBO mètre HACH

### II.6.5. Mesure de la demande chimique en oxygène (DCO)

Ce paramètre a été analysé au moyen d'un spectrophotomètre après oxydation de l'échantillon, en utilisant le matériel suivant :

- Spectrophotomètre.
- Plaque chauffante.
- Bêchers, pipettes (5 ml, 2 ml) + poire.
- Tubes de spectrophotometer.
- Solution oxydation ( $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4 + Hg_2SO_4$ ).
- Acide ( $Ag_2SO_4 + H_2SO_4$ ).

La demande chimique en oxygène est déterminée après une oxydation en milieu acide par un excès de dichromates de Potassium à la température  $148^\circ C$  des matières oxydables dans les conditions de l'essai en présence de sulfate d'argent ( $Ag_2SO_4$ ) et sulfate de mercure ( $Hg_2SO_4$ ).



Figure II.20. Photo du bloc chauffant



Figure II.21. Photo du spectrophotomètre

## **II.7. Conclusion**

La station d'épuration est une installation vitale pour la gestion des eaux usées et la protection de l'environnement, mais elle doit être gérée de manière responsable et respectueuse de l'environnement et de la communauté locale pour assurer son efficacité à long terme.

***Chapitre III : Présentation des Modèles à base des  
Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)***

---

### III.1. Introduction

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des modèles mathématiques non linéaires de type « boîte noire », ils constituent une nouvelle approche de traitement de l'information. Ils offrent des solutions compactes et rapides pour une large gamme de problèmes, en particulier ceux ayant des contraintes en temps réel, tel le cas de la plupart des applications spatiales actuelles. Ceci est davantage vrai avec l'utilisation des simulations et des implantations matérielles. Ils peuvent fournir une solution intéressante pour des problématiques de surveillance d'équipements industriels. Parmi les propriétés importantes des réseaux de neurones, on peut citer leur tolérance aux fautes qui mesure leur aptitude à exécuter la tâche qui leur est demandée en présence d'informations erronées et de maintenir leur capacité de calcul même si une partie du réseau est endommagée. L'utilisation des réseaux de neurones artificiels a connu un essor important, ils ont été utilisés pour résoudre une multitude de problèmes dans divers domaines, en particulier, dans les processus utilisant des bases de données complexes (Heddam et Dechemi, 2008).

### III.2. Historique

- [J.MC-Culloch et W. Pitts \(1943\)](#), laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique. Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions mathématiques.
- [D. Hebb \(1949\)](#), explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. La loi de modification des connexions entre neurones a été proposée.
- [Von Neumann \(1958\)](#), envisageait déjà la possibilité d'un réseau fiable formé de composants non fiables par l'utilisation de la redondance.
- [Rosenblatt \(1958\)](#), a développé une méthode analytique rigoureuse d'adaptation de poids au sein d'un modèle multicouche appelée le perceptron.
- [Minsky et Papert \(1969\)](#), ont montré les limites du perceptron et son incapacité à résoudre les problèmes non linéairement séparables.

### III.3. Les neurones biologiques

Les réseaux neurones artificiels sont inspirés des neurones biologiques. Le cerveau humain contient essentiellement environ 100 milliards de neurones biologiques, ces derniers

sont des cellules vivantes leur principal rôle est de traiter les signaux électriques (Nedjaoum, 2016).

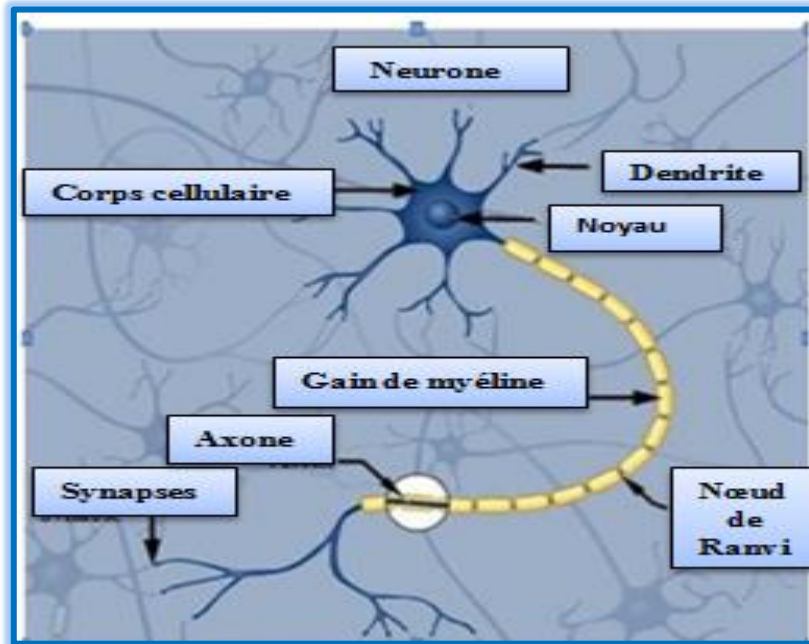


Figure III.1. Neurones biologiques

Leur structure est composée particulièrement de trois parties (Figure III.1.) le corps cellulaire, les dendrites, l'axone et Synapse.

- **Le corps cellulaire :** Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biochimique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient aussi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns de diamètre (Ghenam ,2012).
- **Les dendrites :** Ce sont les récepteurs principaux du neurone pour capter les signaux qui lui parviennent.
- **L'axone :** L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signaux partent du neurone grâce à l'arborescence terminale que possède l'axone.
- **Synapse :** Ce sont des points qui font connecter deux neurones entre eux ou des fibres nerveuses.

Le neurone biologique traite les informations qui lui parviennent localement, puis les transmet aux autres neurones. Comme elles peuvent changer cette règle de traitement, ce processus est appelé l'apprentissage et joue un rôle très important dans le comportement général du neurone.

### III.4. Neurone formel

Le neurone artificiel « cellule » est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont. A chacune des entrées est associé un poids  $W_{kj}$  représentatif de la force de la connexion (Senouci et Beghadi, 2005). Le neurone représenté par la (Figure III.2) se compose d'une cellule possédant plusieurs entrées et une sortie.

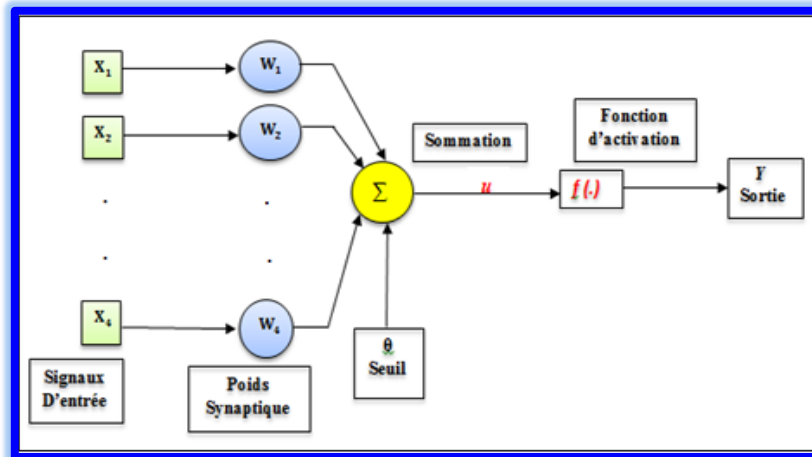


Figure III.2. Schéma d'un neurone formel

### III.5. Architecture des réseaux de neurones artificiels

On distingue deux structures de réseau, en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à-dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les « connexions » entre ceux-ci. (Dreyfus, 2004) : Les réseaux de neurones statiques (ou acycliques, ou non bouclés) et les réseaux de neurones dynamiques (ou récurrents, ou bouclés).

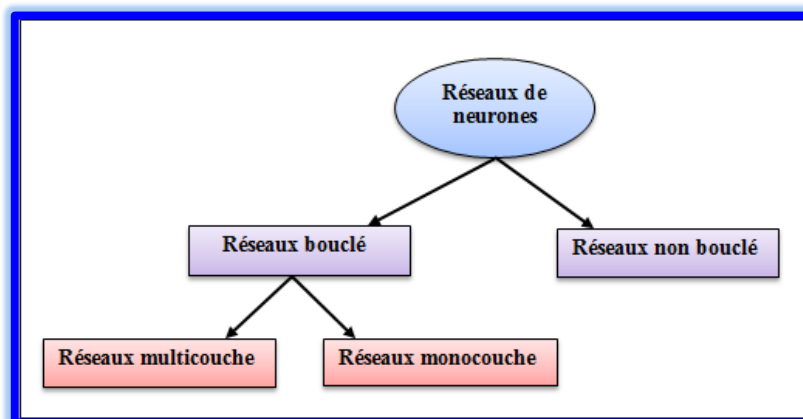


Figure III.3. Topologie des réseaux de neurones artificiels

### III.5.1. Réseaux de neurones non bouclé

Un réseau de neurones non bouclés est un ensemble de neurones connectés entre eux d'où l'information circule seulement des entrées d'un réseau vers la sortie, autrement dit, il n'y a pas de boucle de retour (Marcos et al., 1987). Ce type de réseaux est utilisé pour effectuer des tâches d'approximation de fonction non linéaire, de la classification ou de la modélisation de processus statiques non linéaires.

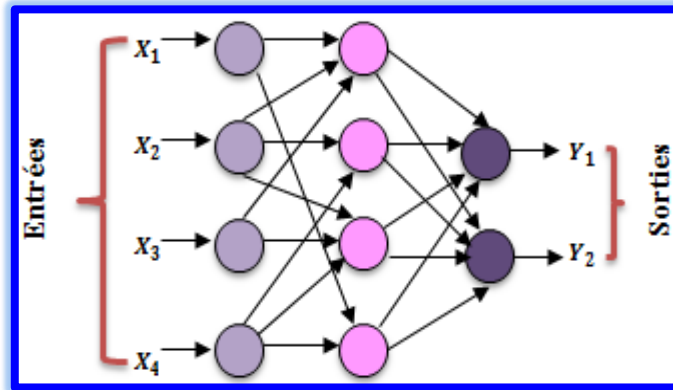


Figure III.4. Exemple de réseaux de neurones non bouclées

#### III.5.1.1. Perceptron Monocouche

Ne se compose que d'une couche d'entrée et une couche de sortie. Il est basé sur un système de vision, il est donc principalement utilisé pour la reconnaissance de forme.

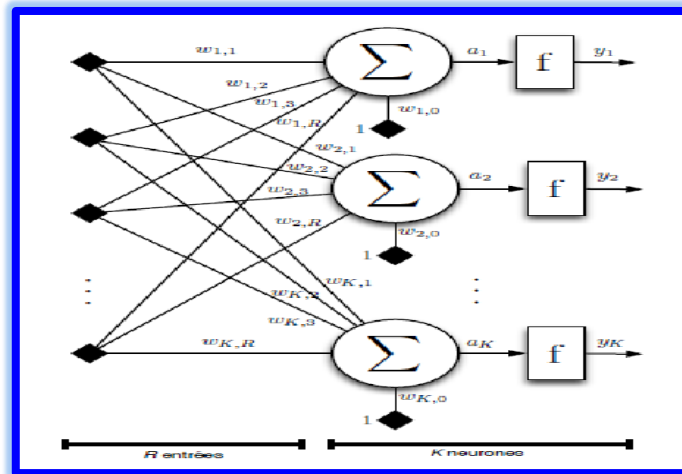


Figure III.5. Réseau de Neurones Monocouche

#### III.5.1.2. Perceptron Multicouches

Le perceptron multicouche (Multi Layer Perceptron MLP) est un réseau comportant plusieurs couches, chaque neurone d'une couche étant totalement connecté aux neurones de la couche suivante. Chaque neurone est un automate linéaire généralisé dont la fonction de

transfert est supposée sigmoïdale (Figure II.6). Une information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie uniquement ; il s'agit donc d'un réseau de type feedforward. Chaque couche est constituée d'un nombre variable de neurones, les neurones de la couche de sortie correspondant toujours aux sorties du système (Haykin, 1994).

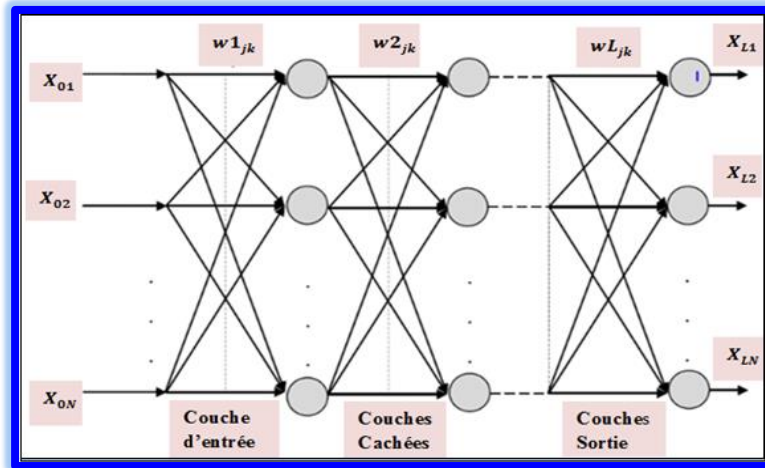


Figure III.6. Le Perceptron Multicouches MLPNN

### III.5.2. Réseaux de neurones bouclés

Les réseaux bouclés ou récurrents, disposent d'un graphe de connexions cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de « cycle »). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même ; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération (Dreyfus, 2004).

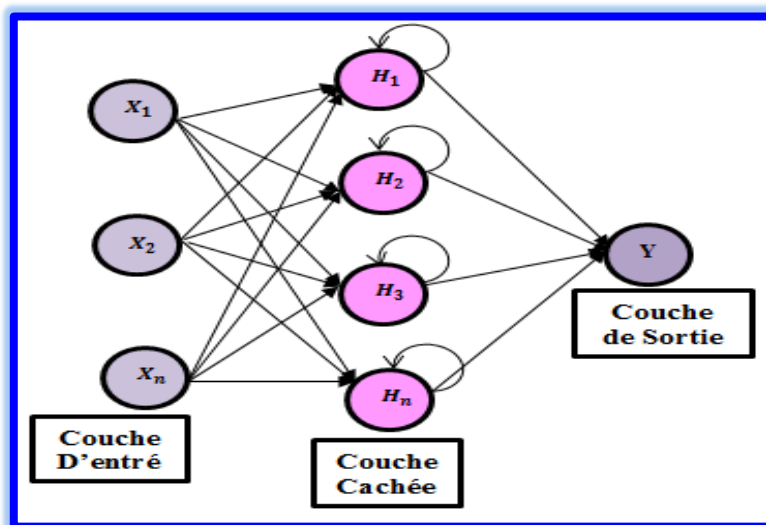


Figure III.7. Réseau neuronal perceptron multicouche bouclé

## III.6. Modélisation par les Réseaux de Neurones artificiels

### III.6.1. Les Étapes de la Modélisation

- Toute modélisation nécessite des phases de paramétrisation et de vérification du modèle développé : le calage (apprentissage en anglais training) et la validation.
- Le Calage : estimation des paramètres du modèle en minimisant les erreurs liées aux données.
- Validation : l'étape de calage ne suffit pas cependant à valider les modèles et donc à s'assurer de leur « réalisme ». Il reste encore à vérifier la qualité du modèle calibré sur des séries de mesures non utilisées lors du calage.

## III.7. Type d'apprentissage

L'apprentissage est la caractéristique principale des réseaux de neurones, c'est le processus d'adaptation des paramètres d'un système pour remplir au mieux la tâche pour laquelle le réseau a été construit.

### III.7.1. Apprentissage supervisé

Dans ce cas, la connaissance à priori de la sortie désirée est nécessaire. On présente au réseau le vecteur d'entrée puis sa sortie est calculée et comparée à la sortie désirée, ensuite les poids sont ajustés de façon à réduire l'écart entre elles. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait. (Zaarour, 2013).

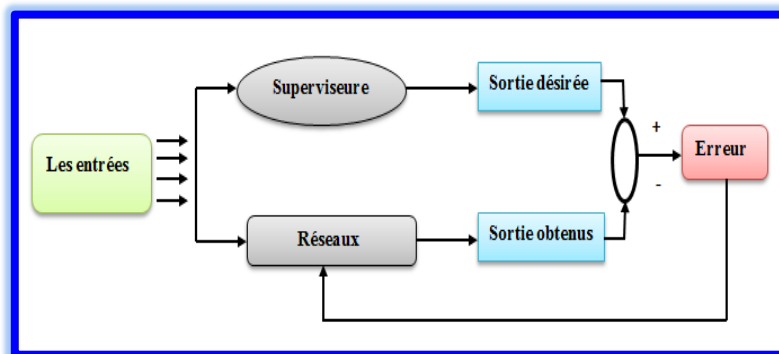


Figure III.8. Apprentissage supervisé

### III.7.2. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau. Qu'est-ce que le réseau apprend exactement dans ce cas ? L'apprentissage consiste à détecter

les similaires et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données. L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation, « self-organizing » (Kohonen, 1982). L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle.

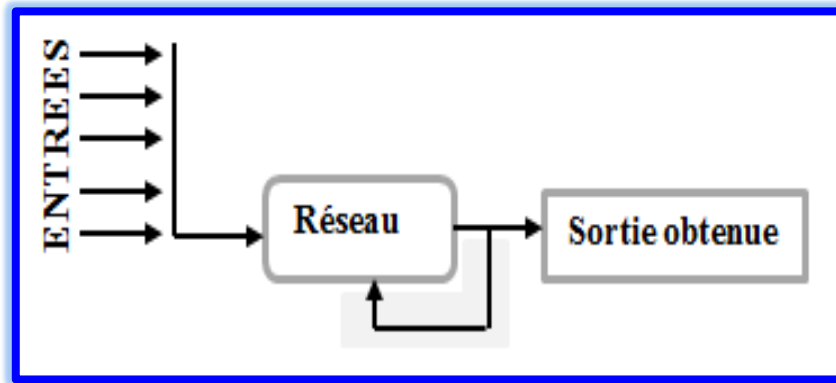


Figure III.9. Apprentissage non supervisé

### III.8. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présentés brièvement les notions de base sur les réseaux de neurones artificiels en commençant par un historique et en arrivant à la présentation des étapes de développement des modèles. Il est important de noter que, dans la présente étude nous avons utilisés les modèles de type perceptron multicouche (MLPNN) avec un apprentissage supervisé. Le modèle que nous avons utilisé a été développé sous le logiciel Statistica que nous présentons en détail dans le prochain chapitre.

***Chapitre IV : Présentation de la Base de Données et  
Description de l'Approche de Modélisation***

---

## IV.1. Introduction

Comme déjà discuter dans le chapitres précédent, l'objectif de notre étude est la modélisation de la  $DBO_5$  au niveau de la STEP de BATNA. Nous avons exploité une base de données contenant les mesures des variables de la qualité des eaux usées à l'entrée et la sortie de la STEP. La base de données contient les variables suivantes : le débit des eaux usées ( $Q$  : $m^3$ /jours), la température des eaux ( $T_w$ ), le pH des eaux, les matières en suspension (MES), la conductivité électrique (SC), la demande chimique en oxygène (DCO), et la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours ( $DBO_5$ ). La  $DBO_5$  est la variable à modéliser, alors que les  $Q$ ,  $T_w$ , pH, SC, MES, et DCO forment les inputs des modèles. La base de données correspondant à la période allant de 01/01/2000 au 31/12/2025 avec un total de données de l'ordre de 3000. La base de données est scindée en deux parties: 70% pour la partie calage (apprentissage) et 30% pour la partie validation afin de juger la qualité prédictive des modèles. Il est à signaler que la répartition de la base de données se fait d'une façon aléatoire. Nous avons utilisé le logiciel Statistica Release 7. Les statistiques descriptives des données utilisées sont reportées dans les Tableaux IV.1 et IV.2. Nous avons testé plusieurs combinaisons des variables d'entrées et a total 12 modèles ont été développé (Tableau IV.3).

**Table IV.1.** Statistiques descriptive de la base de données utilisées : Entrée de la STEP.

Variables	Subset	Unit	$X_{mean}$	$X_{max}$	$X_{min}$	$S_x$	$C_v$	$R$
<i>Batna Wastewater Treatment Plant</i>								
$BOD_5$	Training	Mg/L	379.38	994.00	86.00	111.40	0.29	1.00
	Validation	Mg/L	379.16	628.00	132.00	99.88	0.26	1.00
	All data	Mg/L	379.32	994.00	86.00	108.03	0.29	1.00
$Q$	Training	$m^3/s$	19485.93	28238.00	1304.00	3319.54	0.17	-0.15
	Validation	$m^3/s$	19274.33	28238.00	7410.00	3288.04	0.17	-0.03
	All data	$m^3/s$	19422.48	28238.00	1304.00	3310.10	0.17	-0.12
$T_w$	Training	$^{\circ}C$	19.93	27.00	11.20	3.78	0.19	0.20
	Validation	$^{\circ}C$	20.08	26.80	11.30	3.76	0.19	0.18
	All data	$^{\circ}C$	19.97	27.00	11.20	3.77	0.19	0.20
PH	Training	//	7.65	8.18	6.26	0.25	0.03	0.22
	Validation	//	7.66	8.28	6.53	0.23	0.03	0.16
	All data	//	7.66	8.28	6.26	0.25	0.03	0.20
SC	Training	$\mu.s/cm$	2342.24	3330.00	1016.00	332.44	0.14	0.43
	Validation	$\mu.s/cm$	2328.78	2980.00	1004.00	322.23	0.14	0.40
	All data	$\mu.s/cm$	2338.20	3330.00	1004.00	329.33	0.14	0.42
MES	Training	Mg/L	409.03	1716.00	155.00	129.07	0.32	0.16
	Validation	Mg/L	411.76	1716.00	244.00	103.21	0.25	0.25
	All data	Mg/L	409.85	1716.00	155.00	121.86	0.30	0.18
COD	Training	Mg/L	928.95	2084.00	351.00	209.62	0.23	0.71
	Validation	Mg/L	914.11	1990.00	320.00	210.28	0.23	0.73
	All data	Mg/L	923.98	2084.00	320.00	209.46	0.23	0.71

**Table IV.2.** Statistiques descriptive de la base de données utilisées : Sortie de la STEP.

Variables	Subset	Unit	$X_{\text{mean}}$	$X_{\text{max}}$	$X_{\text{min}}$	$S_x$	$C_v$	$R$
<i>Batna Wastewater Treatment Plant</i>								
$BOD_5$	Training	Mg/L	18.56	48.00	2.30	7.05	0.38	1.00
	Validation	Mg/L	18.64	79.00	3.60	7.36	0.40	1.00
	All data	Mg/L	18.59	79.00	2.30	7.14	0.38	1.00
$Q$	Training	$m^3/s$	17252.07	26338.00	1020.00	4059.73	0.24	-0.03
	Validation	$m^3/s$	17019.99	26575.00	2560.00	3995.64	0.24	0.02
	All data	$m^3/s$	17182.49	26575.00	1020.00	4040.26	0.24	-0.01
$T_w$	Training	°C	19.21	26.40	9.10	3.82	0.20	0.07
	Validation	°C	19.43	26.50	9.80	3.80	0.20	-0.07
	All data	°C	19.27	26.50	9.10	3.81	0.20	0.03
PH	Training	//	7.74	8.21	6.40	0.31	0.04	-0.18
	Validation	//	7.78	11.54	6.38	0.35	0.05	-0.12
	All data	//	7.75	11.54	6.38	0.32	0.04	-0.16
SC	Training	$\mu.s/cm$	2356.02	25550.00	1020.00	982.02	0.42	0.16
	Validation	$\mu.s/cm$	2310.10	3090.00	1024.00	333.25	0.14	0.23
	All data	$\mu.s/cm$	2342.25	25550.00	1020.00	841.81	0.36	0.16
MES	Training	Mg/L	24.53	59.00	6.00	6.81	0.28	0.13
	Validation	Mg/L	24.79	59.00	9.00	6.79	0.27	0.22
	All data	Mg/L	24.61	59.00	6.00	6.80	0.28	0.16
COD	Training	Mg/L	105.71	188.00	36.00	31.07	0.29	0.26
	Validation	Mg/L	106.17	238.00	28.00	33.51	0.32	0.36
	All data	Mg/L	105.85	238.00	28.00	31.81	0.30	0.29

**Table IV.3.** The input combinations of different models.

MLPNN	MLR	Input combination	Output
MLPNN1	MLR1	Q, $T_w$ , pH, SC, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN2	MLR2	Q, $T_w$ , pH, SC, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN3	MLR3	Q, $T_w$ , pH, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN4	MLR4	Q, $T_w$ , SC, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN5	MLR5	Q, $T_w$ , MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN6	MLR6	Q, pH, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN7	MLR7	$T_w$ , pH, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN8	MLR8	Q, SC, MES, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN9	MLR9	Q, $T_w$ , DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN10	MLR10	Q, pH, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN11	MLR11	Q, DCO	DBO <sub>5</sub>
MLPNN12	MLR12	$T_w$ , DCO	DBO <sub>5</sub>

## IV.2. Critères de validation des modèles

Nous avons sélectionné quatre critères de mesure de l'erreur numérique: la racine carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE), la moyenne des erreurs (MAE), le coefficient de Corrélation (R), et le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE). Pour les deux premiers critères (RMSE et MAE) elles doivent être proches de zéro pour avoir un meilleur modèle alors que pour les deux autres indices (R et NSE) il faut toujours chercher à avoir des modèles ayant des coefficients proches de 1.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |BOD5_{pre,i} - BOD5_{obs,i}|}{N} \quad (01)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (BOD5_{obs,i} - BOD5_{pre,i})^2}{N}} \quad (02)$$

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (BOD5_{obs,i} - BOD5_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (BOD5_{obs,i} - \overline{BOD5_{obs}})^2} \right] \quad (03)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (BOD5_{obs,i} - \overline{BOD5_{obs}})(BOD5_{pre,i} - \overline{BOD5_{pre}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (BOD5_{obs,i} - \overline{BOD5_{obs}})^2 \sum_{i=1}^N (BOD5_{pre,i} - \overline{BOD5_{pre}})^2}} \quad (04)$$

$\overline{BOD5_{obs}}$  and  $\overline{BOD5_{pre}}$  sont les moyennes des valeurs mesurées et calculées de la DBO<sub>5</sub>, respectively,  $BOD_{obs}$  and  $BOD_{pre}$  sont les valeurs de la DBO<sub>5</sub> mesurées et calculées par le modèles, et N le nombre de données.

### IV.3. Développement des modèles MLPNN avec le logiciel STATISTICA.



Figure IV.1. Lancement du logiciel Statistica

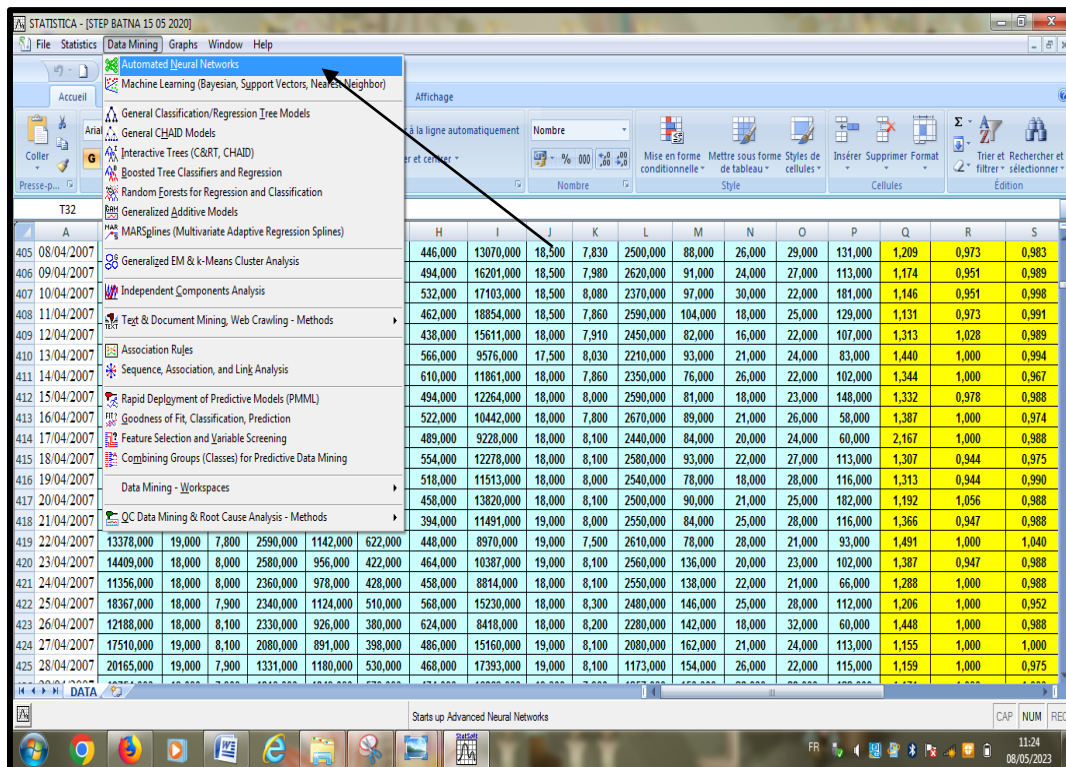


Figure IV.2. Accès à la base des modèles réseau de neurones artificiels

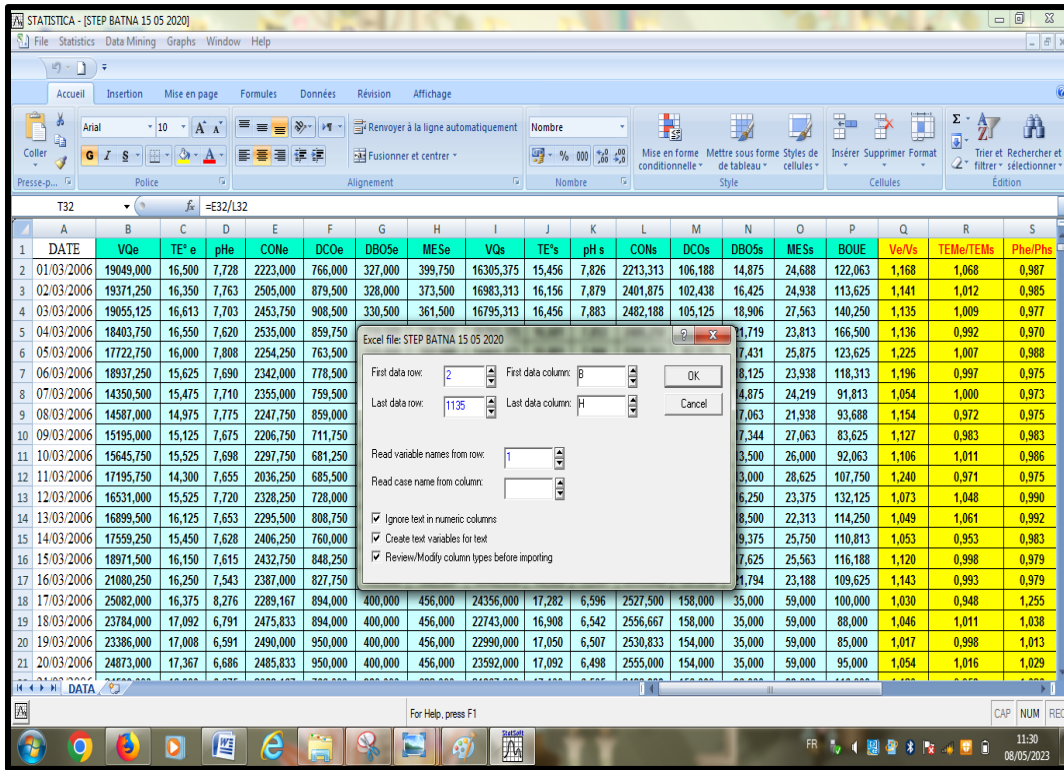


Figure IV.3. Sélection de la plage des données à utiliser

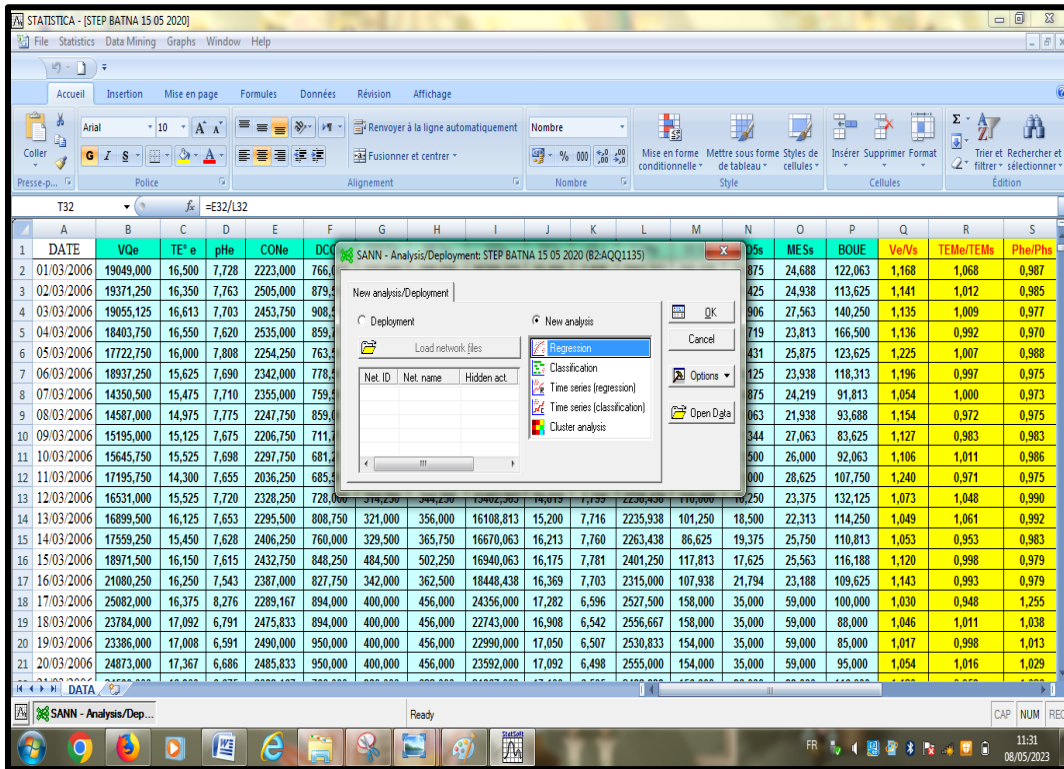


Figure IV.4. Sélection de la fonction de régression

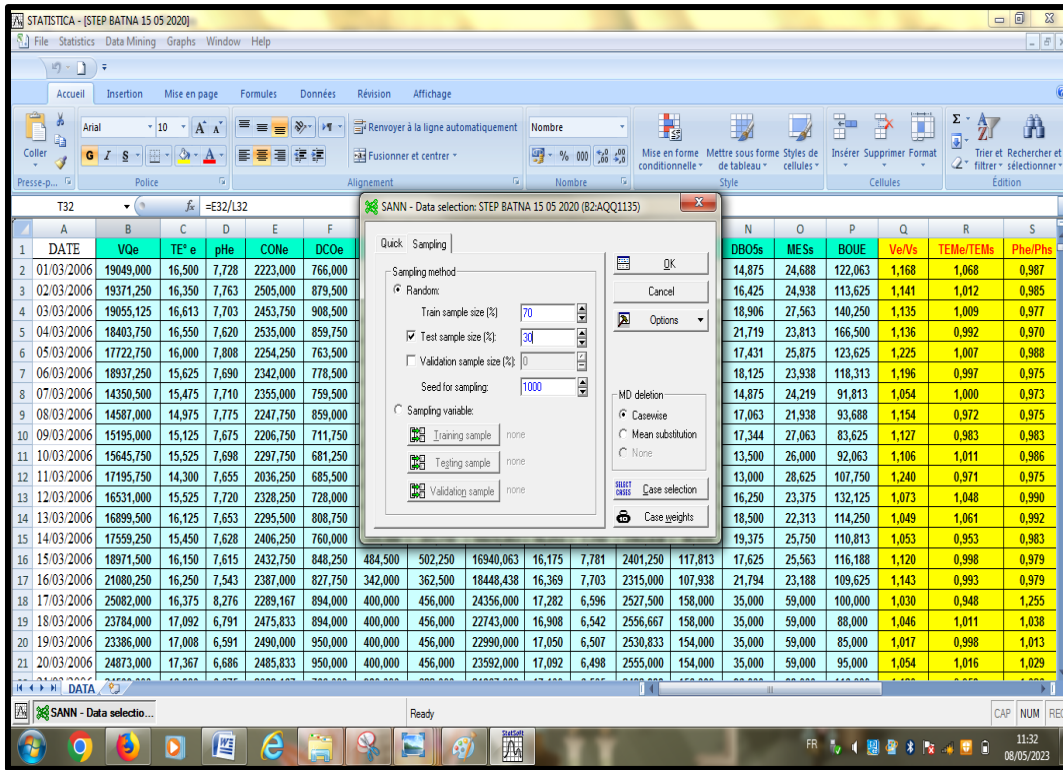


Figure IV.5. Division de la base de données en apprentissage et validation

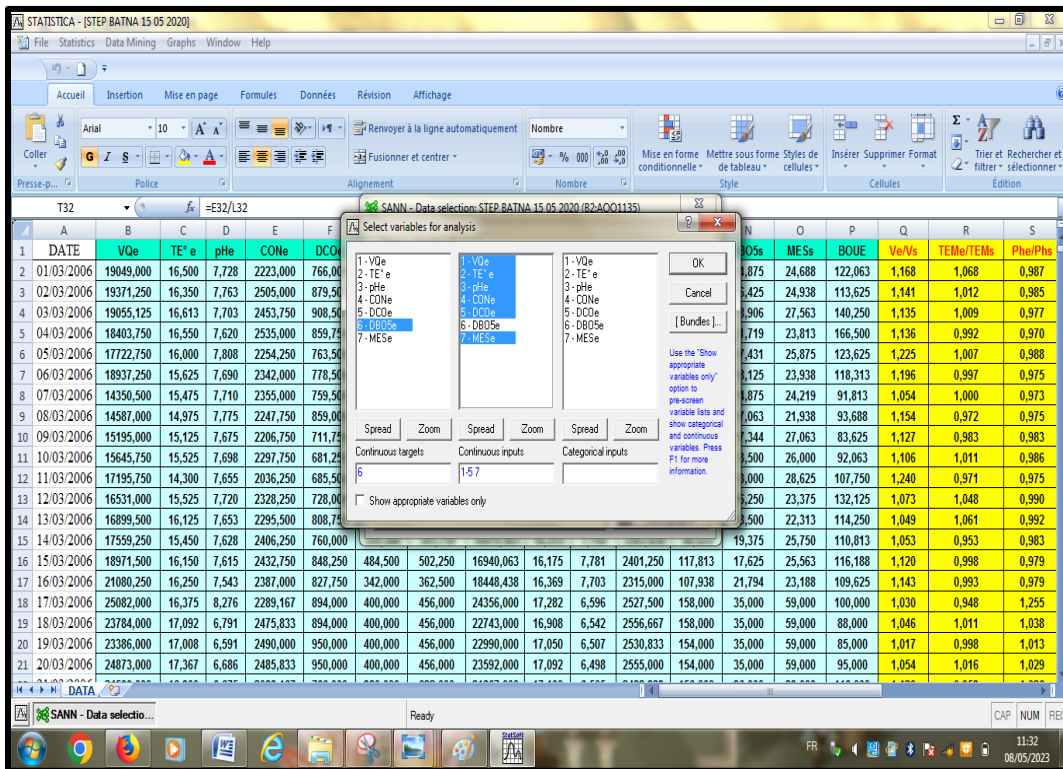


Figure IV.6. Identification des variables de sortie (Target) et d'entrée (Inputs)

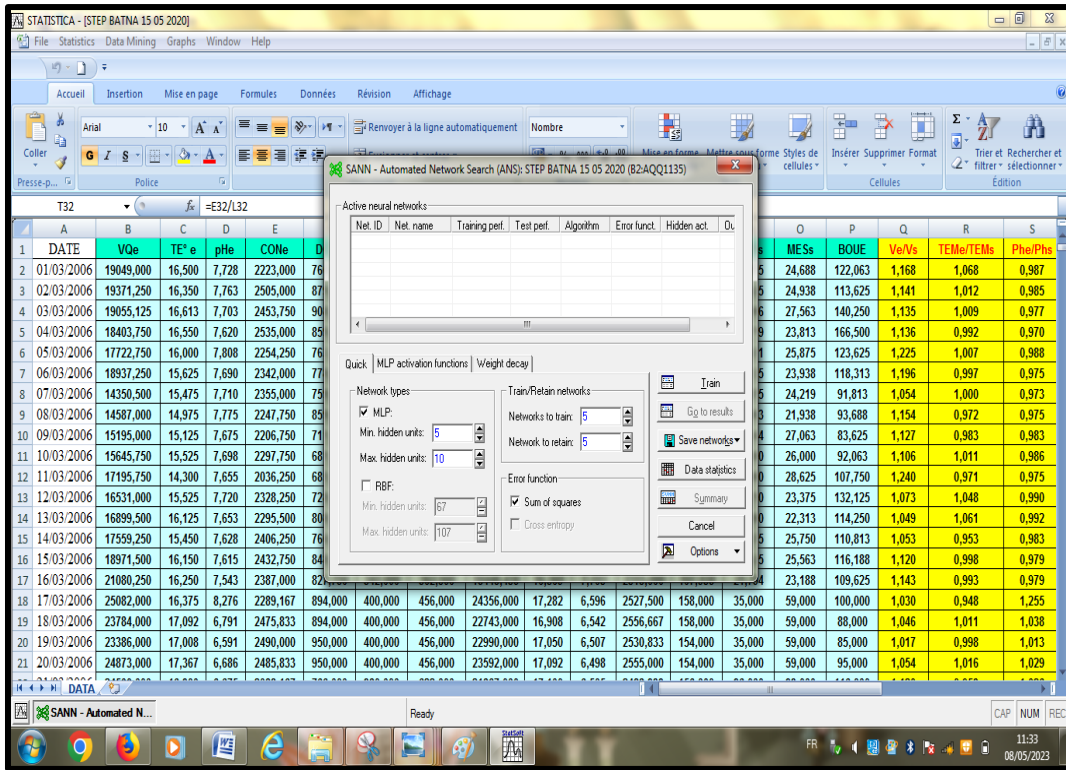


Figure IV.7. Choix de la fonction d'activation des neurones

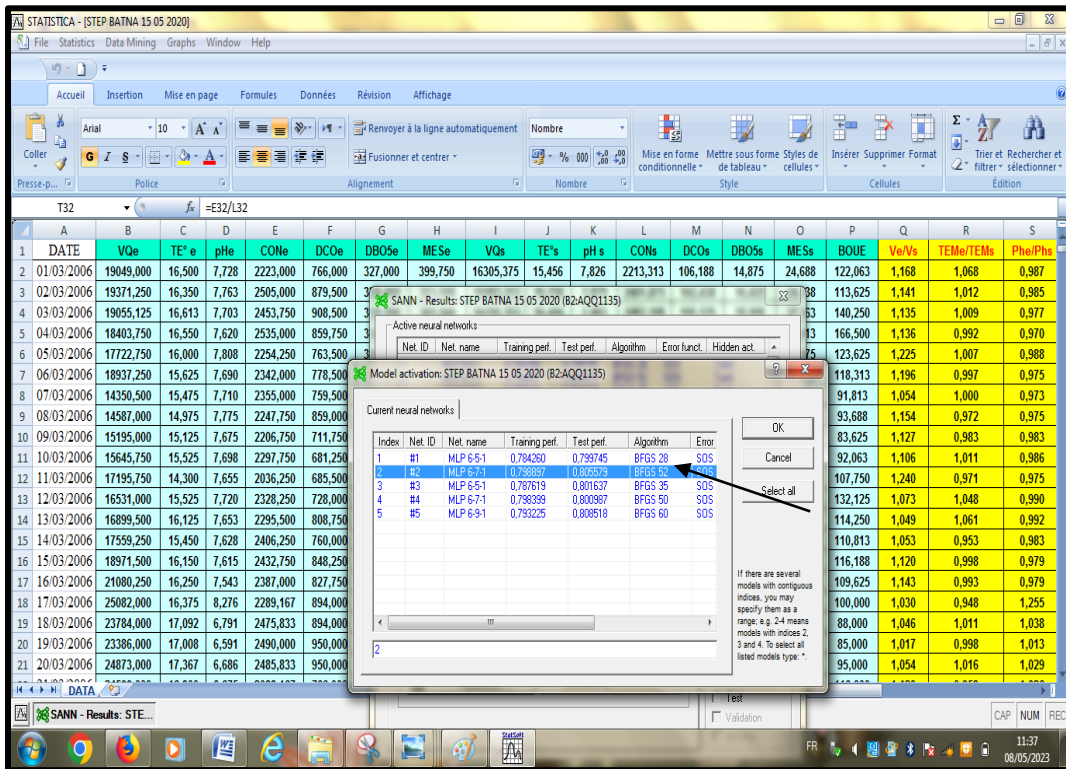


Figure IV.8. Lancement de l'apprentissage et affichage des résultats

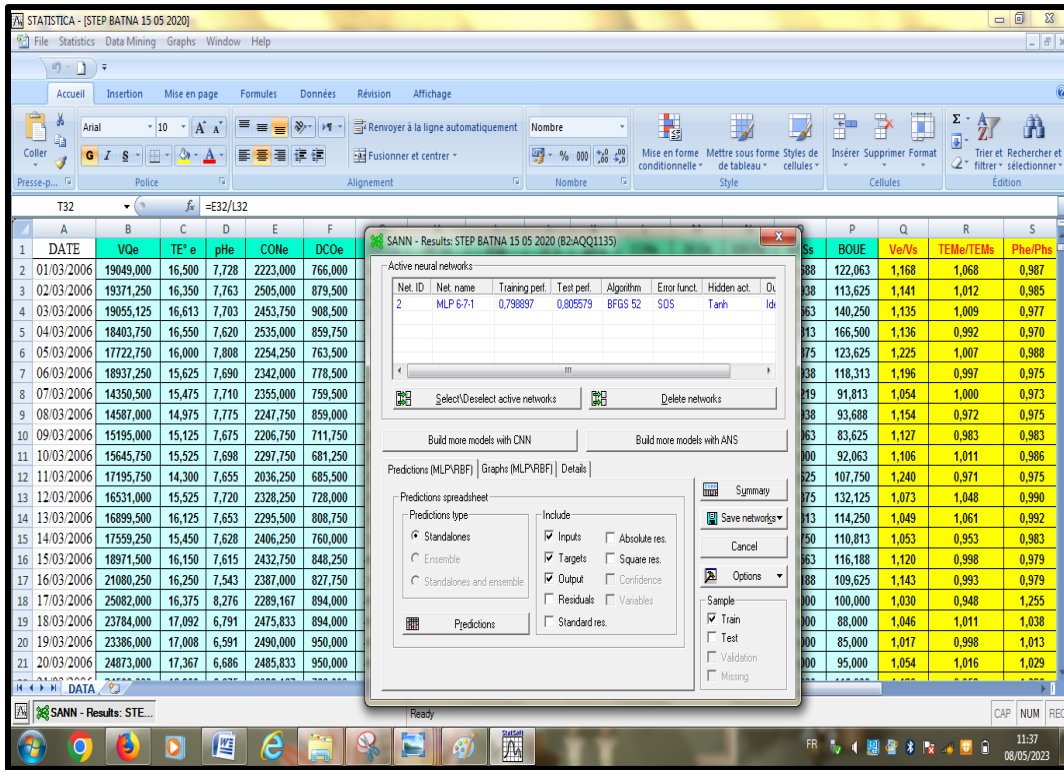


Figure IV.9. Choix du meilleur modèle.

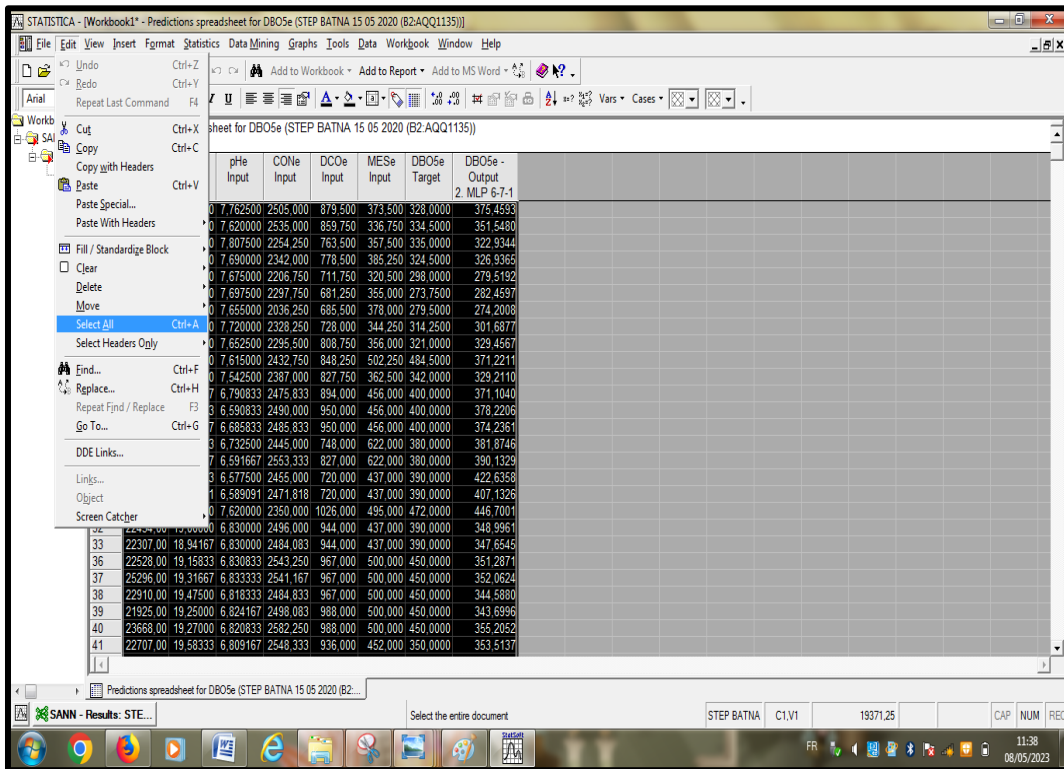


Figure IV.10. Affichage des résultats partie apprentissage et partie validation

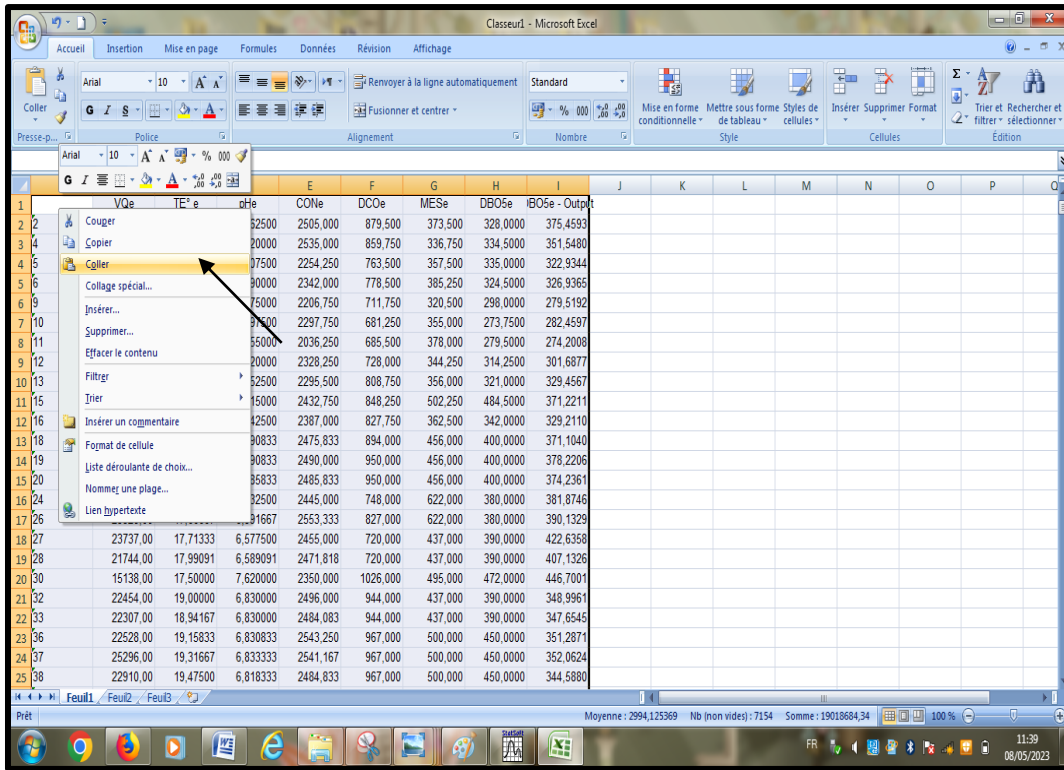


Figure IV.11. Transfert des données vers un fichier Excel

#### IV.4. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présentés la base de données utilisées pour la modélisation de la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours ( $DBO_5$ ). Nous avons procédé à la modélisation de la  $DBO_5$  en deux phases: entrées et sortie de la STEP. Pour les modèles nous avons utilisés deux types: les modèles à base de réseaux de neurones artificiels de type perceptron multicouche (MLPNN) et les modèles à base de régression linéaire multiple (MLR). Nous avons aussi présenté les étapes à suivre pour le développement des modèles avec le logiciel Statistica. Dans le chapitre suivant nous présentons les résultats obtenus avec les différents modèles.

***Chapitre V : Résultats de la Modélisation de la Demande Biochimique en Oxygène Pendant Cinq Jours (DBO<sub>5</sub>)***

---

## V.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous présentons les résultats de la modélisation obtenus par les deux modèles MLPNN et MLR appliqués pour la modélisation de la DBO<sub>5</sub> à l'entrée et à la sortie de la STEP de la ville de Batna. Les modèles ont été évalués en utilisant quatre indices de performances, i.e., les R, NSE, RMSE et MAE. Les modèles ont été calibrés en phase de calage et évalués en phase de validation, les résultats obtenus sont reportés dans les deux **Tableaux (V.1)** et **(V.2)**. Nous discutons uniquement les résultats obtenus en phase de validation. Les modèles ont été aussi évalués en utilisant les courbes Scatterplot des valeurs mesurées et calculées par les modèles (**Figures V.1-4**).

## V.2. Résultats de la modélisation de la DBO<sub>5</sub>: Entrées de la STEP

Pour l'entrée de la STEP (**Tableau V.1**), on enregistre de bons résultats avec la majorité des modèles MLPNN, cependant, le modèle MLPNN12 utilisant les (T<sub>w</sub>, DCO) était le plus faible avec (R=0.791, NSE=0.623, RMSE=61.264). Avec les modèles utilisant cinq variables d'entrées, le modèle MLPNN2 était le moins performant avec des R et NSE de l'ordre de 0.806, 0.644, et des RMSE et MAE de l'ordre de 59.527 et 44.123, respectivement, alors que le modèle MLPNN3 à cinq variables (Q, T<sub>w</sub>, pH, MES, DCO) était le plus performant avec R et NSE de l'ordre de 0.813 et 0.658, et des RMSE et MAE de l'ordre de 58.355 et 42.903. Pour les modèles à quatre variables, le modèle MLPNN5 qui utilise les (Q, T<sub>w</sub>, MES, DCO) était le plus performant parmi les 12 modèles avec des R et NSE de l'ordre de 0.814 et 0.659, et des RMSE et MAE de l'ordre de 58.216 et 42.970, respectivement, largement meilleure que les deux modèles MLPNN6, MLPNN7 et MLPNN8. Avec les modèles à trois entrées, le modèle MLPNN10 qui utilise les (Q, pH, DCO) était le plus performant avec (R=0.810, NSE=0.653). Pour qui est des meilleures variables, l'effet de la DCO est prédominant et les meilleurs résultats étaient obtenus avec les modèles qui tiennent compte d'elle comme entrée. Pour les modèles MLR, on remarque que la majorité des modèles ont donné des résultats proches les uns des autres et aucun modèle n'a été largement supérieur aux autres. Les indices R et NSE étaient dans l'intervalle de (0.713 à 0.740) et (0.523 à 0.540), avec de meilleurs résultats obtenus avec le modèle MLR4 avec des R, NSE, et RMSE de l'ordre de 0.740, 0.540, et 67.636, respectivement. Les courbes Scatterplot pour les modèles MLPNN et MLR sont reportés dans les **Figures (V.1)** et **(V.2)**.

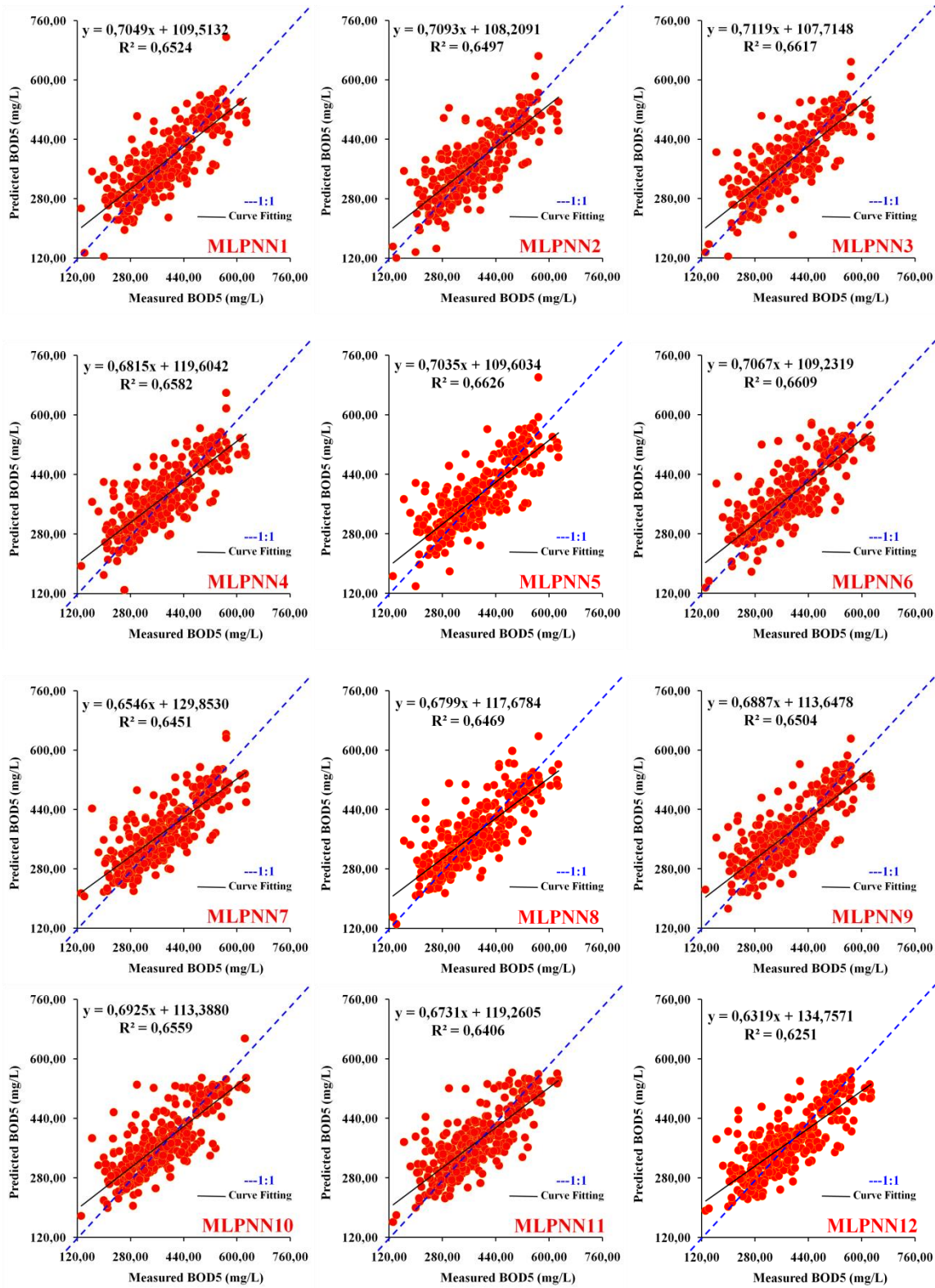


Figure V.1. Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO<sub>5</sub> à l'entrée de la STEP: validation data & modèles MLPNN

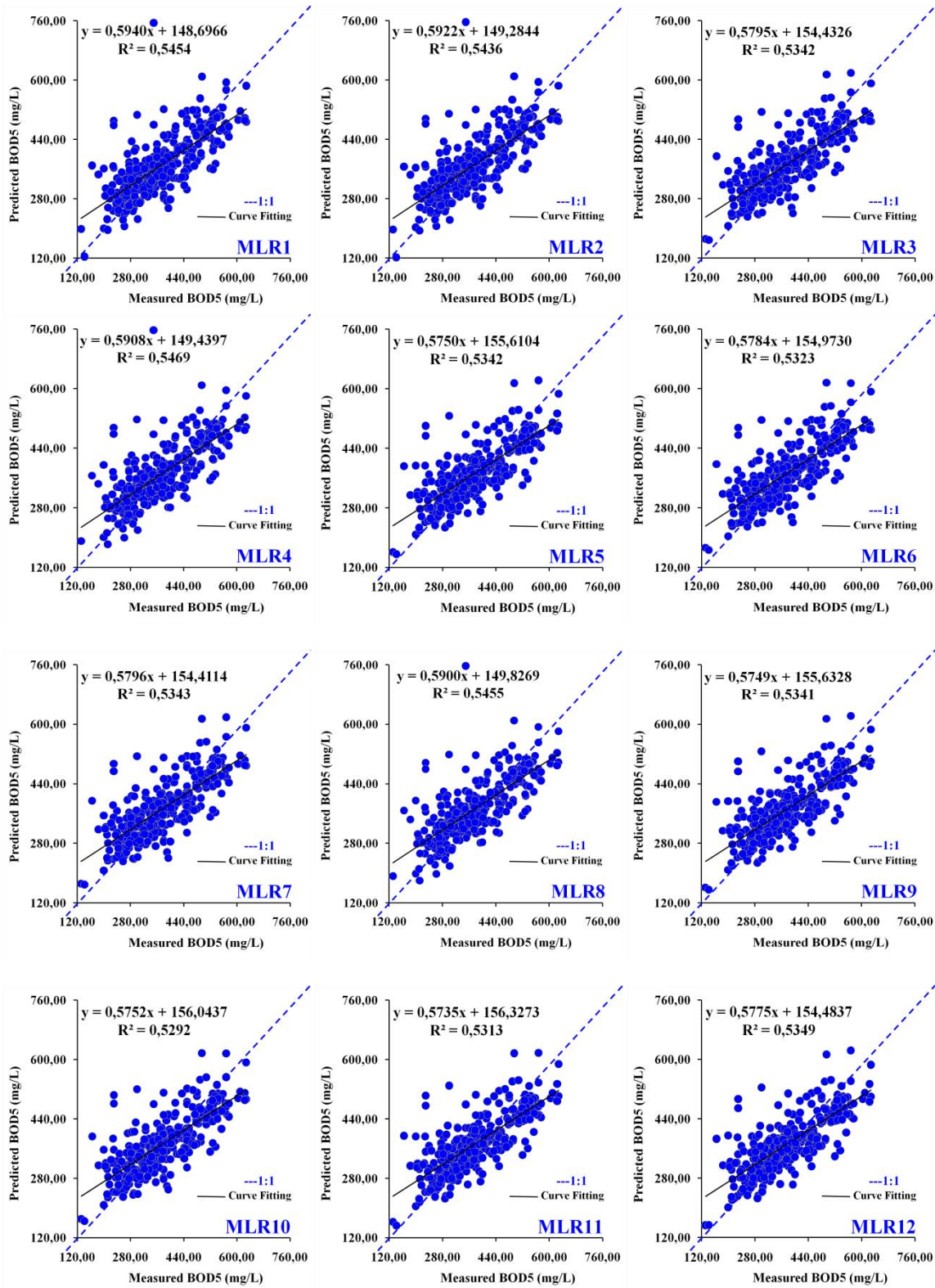


Figure V.2. Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO<sub>5</sub> à l'entrer de la STEP: validation data & modèles MLR

**Table V.1.** Performances des différents MLPNN et MLR modèles: Entrée de la STEP.

Models	Training				Validation			
	R	NSE	RMSE	MAE	R	NSE	RMSE	MAE
MLPNN1	0.798	0.637	67.122	48.897	0.808	0.648	59.210	44.563
MLPNN2	0.800	0.640	66.799	48.104	0.806	0.644	59.527	44.123
MLPNN3	0.791	0.626	68.093	48.586	0.813	0.658	58.355	42.903
MLPNN4	0.770	0.592	71.091	50.593	0.811	0.657	58.392	43.441
MLPNN5	0.783	0.614	69.210	49.749	0.814	0.659	58.216	42.970
MLPNN6	0.784	0.614	69.170	50.256	0.813	0.657	58.388	42.176
MLPNN7	0.773	0.597	70.657	50.437	0.803	0.645	59.442	43.574
MLPNN8	0.765	0.586	71.655	51.970	0.804	0.644	59.524	43.950
MLPNN9	0.767	0.588	71.427	51.385	0.806	0.646	59.328	44.888
MLPNN10	0.767	0.589	71.418	51.276	0.810	0.653	58.765	43.385
MLPNN11	0.750	0.563	73.612	53.121	0.800	0.637	60.110	45.343
MLPNN12	0.750	0.562	73.704	52.252	0.791	0.623	61.264	45.000
MLR1	0.728	.530	76.350	55.563	0.739	0.538	67.771	49.279
MLR2	0.727	0.529	76.397	55.534	0.737	0.536	67.911	49.405
MLR3	0.713	0.509	78.012	56.425	0.731	0.528	68.531	49.211
MLR4	0.724	0.523	76.858	55.765	0.740	0.540	67.636	49.503
MLR5	0.708	0.501	78.678	56.510	0.731	0.528	68.521	49.590
MLR6	0.713	.509	78.038	56.524	0.730	0.526	68.673	49.507
MLR7	0.713	0.509	78.012	56.426	0.731	0.528	68.530	49.210
MLR8	0.723	0.523	76.873	55.809	0.739	0.539	67.745	49.736
MLR9	0.708	0.501	78.678	56.511	0.731	0.528	68.528	49.597
MLR10	0.712	0.507	78.144	56.500	0.727	0.523	68.907	49.814
MLR11	0.707	0.500	78.717	56.610	0.729	0.525	68.780	49.986
MLR12	0.707	0.500	78.716	56.565	0.713	0.528	68.508	49.575

### V.3. Résultats de la modélisation de la DBO<sub>5</sub> : Sortie de la STEP

À la sortie de la STEP, les tentatives de modélisation de la DBO<sub>5</sub> n'ont pas abouti que ce soit avec les MLPNN ou avec les MLR et de très faible performances ont été obtenus. Pour les modèles à base de réseaux de neurones artificiels de type MLPNN, aucun modèle parmi les douze modèles n'a été capable de donner des indices de performances supérieures aux valeurs de  $R \approx 0.524$ ,  $NSE \approx 0.273$ ,  $RMSE \approx 6.264$ , et  $MAE \approx 4.653$ , alors que pour les modèles MLR les résultats étaient très faibles avec des indices médiocres qui ne dépassent pas les valeurs de  $R \approx 0.412$ ,  $NSE \approx 0.154$ ,  $RMSE \approx 6.760$ , et  $MAE \approx 5.157$ . Étant donné que les deux types de modèles ont échoué à prédire correctement les valeurs de la DBO<sub>5</sub>, la comparaison ne présentera aucun sens scientifique. La qualité de prédiction est représentée par les courbes Scatterplot dans les figures (V.3) et (V.4).

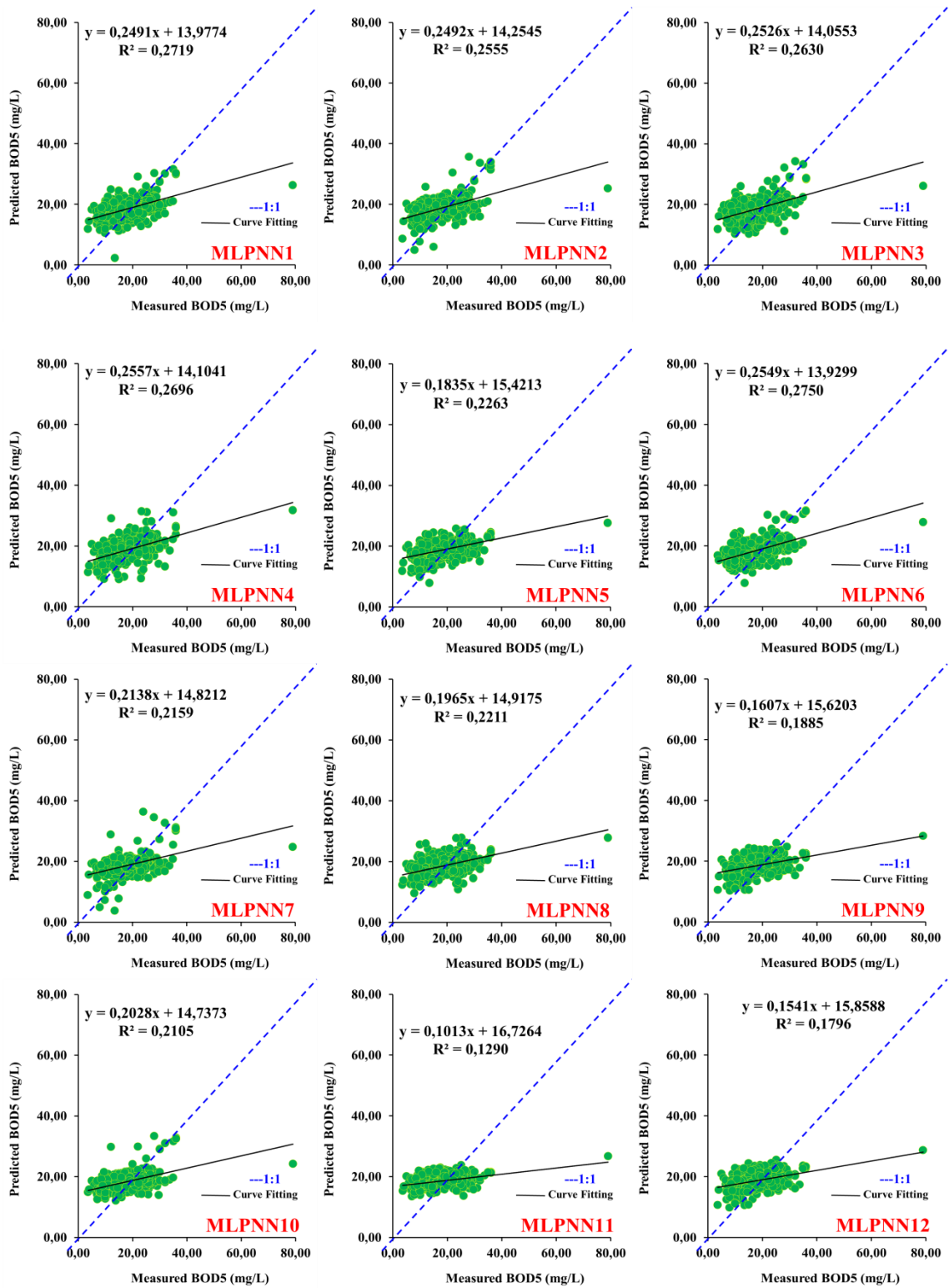


Figure V.3. Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO<sub>5</sub> à la sortie de la STEP : validation data & modèles MLPNN

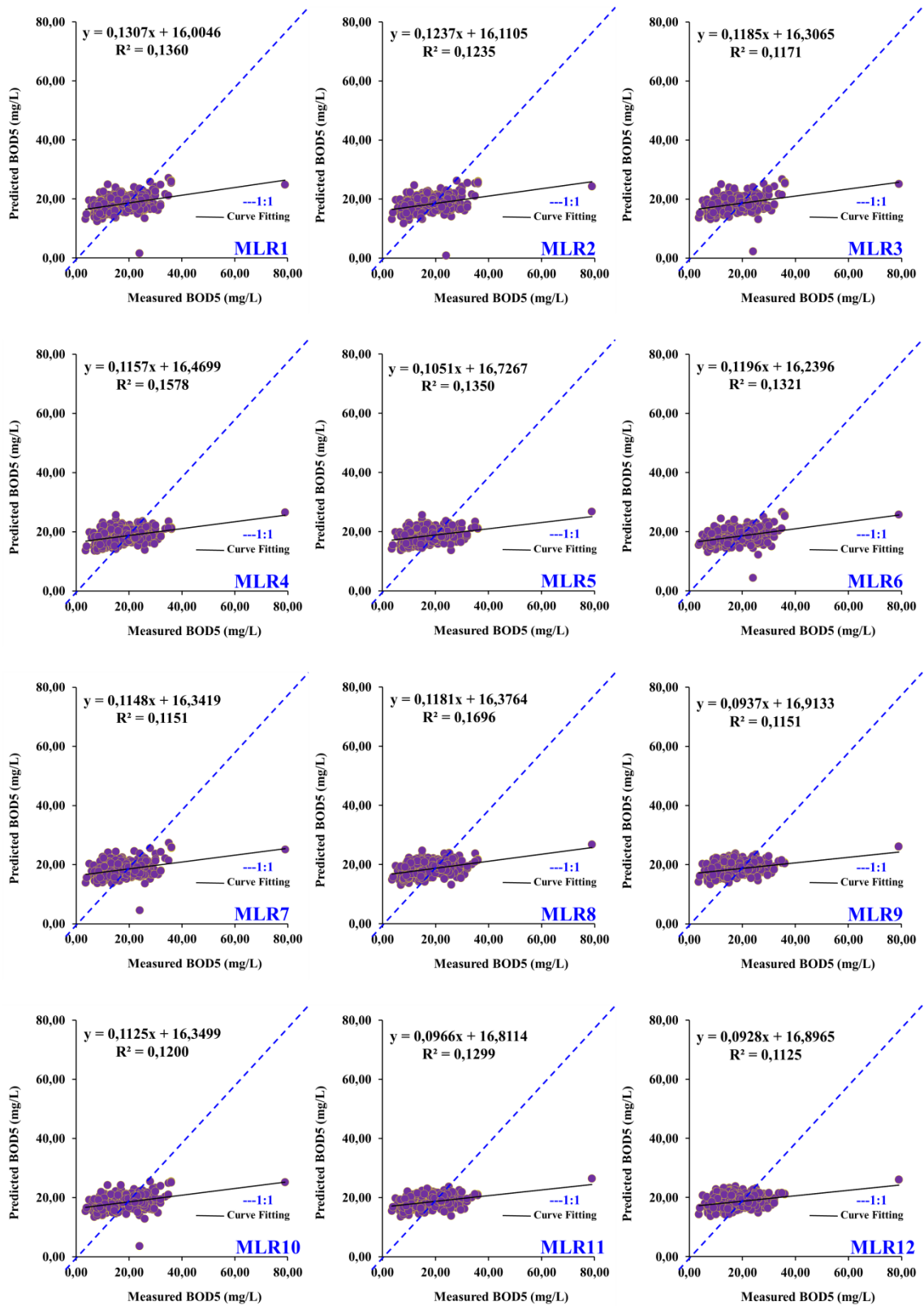


Figure V.4. Scatterplot des valeurs mesurer et calculer de la DBO<sub>5</sub> à la sortie de la STEP : validation data & modèles MLR

**Table V.2.** Performances des différents MLPNN et MLR modèles : Sortie de la STEP.

Models	Training				Validation			
	R	NSE	RMSE	MAE	R	NSE	RMSE	MAE
MLPNN1	0.540	0.291	5.936	4.690	0.521	0.270	6.279	4.705
MLPNN2	0.498	0.244	6.129	4.879	0.506	0.254	6.347	4.710
MLPNN3	0.545	0.297	5.910	4.620	0.513	0.262	6.312	4.661
MLPNN4	0.500	0.250	6.104	4.857	0.519	0.268	6.288	4.734
MLPNN5	0.412	0.169	6.424	5.242	0.476	0.217	6.501	4.921
MLPNN6	0.499	0.249	6.109	4.771	0.524	0.273	6.264	4.653
MLPNN7	0.435	0.189	6.347	5.163	0.465	0.215	6.510	4.896
MLPNN8	0.434	0.188	6.352	5.005	0.470	0.218	6.498	4.780
MLPNN9	0.375	0.140	6.535	5.321	0.434	0.184	6.637	5.064
MLPNN10	0.414	0.168	6.431	5.116	0.459	0.210	6.532	4.882
MLPNN11	0.264	0.069	6.800	5.554	0.359	0.123	6.882	5.298
MLPNN12	0.353	0.124	6.596	5.408	0.424	0.176	6.672	5.138
MLR1	0.378	0.143	6.525	5.383	0.369	0.135	6.835	5.247
MLR2	0.374	0.140	6.537	5.369	0.351	0.123	6.884	5.290
MLR3	0.344	0.118	6.619	5.480	0.342	0.117	6.907	5.339
MLR4	0.328	0.108	6.658	5.464	0.397	0.147	6.789	5.213
MLR5	0.294	0.086	6.737	5.551	0.367	0.128	6.861	5.307
MLR6	0.318	0.101	6.682	5.482	0.363	0.130	6.853	5.250
MLR7	0.327	0.107	6.661	5.554	0.339	0.115	6.915	5.398
MLR8	0.317	0.100	6.685	5.453	0.412	0.154	6.760	5.157
MLR9	0.282	0.080	6.762	5.553	0.339	0.111	6.929	5.369
MLR10	0.314	0.098	6.693	5.470	0.346	0.119	6.898	5.282
MLR11	0.265	0.070	6.797	5.546	0.360	0.121	6.889	5.290
MLR12	0.274	0.075	6.780	5.591	0.335	0.109	6.937	5.396

## V.4. Conclusion

Les résultats obtenus dans la présente étude ont montré que la modélisation par l'intelligence artificielle ne conduit pas automatiquement à construire des modèles solides et capables d'assurer de très bonne approximation de fonction. Malgré que les résultats à l'entrée de la STEP étaient relativement acceptables, en particulier avec les modèles MLPNN avec lesquels nous avons obtenus des indices de l'ordre de  $\approx 0.814$  et  $\approx 0.659$  pour les R et NSE, les résultats à la sortie de la STEP pour les eaux épurées étaient très mauvaise avec de très faibles indices, i.e.,  $R \approx 0.524$  et  $NSE \approx 0.273$ . Malgré l'explication physique des résultats obtenus n'a pas été justifier, d'autres travaux de recherche peuvent donner d'autres éclaircissement sur la qualité des résultats obtenus.

## Conclusion Générale

Dans la présente mémoire, une méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels est proposée pour la modélisation de la DBO<sub>5</sub> au niveau de la STEP de Batna. À la lumière des résultats obtenus on peut conclure ce qui suit :

- La modélisation de la DBO<sub>5</sub> des eaux usées à l'aide des modèles ANN permet d'obtenir les résultats suivants: des indices de performances de l'ordre de  $R \approx 0.814$ ,  $NSE \approx 0.659$ ,  $RMSE \approx 58.216$ , et  $MAE \approx 42.970$ , obtenus avec les modèles MLPNN au niveau de l'entrée de la STEP, par contre les valeurs obtenues par le modèle MLR étaient de l'ordre de  $R \approx 0.740$ ,  $NSE \approx 0.540$ ,  $RMSE \approx 67.63$ ,  $MAE \approx 49.503$ .
- Les résultats obtenus à la sortie de la STEP étaient très faibles que ce soit avec le MLPNN ou le MLR.
- Bien que la modélisation à base des modèles ANN présente à la fois des avantages et des limitations, elle peut être utile pour prédire la DBO<sub>5</sub> et surveiller la qualité de l'eau, cependant, il est important de comprendre les limitations de la méthode, et pourquoi elle n'a pas donné de bons résultats à la sortie de la STEP.
- Les limitations comprennent la complexité de la DBO<sub>5</sub> en tant que variable biochimique mesurable, la disponibilité limitée de données représentatives sur une longue période, la variabilité temporelle de la DBO<sub>5</sub>, et la difficulté d'interprétation des résultats des modèles de neurones artificiels et la sensibilité aux données aberrantes. Ces limitations soulignent la nécessité de prendre en compte ces facteurs lors de l'utilisation de modèles de neurones artificiels pour la modélisation de la DBO<sub>5</sub>.
- Cependant, malgré ces limitations, il existe des perspectives prometteuses pour améliorer la modélisation de la DBO<sub>5</sub>. Cela inclut l'amélioration des ensembles de données, l'intégration de variables supplémentaires, l'utilisation de modèles plus complexes tels que les réseaux de neurones profonds (Deep learning), l'application des techniques de traitement du signal, la validation continue et l'adaptation du modèle, ainsi que l'intégration de techniques d'apprentissage automatique avancées.

- En combinant ces perspectives avec une compréhension approfondie des limites de la modélisation de la DBO<sub>5</sub>, il est possible de développer des modèles ANN plus précis et plus fiables. Cela contribuera à une meilleure gestion de la qualité de l'eau et à des décisions plus éclairées en matière de traitement des eaux usées, permettant ainsi de préserver et de protéger nos ressources en eau.

## Références Bibliographiques

1. Alexandre O., Boutin C., Duchène P.H., Lagrange C., Lakel A., Liénard A., Orditz D. (1998). Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. Technique et documentation Lavoisier (FNDAEN22), Paris, France, 198p.
2. Atab S. (2011). Amélioration de la qualité microbiologie des eaux épurée par boue activé de la station d'épuration Haoud Berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local. Mémoire de magister en microbiologie appliqué. Université kasdi merbah-ouargla.152p.
3. Baumont S. (1998). Réutilisation des eaux usées épurée : Risque sanitaire et faisabilité en Ile de France. Observation régionale de santé d'Ile- de-France.169p.
4. Baumont S. (1999). Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France.176p.
5. Baumont S., Camard J.P., Lefranc A., Franconi A. (2004). Réutilisation des eaux usées: risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS. 220p.
6. Baumont S., Camaraj P., Lefranc A., Franconi A. (2005). Réutilisation des eaux épurées: risque sanitaire et faisabilité en ile de France institut d'aménagement et d'urbanisation de la région ile de France. 222p.
7. Bechac J-P. (1984). Traitement des eaux, Edition Eyrolles. 170p.
8. Behra P. (2013). Chimie et environnement: cours, études de cas et exercice corrigé. Edition : Dunod. Paris. 415p
9. Bordet J. (2007). L'eau dans son environnement rural. Edition: Johanet. Paris. 317p.
10. Briere F.G. (2000). Distribution et collecte des eaux. 2ème Montréal: Edition Presse International Polytechnique. 403p.
11. DEGREMONT. (2005). Mémento technique de l'eau.10<sup>ème</sup> édition Edition, Lavoisier, Paris.1718p
12. Dreyfus G., (2004). Réseaux de nuerons-Méthodologies et applications. Editions Eyrolles, 417P.
13. El Haite H. (2010). Traitement des eaux usées par les réservoirs opérationnels et réutilisation pour l'irrigation. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. 205p
14. Gaid A. (1984). Épuration biologique des eaux usées urbaines. 361p

15. Gaid A. (1993). Traitement des eaux usées urbaines. 250p
16. Gerard J.T., Berdell R.F., Christine L.C. (2003). Introduction à la Microbiologie. Cégep de Saint-Jérôme, Canada.
17. Ghenam A. (2012). Commande Compliant Intelligente d'un Bras Manipulateur Rigide pour des Applications de Chirurgie Médicale. Mémoire de magister à l'université de Batna. 150p
18. Google Earth (2022)
19. Grommaire-mertz M.C. (1999). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseaux d'assainissement unitaire, caractéristique et origines. Thèse de doctorat école nationale des ponts et des chaussées. 135p.
20. Grosclaude G. (1999). L'eau, usage et polluant tome 2, Edition INRA Paris, 210p.
21. Haykin S. (1994). Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, New York. 450 p.
22. Heddami S., Dechemi N. (2008). Modeling of optical coagulant dose using artificial neural network, application to water treatment plant of Boudouaou (Algeria). *European Journal of Scientific Research* Volume 20, Issue 3, Pages 652-663
23. Josep P. (2002). Station d'épuration: dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation. 1850 p.
24. Kohonen, T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological cybernetics*, 43(1), 59-69.
25. Koller E. (2009). Traitement des pollutions industrielles, Eau, Air, Déchets, Sols, Boues, 2<sup>ème</sup> édition, Dunod, 569p.
26. Ladjel F. (2006). Exploitation d'une station d'épuration à boue activée niveau 02. Centre de formation au métier de l'assainissement. CFMA- Boumerdes. 80p.
27. Lemita A. (2021). Méthodologie d'optimisation de la commande du procédé de traitement des eaux usées par boues activées basée sur les algorithmes évolutionnaires. Thèse de doctorat en science à l'université de Ferhat Abbas Setif-1. 200p.
28. Lévêque C. (1996). Écosystèmes aquatiques. Edition Hachette, Paris.159p.
29. Marcos, S., Roussel-Ragot, P., Personnaz, L., Nerrand, O., Dreyfus, G., & Vignat, C. (1993). Réseaux de neurones pour le filtrage non linéaire adaptatif. *Traitement du Signal*, 8, 409-422.
30. Monod J. (1989). Mémento technique de l'eau. Tome I, Degremont. 9<sup>ème</sup> édition.592p.

31. Nedjaoume S. (2016). Entraînement D'un Réseau De Neurones MLP Par La Méthode BFGS. Mémoire de Master de fin d'étude, Université Larbi Ben M'hidi/Oum El Bouaghi. 42p.
32. ONA. (2011). Office National de l'Assainissement, fiche technique de la station d'épuration STEP de la ville de Batna. 62p.
33. Ouali M.S. (2001). Cours de procédés biologiques et traitement des eaux. Institut de chimie industrielle, centre universitaire de Mostaganem. 162p.
34. Ouanouki B. (2014). Gestion de l'environnement : Traitement des eaux usées. Edition Pages Bleus. Algérie. 225p.
35. Ramade F. (2000). Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Edition Ediscience.690p.
36. Ramade F. (2005). Éléments d'écologie : écologie appliquée. 6e Edition Dunod, Paris.864p.
37. Rejasse S. (2009). Optimisation du fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées de 10 000 EH, Trélissac, Mémoire d'ingénieur de l'ENGEES, Promotion Indre. 190p.
38. Rejesk F. (2002). Analyse de l'eau (Aspects réglementaires et techniques). Edition Collection Biologie technique.360p.
39. Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L., (2005). The analysis of water: natural water, wastewater, seawater 8ème édition. Dunod. Paris .1383p.
40. Rodier. (2009). L'analyse de l'eau .9ème édition, Dunod, Paris.1511p.
41. Salghi R. (2001). Différentes filières de traitement des eaux, Université IZ Rabat. International, Paris. 251p.
42. Satin M., Bourdier R., Béchir S. (1999). Guide technique de l'assainissement, 3ème Edition le Moniteur référence technique. 251p.
43. Senouci M., Beghadi H.A. (2005). Réseaux de neurones, Edition office des publications universitaires.141p.
44. Tebutt T.H.Y. (1998). Principal water quality control. 6ème Edition. 441p.
45. Tessier L., (2003). Tessier, L. (2003). Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine: identification de signatures naturelles et anthropiques. Doctoral Dissertation, Ecole des Ponts Paris Tech.349p
46. Zaarour N., (2013). Modélisation d'un canal minier ultra large bande (UWB) en utilisant les réseaux de neurones artificiels RBF, Québec,

**Nom et prénom : Djareddir rayane**

**Nom et prénom : Djelamani sarra**

**Nom et prénom : Zouaia chaima**

**Nom et prénom : Guerries rayane**

**Nom et prénom : mouats rayene**

---

**Titre** : Modélisation des Variables Bio-Physico-Chimique des Eaux Usées Par les Réseaux de Neurones Artificielle: Une étude de cas.

**Résumé** :

La présente étude entre dans le cadre de la préparation de mémoire de fin d'étude (master II) en aménagement hydro-agricole. L'objectif était le développement d'un modèle mathématique à base de réseau de neurones artificiels (ANN) pour la modélisation de la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours (DBO<sub>5</sub>) au niveaux de la station d'épuration (STEP) des eaux usées de la ville de BATNA. Nous avons utilisés un perceptron multicouche (MLPNN) avec une comparaison avec le modèle à base de régression linéaire multiple (MLR). Nous avons utilisées une base de données journalières contenant les mesures de plusieurs variables à l'entrée et à la sortie de la STEP, à savoir : La température de l'eau (T<sub>w</sub>), le potentiel d'hydrogène (PH), la conductivité électrique (SC), le volume des eaux usées (Q), les matière en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours (DBO<sub>5</sub>). La base de données correspond à la période allant de 01 /03/2006 à 07/04/2009 avec au total 1134 données. Pour le développement des modèles nous avons divisé la base de données en deux parties : 70% pour l'apprentissage et 30% pour la validation des modèles. La structure des modèles était la modélisation de la DBO<sub>5</sub> comme variable à modéliser (OUTPUT) en utilisant T<sub>w</sub>, PH, SC, Q, MES, DCO comme (INPUT). Au total nous avons tester 12 combinaisons des input (MLPNN1 à MLPNN12) et (MLR1 à MLR12), pour la validation et la vérification de la capacité prédictive des modèles nous avons utilisé 4 indices de performance : Le coefficient de corrélation (R), nash sutcliffe (NSE), l'erreur absolue moyen (MAE) et la racine carrée de l'erreur moyen (RMSE). Nous avons obtenue de bon résultats avec les modèles MLPNN au niveau de l'entrée de la STEP avec des indices de l'ordre de R=0.814, NSE=0.659, RMSE=58.216, MAE=42.970, par contre les valeurs obtenue par le modèle MLR était de l'ordre de R =0.740, NSE=0.540, RMSE=67.63, MAE=49.503. Cependant les résultats obtenu à la sortie de la STEP était très faibles. La présente étude à montrer la possibilité d'utilisation des réseaux de neurones artificiels comme outils de modélisations et d'aide à la décision.

**Mots-Clés.** Modélisation, réseaux de neurones artificiels, MLPNN, ANN, STEP, DBO<sub>5</sub>, qualité des eaux usées, apprentissage, validation.

## ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى إعداد نموذج رياضي لحساب الطلب البيوكيميائي للأكسجين لمدة 5 أيام ( $DBO_5$ ) المقاس على مستوى محطة معالجة المياه القذرة لمدينة باتنة. قمنا باستعمال تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية من نوع بارسابترون متعدد الطبقات (MLPNN) مع مقارنة النتائج بالمنحدر الخطي المتعدد (MLR). قمنا بجمع ومراجعة قاعدة بيانات تحتوي على القياسات اليومية لنوعية المياه على مستوى مدخل (entré) ومخرج المحطة (sortie) وهذا حتى نتمكن من أخذ صورة واضحة على نوعية المياه الغير معالج والمعالج. بالنسبة لنوعية المياه استعملنا المتغيرات التالية: (i) درجة حرارة الماء (Tw)، (ii) درجة الحموضة (PH)، (iii) حجم الماء (Q)، (vi) المواد العالقة (MES)، (v) الناقلية الكهربائية (SC)، (vi) الطلب الكيميائي على الأكسجين (DCO)، الطلب البيوكيميائي على الأكسجين لمدة 5 أيام ( $DBO_5$ ) المتوفرة على مستوى محطة معالجة المياه القذرة والتي توافقت الفترة الممتدة من 2006/03/1 إلى 2009/04/7 والمقدرة ب 1134 معلومة يومية. لإعداد النماذج الرياضية قمنا بتقسيم المعطيات إلى قسمين: 70% من اجل تدريب وتطوير النموذج (Apprentissage) و30% الباقية من اجل التحقق من فعالية النتائج (Validation). الهدف هو حساب  $DBO_5$  بدلالة DCO، Tw، PH، Q، MES، SC وهذا اعتمادا على تجريب عدة تشكيلات لنوعية المياه وفي المجلد قارنا ما بين 12 نموذج رياضي (MLPNN1 à MLPNN12) (MLR1 à MLR12). من اجل تقييم النماذج الرياضية استعملنا 4 معاملات: معامل الارتباط الخطي (R)، معامل الناش سيتكوف (NSE)، متوسط الخطأ المطلق (MAE)، وجدر متوسط الخطأ المربع (RMSE). أثبتت النتائج المتحصل عليها فعاليتها على مستوى مدخل المحطة (entré) حيث كانت نماذج MLPNN احسن من نتائج MLR بمعاملات جيدة قدرت ب:  $NSE=0.540$  ;  $R=0.740$  مقارنة بالقيم  $MAE=42.970$  ;  $RMSE=58.216$  ;  $NSE=0.659$  ;  $R=0.814$  ;  $MAE=49.503$  ;  $RMSE=67.63$ . أما النتائج على مستوى مخرج المحطة فكانت ضعيفة جدا. أثبتت هذه الدراسة انه يمكن استعمال الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للنمذجة الرياضية والتي قد تساهم وتساعد بفعالية في اتخاذ القرار.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة الرياضية، الشبكات العصبية الاصطناعية، محطة معالجة المياه القذرة، الطلب البيوكيميائي للأكسجين، تدريب النموذج الرياضي، تقييم النموذج الرياضي.