

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة موالى الطاهر، سعيدة

Université MOULAY Tahar, Saïda



كلية العلوم

Faculté des Sciences de nature et de vie

قسم البيولوجيا

Département de science biologique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

En Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème

Étude bibliographique sur les différents procédés d'épuration des eaux usées en Algérie

Présenté par :

- M^{elle} : Khelidj hafida
- M^{elle} : Menaouri belkais djihad

Soutenu le 23/06/2025 devant le jury composé de :

M. Belgacem Habiba

M. Saidi Abdelmoumen

M Djebah Fatima Zohra

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Président

Encadrant

Examineur

Année universitaire 2024/2025

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة موالى الطاهر، سعيدة

Université MOULAY Tahar, Saïda



كلية العلوم

Faculté des Sciences de nature et de vie

قسم البيولوجيا

Département de science biologique

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

En Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Thème

Étude bibliographique sur les différents procédés d'épuration des eaux usées en Algérie

Présenté par :

- M^{elle} : Khelidj hafida
- M^{elle} : Menaouri belkais djihad

Soutenu le 23/06/2025 devant le jury composé de :

M. Belgacem Habiba

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Président

M. Saidi Abdelmoumen

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Encadrant

M Djebah Fatima Zohra

Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar

Examinateur

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté
d'entamer et de terminer ce mémoire

Nos remerciements les plus profonds et les plus chaleureux vont à **saidi
abdelmoumen** , notre encadrant, à qui nous devons une part essentielle de
la réussite de ce mémoire. Grâce à son accompagnement rigoureux, ses
conseils avisés, sa patience et son engagement constant, nous avons pu
avancer avec confiance et sérénité. Son soutien humain et scientifique a été
un véritable pilier tout au long de ce travail, et nous lui sommes infiniment
reconnaissants.

Nous tenons également à remercier l'ensemble de nos enseignants pour la
qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis, ainsi que pour leur
générosité, leur disponibilité et leur patience, malgré leurs responsabilités
académiques importantes.

Que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation
de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance et
de nos sincères remerciements

Dédicaces

Je dédie aux premières personnes dans le monde, les plus chères et les plus aimées, mes parents: source de vie, d'amour et d'affection

À ma seule sœur Hayet : pour leur soutien moral

Et **leurs enfants Nourhane et Rayan et Anas**

À mon frère Karim pour leur motivation, que j'aime plus fort, source de joie et bonheur

À Belkais, chère amie avant d'être binôme

À mon meilleur amie Kader qui me donner l'amour et le courage

Khelidj hafida

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma mère fatiha et mon père abdelkarim, Pour leur amour
inconditionnel et leur soutien constant.

A mes chers frères Ali et Nabil , a tout ma famille

Et a toutes mes amies, Pour les moments de joie et de partage qui ont rendu cette
expérience inoubliable surtout Wafaa, Amira, Fatna, Chefaa et Bouchra.

À Hafida, chère amie avant d'être binôme

A le plus cher à mon cœur qui ma accompagne et soutenu dans chaque étape de
mon chemin Abdelrazak

Et enfin, à tous ceux qui ont cru en moi, Cette réussite est aussi la vôtre.

Menaouri belkais djihad

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
STEP	Station de Traitement des Eaux Usées (ou Station d'Épuration)
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DBO5	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
MES	Matières en Suspension
PH	Potentiel Hydrogène (acidité/basicité de l'eau)
T°C	Température (en degré Celsius)
CH₄	Méthane
CO₂	Dioxyde de carbone
H₂S	Sulfure d'hydrogène
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (lit bactérien anaérobie ascendant)
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor (réacteur agité en continu)
BMP	Biochemical Méthane Potentiel (potentiel méthanogène)
SE	Station d'Épuration
RE	Rendement Épuratoire
BTP	Bâtiment et Travaux Publics (pour les infrastructures)
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Algérie)
MRE	Ministère des Ressources en Eau (Algérie)
ONEDD	Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
WWTP	Wastewater Treatment Plant (équivalent anglais de STEP)
TOC	Teneur en Carbone Organique Total

Liste des figures

Figure 1 Les procedes de traitement des eaux usée	19
Figure 2Ouvrage de dessablage_déshuilage combinés	20
Figure 3Décanteure statique à fond raclé	21
Figure 4Décanteur longitudinal à pont racleur	21
Figure 5Shéma d'une station d'épuration a boue activée	22
Figure 6Shéma de principe d'une filière de traitement par lits bactériens	23
Figure 7Configuration du procédé lit bactérien	23
Figure 8Cycle biologique d'une lagune	24
Figure 09Localisation de station par google earth	33
Figure10Vue globale de la station	33
Figure 11Unité de dégrillage	34
Figure 12Unité de dessablage et déshuillage	35
Figure 13Unité de relevage	36
Figure 14Bassin d'aération	35
Figure 15 Bassin de décantation	37
Figure 16Bassin de chloration	38
Figure 17Forme des boues de station	38
Figure 18Lits de sechage	39
Figure 19 Les étapes de la méthanisation	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des eaux d'après leurs PH (Redouane et <i>al.</i>,2009)	9
Tableau 02 : Technologies utilisées selon les régions (ONA, 2020)	37

Résumé

Cette étude bibliographique a pour objectif de dresser un état des lieux détaillé des procédés d'épuration des eaux usées en Algérie, en mettant en évidence à la fois les méthodes traditionnelles encore largement utilisées et les technologies émergentes introduites dans certaines régions. Dans un contexte national marqué par la raréfaction des ressources hydriques, l'urbanisation croissante et les enjeux de santé publique, le traitement des eaux usées constitue un défi stratégique majeur.

L'analyse porte d'abord sur les procédés conventionnels, tels que les systèmes de lagunage, les boues activées et les traitements physico-chimiques, qui représentent la base des installations dans de nombreuses stations d'épuration du pays. Elle s'intéresse ensuite aux techniques plus récentes, comme les systèmes membranaires (MBR), la phytoremédiation, et la digestion anaérobie, utilisées dans certaines stations pilotes pour améliorer l'efficacité du traitement et valoriser les sous-produits.

Une attention particulière est accordée à la valorisation des eaux traitées pour des usages non potables (irrigation, nettoyage urbain, recharge des nappes) ainsi qu'à la valorisation énergétique des boues, notamment via la production de biogaz. Ces pratiques s'inscrivent dans une logique de développement durable et de gestion circulaire des ressources.

En s'appuyant sur une revue critique de la littérature technique et institutionnelle, ce travail met en lumière les avancées réalisées dans le pays, tout en identifiant les contraintes persistantes telles que le manque de maintenance, l'absence de cadres réglementaires clairs pour la réutilisation, ou encore la faible implication des collectivités territoriales.

Enfin, l'étude formule des recommandations pour renforcer les capacités nationales en matière d'assainissement : développement de technologies adaptées au contexte local, modernisation des infrastructures existantes, renforcement de la formation technique, et élaboration de politiques publiques intégrées.

Mots clés : Procédés d'épuration, eaux usées, stations d'épuration, valorisation énergétique, développement durable.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة البيبليوغرافية إلى تقديم عرض مفصل لواقع تقنيات معالجة مياه الصرف الصحي في الجزائر، من خلال تسليط الضوء على كل من الطرق التقليدية التي لا تزال مستخدمة على نطاق واسع، والتقنيات الحديثة التي تم إدخالها في بعض المناطق. وتأتي هذه الدراسة في سياق وطني يتسم بندرة الموارد المائية، والتوسع العمراني المتزايد، وتحديات الصحة العامة، ما يجعل من معالجة المياه المستعملة تحدياً استراتيجياً أساسياً.

تناولت الدراسة في بدايتها الطرق التقليدية، مثل أنظمة التهوية الطبيعية *les boues activées*، والحماة المنشطة، والمعالجة الفيزيائية-الكيميائية، التي تُعد القاعدة الأساسية في العديد من محطات المعالجة عبر البلاد. ثم تطرقت إلى التقنيات الأحدث، كأنظمة الأغشية الحيوية (MBR)، والمعالجة النباتية *la phytoremédiation* والهضم اللاهوائي، والتي تم اعتمادها في بعض المحطات النموذجية بهدف تحسين فعالية المعالجة واستغلال المنتجات الثانوية.

كما أولت الدراسة اهتماماً خاصاً بعملية تثمين المياه المعالجة لأغراض غير صالحة للشرب مثل السقي، والتنظيف الحضري، وإعادة تغذية الموائد المائية، بالإضافة إلى تثمين الحماة عبر إنتاج الطاقة، خصوصاً من خلال توليد الغاز الحيوي *biogaz* وتدرج هذه الممارسات ضمن منطق التنمية المستدامة وتدبير الموارد بطريقة دائرية.

واستناداً إلى مراجعة نقدية للأدبيات التقنية والمؤسسية، تسلط الدراسة الضوء على التقدم المحرز في هذا المجال داخل البلاد، مع الإشارة إلى التحديات المستمرة مثل ضعف الصيانة، وغياب إطار تنظيمي واضح لإعادة الاستخدام، وضعف إشراك الجماعات المحلية.

وفي الختام، تقدم الدراسة مجموعة من التوصيات لتعزيز القدرات الوطنية في مجال الصرف الصحي، من بينها تطوير تقنيات مناسبة للسياق المحلي، وتحديث البنية التحتية الحالية، وتعزيز التكوين التقني، ووضع سياسات عمومية مندمجة.

الكلمات المفتاحية: تقنيات المعالجة، المياه المستعملة، محطات التصفية، تثمين الطاقة، التنمية المستدامة.

Abstract:

This bibliographic study aims to provide a detailed overview of wastewater treatment processes in Algeria, highlighting both the traditional methods still widely used and the emerging technologies introduced in certain regions. In a national context marked by water scarcity, increasing urbanization, and public health challenges, wastewater treatment represents a major strategic concern.

The analysis first focuses on conventional processes such as lagoon systems, activated sludge, and physico-chemical treatments, which form the foundation of many wastewater treatment plants across the country. It then explores more recent techniques, including membrane bioreactors (MBR), phytoremediation, and anaerobic digestion, which have been implemented in pilot stations to enhance treatment efficiency and recover valuable by-products.

Special attention is given to the reuse of treated wastewater for non-potable purposes (such as irrigation, urban cleaning, and aquifer recharge), as well as the energy recovery from sludge, particularly through biogas production. These practices align with the principles of sustainable development and circular resource management.

Based on a critical review of technical and institutional literature, this study highlights the progress made in Algeria while identifying ongoing challenges such as inadequate maintenance, the absence of clear regulatory frameworks for reuse, and the limited involvement of local authorities.

Finally, the study offers recommendations to strengthen national sanitation capacities: developing technologies adapted to local contexts, modernizing existing infrastructure, enhancing technical training, and formulating integrated public policies.

Keywords: Treatment processes, wastewater, treatment plants, energy recovery, sustainable development

Table des matières :	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
الملخص:	
Introduction	1
Chapitre I Généralités sur le traitement des eaux usées	
1. Définition des eaux usées	4
2. Les types d'eaux usées	4
3. Origine des eaux usées	5
4. Problèmes liés à la pollution des ressources hydriques en Algérie	6
5. Caractéristiques des eaux usées	8
H) Demande chimique en oxygène (DCO)	11
5.2 Paramètres Organoleptique :	11
b) Couleur et odeur :	12
5.3 Paramètres bactériologiques des eaux usées	12
a) Les germes totaux :	12
b) Coliformes totaux :	13
c) Coliformes fécaux :	13
d) Streptocoques fécaux :	13
6. Enjeux du traitement des eaux usées	13
7. Réglementation et cadre juridique en Algérie	14
7.1 Normes algériennes de rejet et de traitement des eaux usées	14
7.2. Textes réglementaires et cadres institutionnels	15
7.3 Institutions principales :	15
7.4. Comparaison avec les normes internationales	15
Chapitre II Les procédés d'épuration des eaux usées en Algérie	
1. Traitements physiques	18
1.1 Dégrillage et tamisage	18
1.2 Dessablage et déshuilage	19
1.2 Dessablage et déshuilage	19
1. 3 Décantation primaire	19
2. Traitements biologiques	21
2.1 Boues activées	21
2.2 Lits bactériens et bio filtres	21
2.3 Lagunage naturel	23
3. Traitements chimiques	23
3.2 Désinfection	24
4. Traitement et valorisation des boues	26
4.1 Épaississement et digestion anaérobie	26
4.2 Valorisation agricole et production d'énergie	26
4.3 Problèmes liés à la gestion des boues en Algérie	26
5. Conclusion	27
Chapitre III État des lieux des stations d'épuration en Algérie	
1-Presentation des infrastructures existantes	29

2-Repartition géographies des stations	29
3-Technologies utilisées selon les régions	30
4- Analyse de l'efficacité des procédés appliqués :	31
Études de cas de stations d'épuration en Algérie	31
5- Les 5 étapes du traitement des eaux usées :	33
1- Premièrement Traitement physique :	33
2-Traitement biologique :	35
□ Étape 5- Traitement des boues	37
5-Contraintes et défis du traitement des eaux usées en Algérie :	39
5.1 Contraintes techniques et technologiques :	39
5.2 Limites économiques et financières	39
5.3Sensibilisation et acceptabilité sociale de la réutilisation des eaux usées traitées	40
Chapitre IV Nouvelles approches et technologies émergentes	
1-Nouvelles approches et technologies émergentes	42
1-1-Systèmes membranaires (MBR)	42
1-2-Biotechnologies et bio-ingénierie	42
1-3-Bioremediation et solutions basées sur la nature	42
2-Réutilisation et valorisation des eaux usées traitées	43
2-1-Les principales voies de réutilisation	44
2-3- Réutilisation à titre d'eau potable	44
3-utilisations en irrigation des cultures vivrières et non vivrières	45
3-1- Réutilisation et recyclage industriels	46
3-2- Amélioration des ressources	46
4-la digestion anaérobie	47
4-1-La digestion anaérobie et la valorisation des boues d'épuration en Algérie : une approche durable pour la gestion des déchets	49
4-2-Valorisation énergétique des boues d'épuration : vers une gestion durable des déchets	50
4-3 Exploitation du potentiel énergétique des boues	50
4-4 Installation de digesteurs dans les stations d'épuration	50
4 –5 Utilisation des boues comme fertilisants	50
4-6 Élaboration d'un cadre réglementaire	51
4-7 Perspectives d'avenir	51
5-Production d'énergie à partir des boues (biogaz, compostage)	51
5-1-Définition de biométhanisation	51
5-2-Principe du biométhanisation	52
5-3-Les conditions optimales pour la digestion anaérobie	52
5-4-Les étapes de la biométhanisation	53
5-5-Equivalences énergétiques du biogaz	55
6-Recommandations pour améliorer le secteur de l'épuration des eaux usées en Algérie	55
Conclusion et	48
Recommandation	48
Conclusion et recommandation	57
Annex	64
et Bibliographie	64
Reference	61

Introduction

Général

Introduction

L'eau ne doit pas être considérée comme un simple produit commercial, mais comme un patrimoine universel à protéger et à valoriser **(Devaux, 1999)**. En Algérie, cette ressource est de plus en plus rare et peu renouvelable. Elle fait l'objet d'une exploitation concurrentielle entre les besoins domestiques, agricoles et industriels, qui se disputent une disponibilité limitée.

La question de l'épuration des eaux usées occupe une place centrale dans les politiques de gestion de l'eau, en raison de ses implications directes sur la santé publique, la protection de l'environnement et le développement durable. Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources en eau douce, les pays en développement comme l'Algérie sont confrontés à des défis croissants liés à la gestion des eaux usées, notamment en raison de l'urbanisation rapide, de l'industrialisation et de la pression démographique **(MRE, 2023)**.

En Algérie, la problématique du traitement des eaux usées s'impose avec acuité. Le rejet d'eaux usées non traitées dans les milieux naturels entraîne une dégradation progressive des écosystèmes aquatiques et constitue une menace pour les nappes phréatiques et les ressources hydriques de surface. Face à cette situation, l'État a mis en place, depuis les années 2000, un programme ambitieux de construction et de réhabilitation de stations d'épuration réparties à travers le territoire national. Ces stations recourent à une diversité de procédés, allant des méthodes classiques comme le lagunage naturel, aux technologies plus avancées telles que les boues activées, les filtres biologiques, les procédés à membranes, ou encore la digestion anaérobie **(Ladjel, 2014)**.

Cette étude bibliographique vise à dresser un état des lieux des différents procédés d'épuration des eaux usées utilisés en Algérie, en mettant en lumière leur principe de fonctionnement, leurs avantages, leurs limites et leur degré d'adaptation au contexte algérien. Il s'agit également de comprendre les enjeux liés à leur mise en œuvre, qu'ils soient techniques, économiques ou institutionnels, et d'identifier les

perspectives d'amélioration en matière de durabilité, de réutilisation des eaux traitées et de valorisation des sous-produits comme les boues.

Dans cette optique, le présent travail se structure autour de quatre axes principaux :

1. 1ère chapitre Généralités sur le traitement des eaux usées
2. 2ème chapitre Les procédés d'épuration des eaux usées en Algérie
3. 3ème chapitre État des lieux des stations d'épuration en Algérie
4. 4ème chapitre Nouvelles approches et technologies émergentes

Chapitre I

Généralités sur le traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées revêt une importance capitale pour la préservation de l'environnement et la santé publique. Ce chapitre explore les différentes catégories d'eaux usées, leurs caractéristiques spécifiques, ainsi que les enjeux environnementaux et sanitaires associés à leur gestion. Nous aborderons également le cadre réglementaire algérien en matière de traitement des eaux usées, en le comparant aux normes internationales, afin de mieux comprendre les défis et les solutions envisagées dans le contexte national.

1. Définition des eaux usées

Selon (**Rejsek,2002**), les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, désignent des eaux ayant été utilisées dans des activités humaines et contenant divers polluants, qu'ils soient solubles ou non. Généralement, elles résultent d'un mélange de substances polluantes d'origines variées, dissoutes ou dispersées dans l'eau, après son usage domestique ou industriel.

Le terme « eaux résiduaires » regroupe ainsi une diversité d'eaux ayant perdu leur état naturel en raison de la présence de polluants introduits lors de leur utilisation dans des secteurs tels que le domestique, l'industriel ou l'agricole.

2. Les types d'eaux usées

Les eaux usées se caractérisent par une composition hétérogène, contenant des matières organiques et minérales, pouvant être en suspension ou dissoutes, avec parfois des éléments toxiques. Avant d'être rejetées dans l'environnement ou réutilisées, elles nécessitent un traitement adapté afin de prévenir la pollution des autres ressources hydriques.

Ces eaux proviennent de diverses sources, telles que l'évacuation des sanitaires et l'utilisation des éviers. Afin de limiter leur impact environnemental, elles sont acheminées vers des stations d'épuration via un réseau d'assainissement. On distingue principalement quatre catégories d'eaux usées :

- **Eaux usées domestiques** : issues des sanitaires, cuisines, nettoyage des bâtiments et petites installations, elles sont généralement traitées en station d'épuration avant d'être rejetées.
- **Eaux de ruissellement** : provenant des précipitations, elles sont considérées comme des eaux usées lorsqu'elles sont collectées et évacuées via un système de drainage, parfois traité séparément.
- **Eaux usées agricoles** : générées par les exploitations agricoles et l'élevage, elles sont souvent chargées en matières organiques et polluants liés à l'activité agricole.
- **Eaux usées industrielles** : rejetées par les industries, elles proviennent de divers processus nécessitant l'utilisation de l'eau et contiennent une charge polluante spécifique.

3. Origine des eaux usées

Les eaux usées d'origine urbaine englobent les eaux ménagères (provenant du lavage corporel, des sols, des cuisines, etc.), ainsi que les eaux vannes contenant des matières organiques et minérales. Ces effluents peuvent être dilués par les eaux pluviales et les eaux de voirie, avant d'être collectés via le réseau d'égouts (**Rodier et al., 2009**)

3.1 Origine industrielle

Les eaux usées industrielles sont étroitement liées aux processus de production des entreprises. Bien que les industries consomment une grande quantité d'eau, seule une faible part est réellement absorbée, le reste étant rejeté sous forme d'effluents. Ces derniers peuvent contenir divers polluants, parmi lesquels (**Baumont et al., 2004**) :

- **Matières en suspension minérales** : issues du lavage du charbon, du tamisage des sables, de la fabrication d'engrais phosphatés, etc.
- **Matières en solution minérales** : provenant des usines de galvanisation et de décapage.
- **Substances organiques et graisses** : rejetées par les industries agroalimentaires et la fabrication de pâte à papier.
- **Hydrocarbures et produits chimiques** : présents dans les effluents des raffineries de pétrole et des industries pharmaceutiques.
- **Rejets toxiques** : incluant les déchets radioactifs non traités.

3.2 Origine domestique

Les eaux usées domestiques regroupent les effluents contenant des matières organiques et minérales sous forme dissoute ou en suspension. Elles se divisent en plusieurs catégories (**Rejsek, 2002**) :

- **Eaux de cuisine** : riches en matières organiques (glucides, lipides, protéines) et en résidus de détergents.
- **Eaux de buanderie** : contenant principalement des agents lessiviels.
- **Eaux de salle de bain** : chargées en substances grasses utilisées pour l'hygiène corporelle.
- **Eaux vannes** : issues des toilettes, elles sont particulièrement riches en matières organiques et en microorganismes.

3.3 Origine agricole

Les eaux usées agricoles sont contaminées par l'utilisation de substances chimiques dans le cadre de l'agriculture intensive. Parmi les principaux polluants (**FAO, 2011**), on retrouve :

- **Les fertilisants** : engrais minéraux et déjections animales.
- **Les produits phytosanitaires** : herbicides, fongicides, insecticides.

Ces polluants peuvent être introduits dans l'environnement soit directement (par épandage et traitements des zones aquatiques), soit indirectement (via le ruissellement et le lavage des équipements).

4. Problèmes liés à la pollution des ressources hydriques en Algérie

L'Algérie est confrontée à des défis majeurs en matière de gestion des ressources en eau, notamment en raison de la pollution croissante des nappes phréatiques et des cours d'eau. Cette pollution résulte de plusieurs facteurs, à la fois d'origine domestique, industrielle et agricole. (**Belmahi et Ilhem, 2024**)

4.1 Sources de pollution :

- **Rejets domestiques et industriels non traités** : Une grande partie des eaux usées issues des ménages et des industries est rejetée directement dans les cours d'eau et les nappes phréatiques sans subir un traitement approprié. Ces rejets contiennent des substances toxiques, des métaux lourds, des hydrocarbures et des résidus de produits chimiques, entraînant une contamination sévère de l'eau et mettant en danger la biodiversité aquatique. (Denideni et Maghnem, 2015)
- **Utilisation excessive de produits chimiques en agriculture** : L'agriculture intensive en Algérie repose sur l'usage massif de pesticides, d'herbicides et d'engrais chimiques. Ces substances, lorsqu'elles sont lessivées par les pluies, s'infiltrant dans le sol et atteignent les nappes phréatiques et les cours d'eau. Ce phénomène contribue à l'accumulation de nitrates et de phosphates dans l'eau, favorisant l'eutrophisation et la détérioration de la qualité des ressources hydrique (Touati et al., 2018).

4.2 Conséquences de la pollution des ressources en eau :

- **Dégradation de la qualité de l'eau** : La pollution entraîne une augmentation des concentrations en polluants chimiques et biologiques, rendant l'eau impropre à la consommation et à l'usage agricole. Cette contamination compromet l'accès à une eau potable sûre et augmente les coûts du traitement de l'eau destinée à la distribution publique. (Bakhou, et Aouggad, 2007)
- **Risque sanitaire élevé** : L'exposition à une eau contaminée peut provoquer de graves maladies infectieuses, en particulier dans les régions où l'accès aux infrastructures de traitement est limité. Les populations les plus vulnérables, notamment les enfants et les personnes âgées, sont particulièrement exposées aux risques des maladies à transmission hydrique (MTH) (Kherifi et Bekiri, 2017).
- **Impact économique négatif** : La pollution des ressources hydriques a un coût économique élevé pour l'Algérie. Elle entraîne des dépenses supplémentaires pour le traitement de l'eau potable et affecte des secteurs clés comme l'agriculture, la pêche et le tourisme. Par exemple, l'irrigation avec une eau polluée peut réduire la productivité des cultures et nuire à la qualité des produits agricoles. De même, la pollution des eaux côtières peut impacter l'attractivité touristique de certaines régions. (Djemaci, 2009).

Exemple concret :

Un exemple frappant de pollution des eaux souterraines en Algérie est celui de la plaine de la Mitidja, située près d'Alger. Cette zone agricole est confrontée à une contamination élevée en nitrates, principalement causée par l'usage excessif d'engrais chimiques et les rejets industriels. Cette pollution représente un danger pour les populations locales qui dépendent des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau potable. **(Bouزيد et Boudoukha, 2014).**

Par ailleurs, dans les régions côtières comme Oran, Alger et Jijel, la surexploitation des nappes phréatiques a provoqué une intrusion saline, rendant l'eau impropre à la consommation et affectant l'agriculture locale. Cette problématique accentue la raréfaction de l'eau douce et renforce la nécessité d'une gestion durable des ressources hydriques en Algérie. **(Chouari et Bouزيد, 2018)**

5. Caractéristiques des eaux usées**5.1 Paramètres physico-chimiques.**

L'évaluation des caractéristiques des eaux usées repose sur une série d'analyses effectuées en laboratoire, notamment au sein des stations d'épuration. Ces analyses permettent de déterminer divers paramètres influençant la qualité de l'eau et son impact sur l'environnement.

a) Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques analysés incluent notamment le pH, la conductivité électrique, la teneur en matières en suspension (MES), ainsi que des indicateurs clés de pollution organique comme la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO5). D'autres composés tels que les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-) et les phosphates (PO_4^{3-}) sont également évalués afin d'étudier l'impact des rejets d'eaux usées sur les écosystèmes aquatiques **(Molenaar et al, 2012).**

b) Potentiel hydrogène (pH)

Le **pH** représente la mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution en fonction de la concentration en ions hydrogène (**H⁺**). Cette valeur est obtenue à l'aide d'un pH-mètre et constitue un indicateur essentiel pour évaluer l'état chimique des eaux usées (Sawyer, et *al.*,2003).

Tableau 1 : Classification des eaux d'après leurs PH (Redouane et *al.*,2009)

PH < 5	Acidité forte (présence d'acide minéral ou organique dans les eaux naturelles)
PH = 7	Ph neutre
7 <PH< 8	Neutralité approche (majorité des eaux de la surface)
5,5 <PH<8	Majorité des eaux souterrains
PH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

c) Température (T)

La température joue un rôle fondamental dans la qualité des eaux usées, influençant directement la solubilité des gaz, notamment l'oxygène dissous. Une température élevée réduit la solubilité de l'oxygène, tout en favorisant l'autoépuration et en accélérant la vitesse de sédimentation. (Rodier et *al.*, 2009).

L'activité enzymatique, essentielle aux réactions biologiques, atteint un maximum entre **33 et 35°C**. Cependant, ces réactions consomment de l'oxygène et leur intensification peut entraîner une diminution critique de ce dernier. À l'inverse, une température inférieure à **5°C** ralentit considérablement les réactions chimiques et biologiques, pouvant les stopper totalement. Des températures excessivement élevées peuvent également provoquer la mortalité de certaines espèces aquatiques. (Chapman, 1996).

d) Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'une eau représente sa capacité à conduire le courant électrique, déterminée par la concentration en ions dissous. Elle est mesurée à l'aide de

deux électrodes métalliques en platine, immergées dans un volume d'eau défini. La conductivité est exprimée en Siemens par mètre (S/m), où $1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m}$. Ce paramètre est un bon indicateur du degré de minéralisation de l'eau et peut fournir des informations sur son origine et sa qualité. **(Metahri, 2012)**

E) Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) désignent l'ensemble des particules solides non dissoutes présentes dans l'eau. Leur quantification repose sur une méthode de centrifugation, où l'échantillon est soumis à une rotation à grande vitesse afin d'en séparer les éléments solides. **(Fromant, 2015)**

Après sédimentation, les particules sont récupérées, lavées à l'eau distillée, filtrées, puis séchées à 105°C avant d'être pesées. Le résidu sec obtenu correspond à la concentration en MES, exprimée en mg/L. **(Bouamama, 2018)**

F) Oxygène dissous (O_2)

L'oxygène dissous est un facteur clé dans les processus biologiques des écosystèmes aquatiques. Sa concentration dépend de paramètres physiques (température, pression), chimiques (activité enzymatique, réactions d'oxydation) et biologiques (photosynthèse, respiration des organismes vivants). **(Devillers et al., 2005)**

G) Demande biochimique en oxygène (DBO5)

La demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO5) représente la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes pour dégrader la matière organique biodégradable dans un échantillon d'eau. Elle est mesurée à l'aide d'un DBO-mètre, avec une incubation standardisée à 20°C en condition aérobie. **(Anonyme, 2024)**

Le suivi de la consommation d'oxygène est réalisé par le principe hydrostatique, où la baisse de niveau de mercure indique la quantité d'oxygène consommée. Ce paramètre est exprimé en $\text{mg O}_2/\text{L}$ et constitue un indicateur clé de la charge polluante organique d'une eau usée **(khelifi, 2019)**

H) Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité totale d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes les substances organiques et minérales présentes dans un échantillon d'eau, en utilisant un agent oxydant chimique puissant. Elle est généralement exprimée en mg O₂/L et permet d'évaluer la pollution globale d'un effluent. (Loubière et al.,2004).

I) Nitrites, nitrates et phosphates

Les nitrites (NO₂⁻), nitrates (NO₃⁻) et phosphates (PO₄³⁻) sont des composés azotés et phosphorés dont la concentration est mesurée par colorimétrie, à l'aide d'un spectrophotomètre. Ces substances sont souvent issues de déjections animales, d'engrais agricoles et de rejets industriels, et peuvent provoquer des phénomènes d'eutrophisation en cas d'accumulation excessive. (Loubière et al.,2004).

m) Rapport DCO/DBO5

Le rapport DCO/DBO5 est un indicateur clé de la biodégradabilité des effluents. Il permet de caractériser la fraction des matières oxydables pouvant être traitées biologiquement.

- Si DCO/DBO5 < 3, l'effluent est facilement biodégradable et adapté aux traitements biologiques.
- Si DCO/DBO5 > 3, cela indique une proportion élevée de matières réfractaires, nécessitant un traitement physico-chimique complémentaire.

5.2 Paramètres Organoleptique :

a) Turbidité

La turbidité reflète la présence de particules en suspension qui troublent l'eau. Elle est influencée par la présence de sédiments fins (argile, limon), de matières organiques, de particules inorganiques, ainsi que de bactéries et micro-algues dans les eaux eutrophisées. (Hadda, 2023)

Ce paramètre est crucial en écologie aquatique, car il peut être indicateur :

- D'une **érosion excessive** et d'un lessivage des sols,
- D'une **prolifération du plancton**,
- D'une **pollution organique ou chimique**, pouvant mener à une anoxie du milieu et affecter la respiration des organismes aquatiques.

b) Couleur et odeur :

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement (**Rejsek, 2002**).

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration (**Rejsek, 2002**).

5.3 Paramètres bactériologiques des eaux usées

Ils proviennent essentiellement des matières fécales qui contiennent majoritairement une flore anaérobie (10⁹-10¹⁰ bactéries /g fèces) détruite à l'air, et une flore aérobie – anaérobie facultative (10⁶ – 10⁷ bactéries / g fèces).

La présence de ces microorganismes dans les eaux usées et les boues résiduaires nécessite des règles sanitaires lors de leur traitement et de leur élimination. En particulier, lorsque le rejet se fait à proximité d'une zone conchylicole, d'une zone de baignade ou d'une prise d'eau potable, il est nécessaire d'effectuer une désinfection (**Rejsek, 2002**).

a) Les germes totaux :

Ce paramètre permet de mesurer les conditions sanitaires de la distribution et résiduel de désinfection, une concentration très importante en germes totaux peut entraîner des problèmes d'ordre organoleptique, par contre une faible valeur est le témoin de l'efficacité du traitement et de l'intégrité du système de distribution (**Lekhal, 2023**).

b) Coliformes totaux :

Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais se développent également dans les milieux naturels, les eaux traitées ne doivent pas contenir de coliformes, cependant l'absence de ces derniers ne signifie pas nécessairement, que l'eau ne présente pas un risque pathogène. (Lekhal, 2023).

c) Coliformes fécaux :

Ils sont capables de se développer à 44°C, et permettent d'estimer le risque épidémiologique dans l'eau et devrait en tout logique tenir compte de la présence plus ou moins important de germes pathogènes. La principale bactérie fécale est *Escherichia coli* (Lekhal, 2023).

d) Streptocoques fécaux :

Ce groupe n'est généralement pas considéré comme pathogène, tout fois leur recherche associée celle des coliformes fécaux consiste un bon indice de contamination fécale car les streptocoques étaient un meilleur témoin que les coliformes fécaux pour des pathologies infectieuses (Lekhal, 2023).

6. Enjeux du traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées est une nécessité absolue pour garantir la préservation des écosystèmes et assurer la santé publique. Il permet de réduire les effets négatifs des rejets polluants sur l'environnement et de limiter la propagation des maladies hydriques. (Ouezzani et Louhadj, 2023)

6.1 Impacts environnementaux :

- **Préservation des écosystèmes aquatiques :** Lorsque les eaux usées sont rejetées sans traitement préalable, elles contribuent au phénomène d'eutrophisation, caractérisé par une prolifération excessive d'algues dans les milieux aquatiques. Cette accumulation d'algues entraîne une diminution de l'oxygène dissous dans l'eau, compromettant la survie des espèces aquatiques, y compris les poissons et les organismes benthiques. De plus, cette eutrophisation peut générer des toxines

dangereuses pour les êtres vivants et perturber l'équilibre biologique des écosystèmes. (Youmatter.2025)

- **Protection des ressources en eau :** Les rejets d'eaux usées non traitées sont une source majeure de contamination des nappes phréatiques et des cours d'eau, exposant ainsi les populations à des risques de pollution de l'eau potable. Le traitement adéquat des eaux usées permet de réduire la charge polluante et de garantir une eau de meilleure qualité, essentielle pour l'approvisionnement domestique, l'irrigation agricole et d'autres usages industriels. (WHO.2017)

6.2 Impacts sanitaires :

- **Réduction des maladies hydriques :** Les eaux usées non épurées contiennent des micro-organismes pathogènes tels que des bactéries (*Vibrio cholerae*, *Salmonella typhi*), des virus (hépatite A, rotavirus) et des parasites (*Giardia*, *Cryptosporidium*). Ces agents infectieux sont à l'origine de maladies graves comme le choléra, la typhoïde, la dysenterie et les infections gastro-intestinales. Grâce aux procédés de traitement des eaux usées, ces pathogènes sont éliminés, réduisant ainsi considérablement les risques de transmission de maladies par l'eau contaminée. (Afssa, 2008).
- **Amélioration de la qualité de vie et du bien-être général :** La pollution des eaux usées affecte directement l'hygiène et les conditions de vie des populations. En l'absence de systèmes d'assainissement adéquats, les habitants sont exposés aux mauvaises odeurs, à la prolifération d'insectes vecteurs de maladies et à la contamination des sols. Le traitement efficace des eaux usées permet de limiter ces nuisances et d'assurer un cadre de vie plus sain, réduisant ainsi les coûts de santé publique liés aux maladies d'origine hydrique. (WHO, 2017).

7. Réglementation et cadre juridique en Algérie

7.1 Normes algériennes de rejet et de traitement des eaux usées

En Algérie, la gestion des eaux usées est encadrée par des normes spécifiques visant à protéger l'environnement et la santé publique. Ces normes définissent les critères de qualité des eaux usées épurées avant leur rejet dans le milieu naturel.

- **Décrets exécutifs :**
- Le **décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006** fixe les exigences relatives aux rejets des eaux usées domestiques et industrielles dans le milieu naturel. Il établit les valeurs limites pour divers paramètres tels que la demande biologique en oxygène (DBO5), la demande chimique en oxygène (DCO), les matières en suspension (MES), le pH, les métaux lourds, etc (**Jora, 2006**)
- Le **décret exécutif n°10-23 du 12 janvier 2010** modifie et complète le décret précédent en précisant davantage les normes de rejet et en introduisant des dispositions supplémentaires pour certains secteurs industriels. (**Jora, 2010**)

7.2. Textes réglementaires et cadres institutionnels

La gestion des ressources en eau en Algérie est régie par plusieurs textes législatifs et réglementaires, et encadrée par des institutions dédiées.

Loi sur l'eau :

- La **loi n°05-12 du 4 août 2005** relative à l'eau constitue le cadre juridique principal pour la gestion intégrée et durable des ressources en eau. Elle définit les principes généraux de la politique de l'eau, les droits et obligations des usagers, ainsi que les mécanismes de protection et de conservation des ressources hydriques.

7.3 Institutions principales :

- **Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) :** Chargée de l'inventaire, de l'évaluation et du suivi des ressources en eau.
- **Office National de l'Assainissement (ONA) :** Responsable de la gestion, de l'exploitation et de l'entretien des infrastructures d'assainissement.
- **Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) :** En charge de la réalisation et de la gestion des barrages et des transferts d'eau.
- **Agence Nationale De Gestion Intégrée Des Ressources En Eau (AGIRE) :**

7.4. Comparaison avec les normes internationales

- Les normes algériennes de rejet des eaux usées sont généralement alignées sur les

recommandations internationales, notamment celles de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

- Directives de l'OMS : **(OMS .2006)**.
- L'OMS a publié des directives pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères en agriculture et en aquaculture. Ces directives fournissent des recommandations sur les critères de qualité des eaux usées traitées, les méthodes de traitement appropriées et les mesures de protection sanitaire.

Normes de la FAO :

- La FAO a également établi des normes pour la qualité de l'eau utilisée en irrigation, y compris l'utilisation des eaux usées traitées. Ces normes prennent en compte les concentrations maximales admissibles de divers contaminants pour assurer la sécurité des cultures, des sols et des consommateurs. **(FAO. 1988)**

En conclusion, l'Algérie dispose d'un cadre réglementaire et institutionnel solide pour la gestion des eaux usées, conforme aux standards internationaux. Les normes de rejet et de traitement sont établies pour protéger l'environnement et la santé publique, tout en s'inspirant des directives de l'OMS et de la FAO.

La gestion efficace des eaux usées est essentielle pour préserver l'environnement et assurer la santé publique. Les différentes sources de pollution, qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles, nécessitent des approches de traitement spécifiques pour minimiser leur impact. En Algérie, le respect des normes réglementaires en matière de traitement des eaux usées est crucial pour protéger les ressources en eau et l'écosystème. Une comparaison avec les standards internationaux souligne l'importance d'une amélioration continue des infrastructures et des pratiques de gestion des eaux usées, afin de répondre aux défis environnementaux actuels et futurs.

Chapitre II

Les procédés d'épuration des eaux usées en Algérie

L'épuration des eaux usées en Algérie repose sur plusieurs procédés regroupés en trois grandes catégories : les traitements physiques, biologiques et chimiques. À cela s'ajoute la gestion et la valorisation des boues d'épuration, qui représentent un enjeu majeur pour l'environnement et l'économie circulaire. (Zoubiri, 2013)

1. Traitements physiques

1.1 Dégrillage et tamisage

Le dégrillage constitue la première étape du traitement des eaux usées brutes. Il permet de retenir les déchets volumineux, notamment les corps flottants et les gros débris comme les branchages et les pierres. Cette opération s'effectue à travers des grilles de différentes tailles de mailles (Zighem, 2018). On distingue plusieurs niveaux de dégrillage selon l'écartement des barreaux :

- **Pré-dégrillage** : espacement de 30 à 100 mm
- **Dégrillage moyen** : espacement de 10 à 25 mm
- **Dégrillage fin** : espacement de 3 à 10 mm

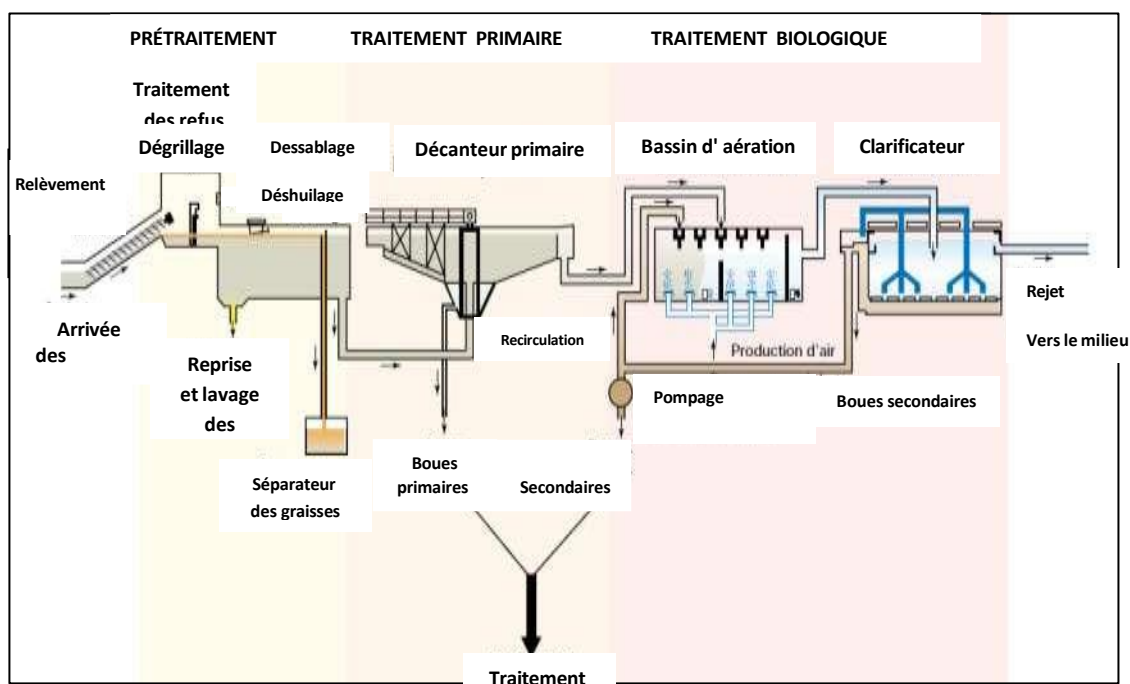


Figure.1 : Les procédés de traitement des eaux usées (Dahou, 2016)

1.2 Dessablage et déshuilage

1.2 Dessablage et déshuilage

Le dessablage vise à éliminer les particules denses ayant une vitesse de sédimentation inférieure à 0,3 m/s. Ces particules, principalement composées de sable, doivent être retirées pour éviter la corrosion des conduites et des pompes, ainsi que le colmatage des canalisations (Tchobanoglous et al., 2003).

Le dégraissage, quant à lui, consiste à éliminer les particules grasses non solubles, qui représentent environ 10 à 20 % des graisses présentes dans l'eau. Le déshuilage est un procédé complémentaire qui permet d'extraire les huiles des eaux résiduaires industrielles par écumage, qu'il soit manuel ou mécanique (Mampuya ,2020)

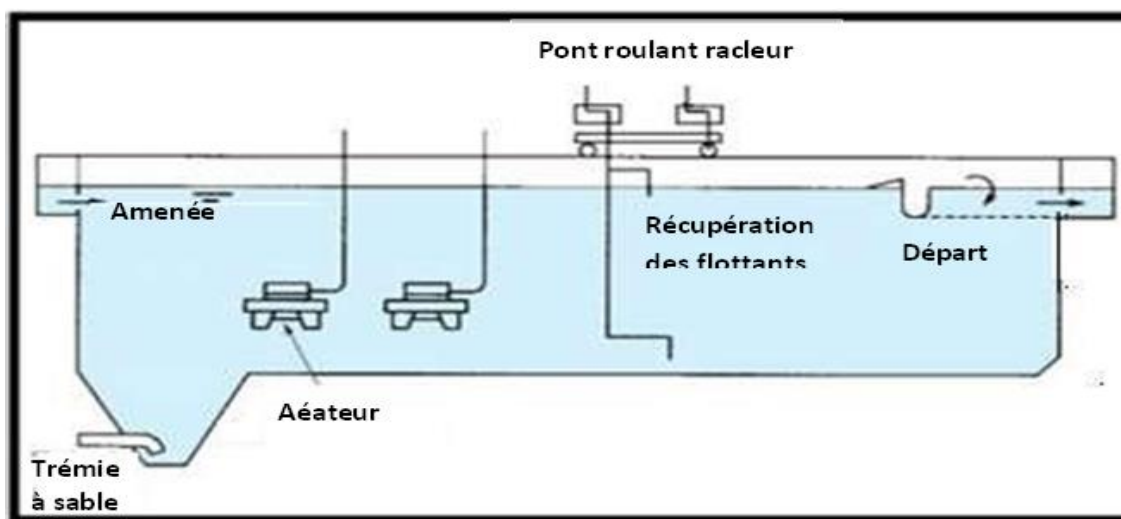


Figure 2 : Ouvrage de dessablage-déshuilage combinés (Gaïd, 1993).

1. 3 Décantation primaire

La décantation primaire repose sur la séparation des matières solides et liquides sous l'effet de la pesanteur. Ce procédé permet d'éliminer entre 50 et 60 % des matières en suspension et de réduire la demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO) d'environ 30 % (Tchobanoglous et al., 2003)

Les décanteurs utilisés sont généralement de deux types :

- **Décanteurs circulaires** avec un système de raclage des boues
- **Décanteurs longitudinaux** munis d'un pont racleur

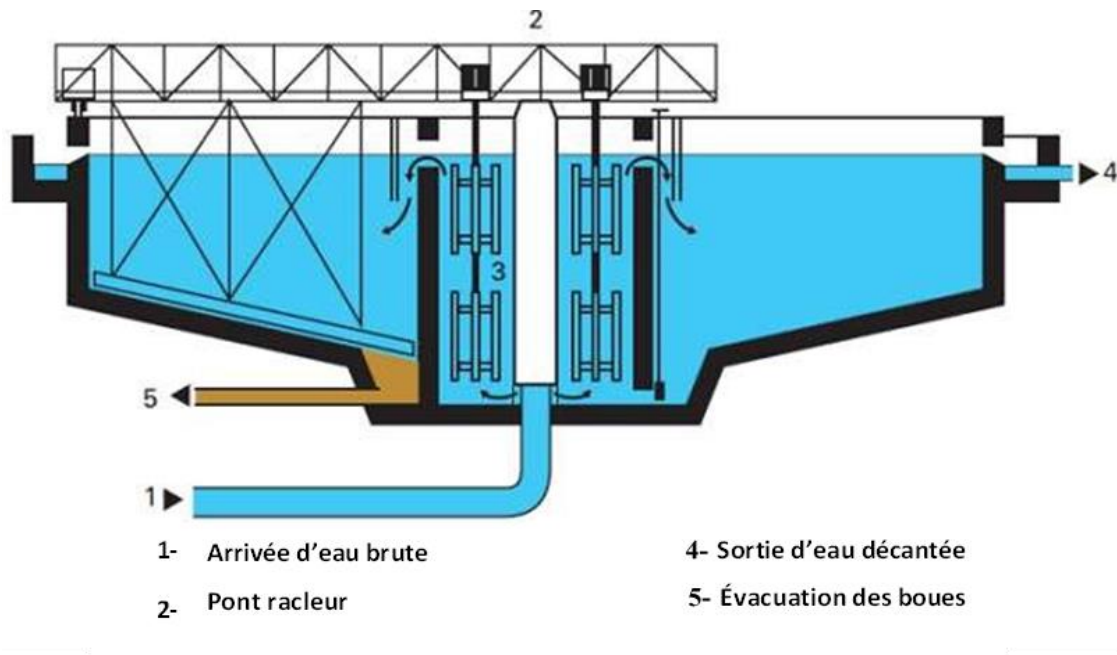


Figure 3 : Décanteur statique à fond raclé (Degrémont, 1989)

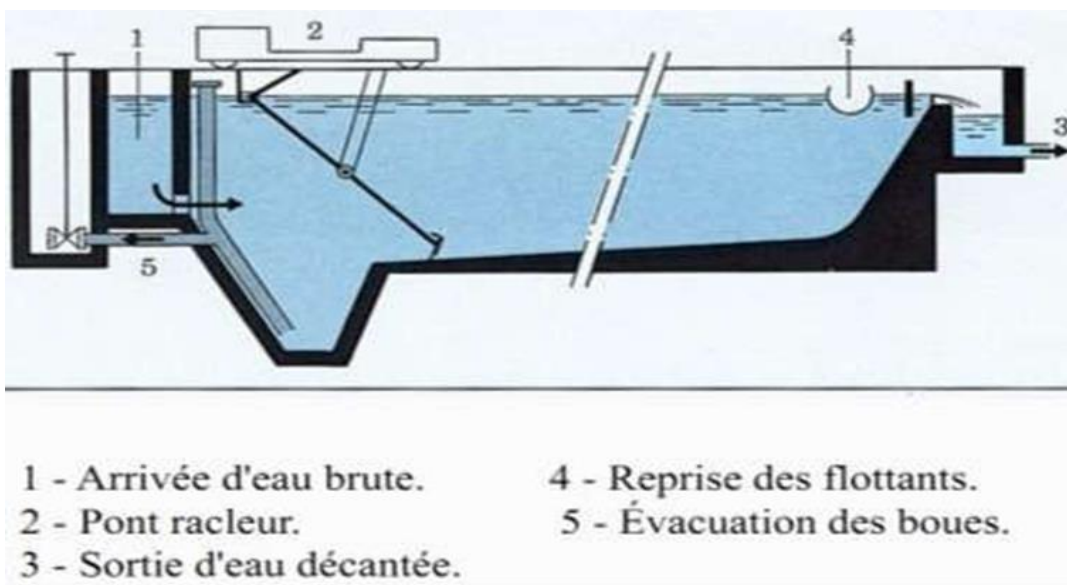


Figure 4 : Décanteur longitudinal à pont racleur (Degrémont, 1989)

2. Traitements biologiques

2.1 Boues activées

Le procédé des boues activées est le plus répandu parmi les traitements biologiques aérobiques. Il repose sur l'action de micro-organismes maintenus en suspension dans un bassin d'aération, où l'eau polluée est brassée et oxygénée (**Ben Djeddou, 2014**).

Ce procédé comporte deux phases principales : (**Berland et al., 2001**)

- 1) **Phase biologique** : la matière organique est mise en contact avec une culture bactérienne dans un bassin aéré, où une concentration suffisante en oxygène est maintenue.
- 2) **Phase physique** : séparation des eaux traitées et des micro-organismes dans un décanteur secondaire

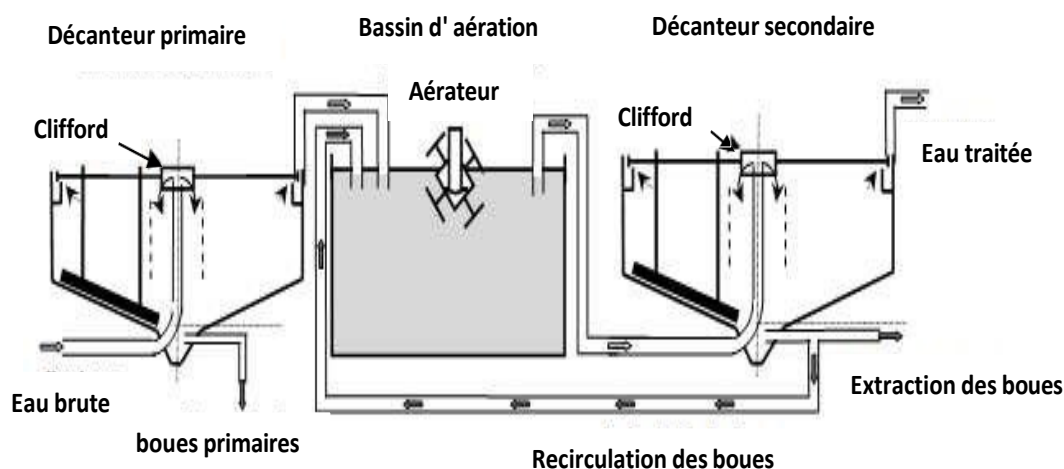


Figure 5 : Schéma d'une station d'épuration à boue activée (**Canler ,2004**)

2.2 Lits bactériens et bio filtres

Les lits bactériens sont des systèmes biologiques à culture fixée. Les eaux usées préalablement décantées ruissellent sur un matériau poreux (pouzzolane, coke, PVC, polystyrène, etc.), qui sert de support aux bactéries épuratrices. Leur rendement peut atteindre

80 % pour la DCO et dépasser 90 % pour des charges faibles, avec une réduction de 20 à 30 % de l'azote (Abdelfatah et al.,2022).

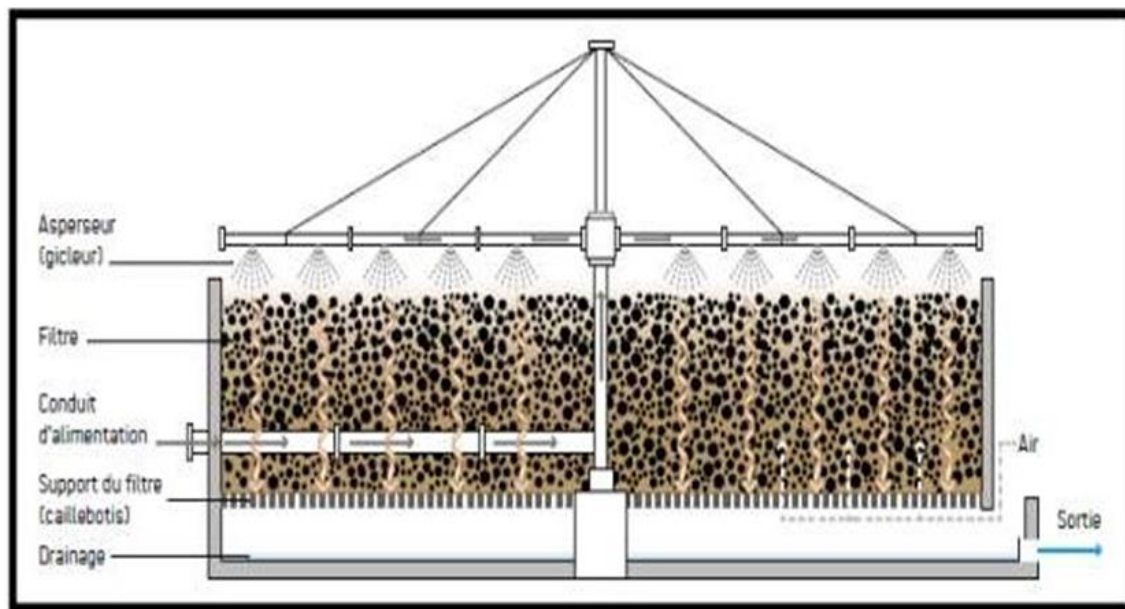


Figure 6 : Schéma de principe d'une filière de traitement par lits bactériens (Deng, 2018)

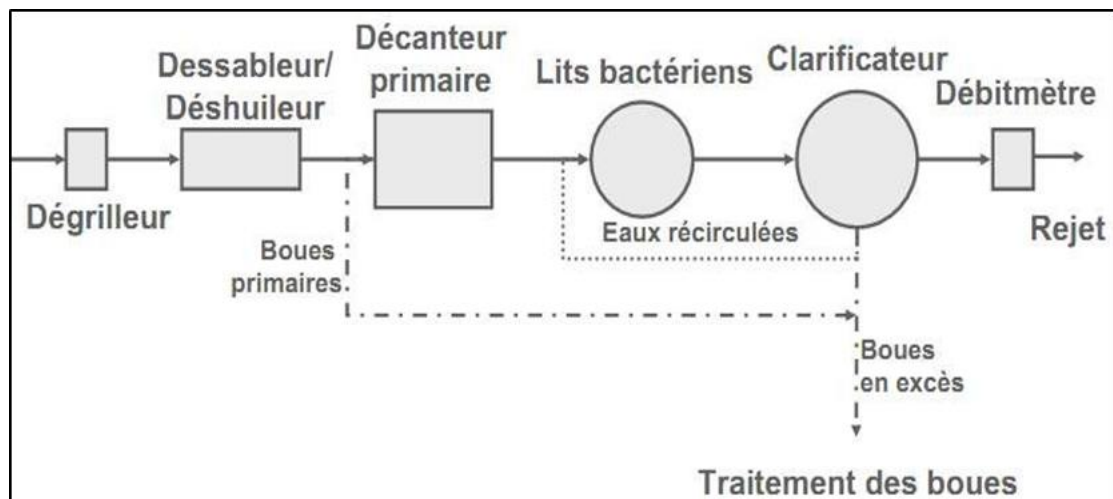


Figure 7 : Configuration du procédé lit bactérien (Iggui, 2020).

2.3 Lagunage naturel

Le lagunage est un procédé d'épuration basé sur l'autoépuration naturelle des eaux. Il existe deux types principaux :

- **Lagunage naturel**, reposant sur la photosynthèse pour fournir de l'oxygène aux bactéries aérobies qui dégradent la matière organique (**Berland, 2024**)
- **Lagunage aéré**, où l'oxygène est introduit mécaniquement par des aérateurs de surface ou par insufflation d'air (**Berland, 2024**)

Ces procédés sont particulièrement sensibles aux variations de température et sont moins adaptés aux climats froids. (**Diette et Vimont, 2007**)

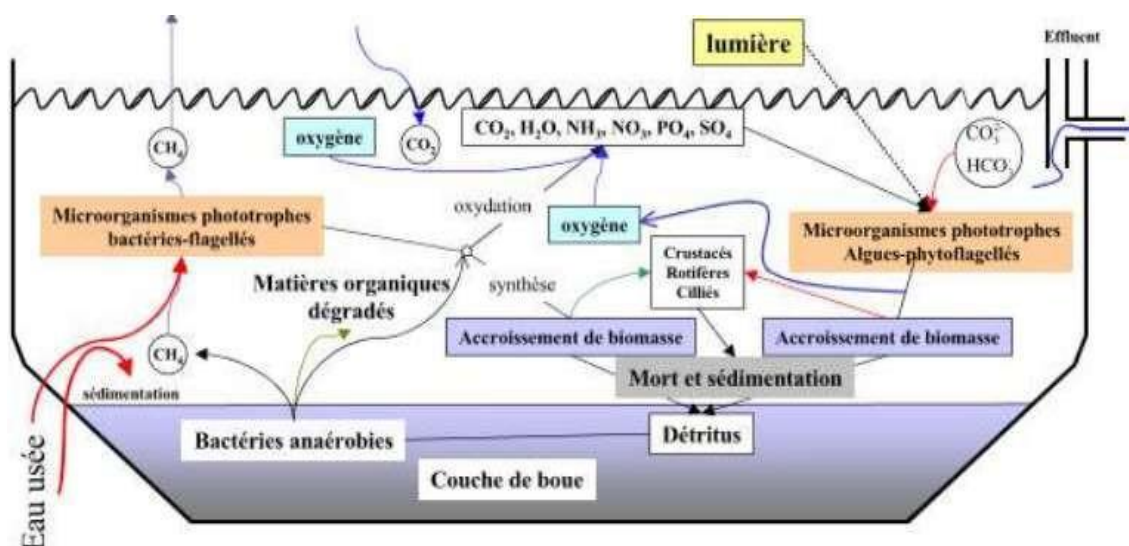


Figure 8 : Cycle biologique d'une lagune (**Dhaouadi, 2008**).

3. Traitements chimiques

Les traitements chimiques sont une étape essentielle dans l'épuration des eaux usées, notamment pour éliminer les polluants non dégradables biologiquement et pour assurer une désinfection efficace. En Algérie, ces procédés sont appliqués dans plusieurs stations d'épuration pour améliorer la qualité de l'eau avant son rejet ou sa réutilisation. (**Feki et Bourguiba, 2012**)

3.1 Coagulation-Floculation

La coagulation-floculation est un procédé visant à regrouper les particules en suspension dans l'eau afin de faciliter leur sédimentation ou leur filtration. **(Dihang, 2007)**

Principe :

- **Coagulation** : On ajoute un coagulant chimique (sels d'aluminium comme le sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou sels de fer comme le chlorure ferrique FeCl_3) qui neutralise les charges électriques des particules colloïdales en suspension, favorisant ainsi leur agglomération.
- **Floculation** : Un agent floculant (polymères organiques ou minéraux) est ajouté pour rassembler les particules coagulées en flocs plus gros, facilitant ainsi leur élimination par décantation ou filtration.

Application en Algérie :

- Ce procédé est largement utilisé dans les stations d'épuration algériennes, notamment pour le traitement des eaux usées industrielles riches en matières organiques et en métaux lourds.
- Il est également employé pour la clarification de l'eau destinée à la réutilisation agricole. **(Benyérou, 2020)**

3.2 Désinfection

La désinfection des eaux usées repose sur plusieurs **(Melccfp, 2023)** :

- **Chloration** : méthode la plus utilisée, consistant à ajouter du chlore sous forme gazeuse ou d'hypochlorite de sodium (eau de Javel).
- **Bioxyde de chlore (ClO_2)** : réactif très efficace, mais nécessitant une surveillance stricte.
- **Ozonation** : oxydant puissant agissant sur les bactéries et virus, mais coûteux à mettre en œuvre.

- **Rayonnement ultraviolet (UV)** : technique ne nécessitant aucun produit chimique, inactivant efficacement les microorganismes, y compris les pathogènes résistants au chlore comme *Cryptosporidium* et *Giardia* (Corentin Koninck, 2024).

3.3. Précipitation chimique du phosphore

Ce procédé vise à éliminer le phosphore des eaux usées, qui est un élément nutritif favorisant l'eutrophisation des milieux aquatiques (Deronzier et Choubert, 2004).

Principe :

- Ajout de sels métalliques comme le sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), le chlorure ferrique (FeCl_3) ou la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- Ces réactifs forment des précipités insolubles avec les phosphates présents dans l'eau (exemple : formation de phosphate d'aluminium AlPO_4 ou de phosphate de fer FePO_4).
- Les précipités sont ensuite éliminés par décantation et filtration.

Avantages :

- Méthode efficace pour réduire les concentrations de phosphore à des niveaux très bas.
- Compatible avec les autres procédés d'épuration (traitements biologiques et physiques).

Inconvénients :

- Génère des boues chimiques nécessitant un traitement ultérieur.
- Coût plus élevé en raison de l'achat des réactifs chimiques.

Application en Algérie : (Djahida et Meryem, 2020).

- Ce procédé est utilisé dans certaines stations de traitement pour lutter contre l'eutrophisation des barrages et plans d'eau en Algérie.
- Il est souvent combiné avec des traitements biologiques (ex. : boues activées) pour une meilleure performance d'élimination du phosphore.

4. Traitement et valorisation des boues

4.1 Épaississement et digestion anaérobie

L'épaississement permet de réduire le volume des boues d'un facteur allant de trois à six, diminuant ainsi les coûts de stockage et de transport. Il peut être réalisé par égouttage, flottation, centrifugation ou gravitation dans un concentrateur (**Tchobanoglous et al., 2014**).

L'épaississement statique se fait dans une cuve équipée d'un mécanisme de raclage lent, tandis que l'épaississement par flottation à l'air dissous est de plus en plus utilisé pour les boues activées, qui sont légères et volumineuses (**Guerin et Thomazeau, 1987 ; Gaid, 1984**)

4.2 Valorisation agricole et production d'énergie

Les boues issues du traitement des eaux peuvent être valorisées de deux manières principales (**Guerin et Thomazeau, 1987**)

- **Utilisation en agriculture** : après traitement, elles peuvent être employées comme amendement organique.
- **Production d'énergie** : par méthanisation, les boues sont transformées en biogaz exploitable.

4.3 Problèmes liés à la gestion des boues en Algérie

En Algérie, la gestion des boues d'épuration pose des défis en raison du manque d'infrastructures adaptées et des préoccupations environnementales liées à leur accumulation. Des solutions durables doivent être mises en place pour optimiser leur traitement et leur valorisation (**Belhadj, 2016**).

5. Conclusion

Le traitement des eaux usées en Algérie repose sur une combinaison de procédés physiques, biologiques et chimiques visant à éliminer efficacement les polluants et à protéger les ressources en eau. Les traitements physiques, tels que le dégrillage, le dessablage et la décantation primaire, permettent d'éliminer les matières solides et les particules en suspension. Les procédés biologiques, notamment les boues activées et les lits bactériens, favorisent la dégradation de la matière organique dissoute. Les traitements chimiques, comme la coagulation-floculation et la désinfection, assurent l'élimination des polluants résiduels et des agents pathogènes. La gestion et la valorisation des boues issues de ces procédés constituent également un enjeu majeur, avec des solutions telles que l'épaississement, la digestion anaérobie et l'utilisation agricole. Malgré les défis spécifiques liés aux conditions locales, l'Algérie s'efforce d'améliorer continuellement ses infrastructures et ses pratiques en matière d'épuration des eaux usées pour préserver l'environnement et la santé publique. **(Benkhaled et Boudjenouia, 2019).**

Chapitre III

État des lieux des stations d'épuration en Algérie

1-Presentation des infrastructures existantes

L'Algérie dispose actuellement de 211 stations d'épuration des eaux usées avec une capacité de production de 500 millions de m³/an, réparties sur l'ensemble du territoire national. Parmi celles-ci, 71 utilisent des procédés naturels. Les stations d'épuration en Algérie présentent des performances variables en fonction de leur conception, de leur maintenance et des charges polluantes reçues.

Ces stations sont stratégiquement implantées pour protéger les ressources en eau telles que les barrages, la mer, les oueds, les nappes phréatiques et les zones humides.

(Amel, 2023)

2-Repartition géographies des stations

Nord du pays (Wilayas côtières : Alger, Oran, Annaba, Skikda, Béjaïa, Tipaza)

- Dispose des infrastructures les plus modernes et performantes.
- Stations de grande capacité traitant plusieurs centaines de milliers de m³/jour **(APS, 2015)**
- Exemples: STEP de Baraki (Alger), STEP d'Oran, STEP de Béjaïa.

Algérie en quelques chiffres **(Boubekki et Boudjema ,2016).**

Hauts Plateaux (Sétif, Bordj Bou Arréridj, Batna, Tiaret)

- Présence de stations intermédiaires, souvent confrontées à des problèmes de maintenance.
- Exemples : STEP de Sétif et Tiaret.

Algérie en quelques chiffres **(Amellal, 2023)**

Sud algérien (Ghardaïa, Ouargla, Adrar, Tamanrasset)

- Faible nombre de stations d'épuration en raison de la rareté de l'eau et du faible niveau d'urbanisation.
- Traitement souvent limité à des lagunes naturelles ou des systèmes d'épuration rudimentaires

3-Technologies utilisées selon les régions

Les stations d'épuration algériennes utilisent diverses technologies de traitement des eaux, adaptées aux conditions climatiques et aux besoins spécifiques des populations. (ONA ,2020).

- **Traitement biologique classique (boues activées, filtres biologiques)**
 - ✓ Utilisé principalement dans les stations de grande et moyenne capacité (Alger, Oran).
 - ✓ Efficace pour l'élimination de la matière organique, mais nécessite une maintenance rigoureuse (Rodier et al., 2009).
- **Language naturel**
 - ✓ Système extensif utilisé en zones rurales et dans le Sud (Ghardaïa, Adrar) (Belkheiri, 2013).
 - ✓ Moins coûteux et adapté aux climats chauds, mais nécessite de vastes surfaces (Mara, 2004).
- **Réacteurs à biomasse fixée (MBR, MBBR)**
 - ✓ Technologie plus récente intégrée dans certaines stations modernes. (Tchobanoglous et al.,2003)

Présente dans la STEP de Béjaïa, offrant une épuration plus performante avec un encombrement réduit.

Tableau 02 : Technologies utilisées selon les régions (ONA, 2020)

Région	Technologie dominante	Avantages	Inconvénients
Nord (Alger, Oran)	Boues activées, MBR	Bonne performance épuratoire	Coût élevé, besoin en énergie
Hauts Plateaux (Sétif, Tiaret)	Filtres biologiques	Simple à exploiter	Moins efficace sur fortes charges

			organiques
Sud (Ghardaïa, Adrar)	Lagunage naturel	Faible coût, peu d'entretien	Nécessite beaucoup d'espace et du temps

4- Analyse de l'efficacité des procédés appliqués :

Études de cas de stations d'épuration en Algérie

Station D'épuration Unité de Saida

Les eaux usées de la ville de Saida sont dirigées vers un exutoire qui est la station d'épuration, située en aval de la ville. La station d'épuration est implantée dans la partie nord-ouest de la ville à proximité de l'oued Saida qui constitue le milieu récepteur des eaux épurées. L'épuration des eaux avant leur rejet dans le milieu naturel devient ainsi une nécessité, il faut protéger la nature, d'où la mise en service de la station d'épuration de Saida qui devra épurer ces eaux urbaines et industrielles. (ONA, 2025)

La station d'épuration est installée à côté de réseau de collecte d'assainissement, juste à l'extrémité de la sortie des eaux vers le milieu naturel. La station d'épuration est une installation qui sert à dépolluer l'eau usée pour éviter la destruction totale des écosystèmes aquatiques et naturels due aux effluents pollués. L'épuration est une technique qui consiste à éliminer les matières indésirables que l'eau véhicule en vue de son déversement dans le milieu naturel ou sa réutilisation dans des fonctions diverses les eaux usées de la station de Saida sont soumises aux procédés de boues activées. Le traitement des eaux usées fait référence aux différentes opérations réalisées afin de rendre une eau souillée (par l'Homme ou les activités industrielles) utilisable sans risque pour la santé. De nombreux systèmes de traitement ont depuis été développés pour réduire les déchets humains bruts. (ONA, 2025)



Figure 9 : Localisation de la station par google earth

- **Procédés d'épuration de la STEP Saida :**

La station d'épuration de la ville de Saida est implantée au niveau de la commune de Saida sur une superficie de 11.47 Hect est d'une capacité de 150 000 Eq/Hab., elle est conçue pour traiter chaque jour 30 000 m³ d'eaux usées par voie biologique. Le procédé d'épuration de la STEP est un procédé biologique basé sur le principe de boues activées, ou les matières organiques contenues dans les eaux usées sont dégradées par des bactéries mises dans des conditions favorables, qui les transforment en sels minéraux. (ONA, 2025)



Figure 10 : vue globale de la station STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

5- Les 5 étapes du traitement des eaux usées :

1- Premièrement Traitement physique :

Les dispositifs de prétraitement sont présents dans toutes les stations d'épuration quels que soit les procédés de mises en œuvre à l'aval. Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou particuliers les plus grossiers, susceptible de gêner les traitements ultérieurs ou d'endommager les équipements ; déchets volumineux (dégrillage) sable(dessablage), et corps gras (dégraissage, déshuilage) (DEME ,2017).

✓ Étape 1- Le dégrillage

Il consiste à faire passer les eaux usées à travers une grille dont les barreaux plus ou moins espacés, retiennent les éléments les plus grossiers, après nettoyage des grilles par les moyens mécaniques, manuels ou automatiques, les déchets sont évacués avec les ordures ménagères ; le tamisage qui utilise des grilles de plus faible espacement peut parfois compléter cette phase, le cas de la STEP de Saida (ONA, 2025)



Figure 11 : unité de dégrillage STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Dégrilleur grossier manuel : 01

Largeur : 1 .500mm

Longueur : 6 .000m

Dégrilleurs fin automatique :

Nombre de canaux de dégrillage fin : 0 2

Largeur de la grille : 1.000mm.

Nombre de barreaux : 33

✓ Étape 2- Dessablage –Déshuilage :

♣ Dessablage Réalisé par décantation, le dessablage vise à éliminer les sables et les graviers ; l'écoulement de l'eau à une vitesse réduite dans un bassin appelé dessaleur entraîne le dépôt au fond de l'ouvrage. Ces particules sont ensuite aspirées par une

pompe, les sables récupérés sont essorés, puis lavés avant être envoyés en décharge. (Bouguettaya et al.,2018).

♣ **Déshuilage** Les opérations dessablage déshuilage consiste à séparer de l'effluent brute, les huiles et les graisses par flottation. Ces derniers étant des produits de densité inférieure à l'eau ; l'injection des microbulles d'air permet d'accélérer la flottation des graisses souvent ces opérations sont combinées dans le même ouvrage. (Bouguettaya et al., 2018).



Figure 12 : unité de Dessablage et Déshuilage STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Largeur totale zone de dessablage-déshuilage : 4m

Largeur totale zone de dessablage : 3m

Largeur totale zone de déshuilage : 1m

Hauteur totale : 5m

Hauteur de l'eau : 4m

Longueur totale : 18m

Volume utile total : 242,9m³

✓ **Étape 2 Relevage**

04 pompes –immergées Sert à amener l'eau qui a subi le traitement physique au bassin pour le traitement biologique



Figure 13 : unité de relevage STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

2-Traitement biologique :

Le brassage de l'oxygénation est assuré par 12 aérateurs de surface à axe vertical

Le bassin biologique dispose d'une sonde pour mesurer le taux d'O₂, l'oxymètre a un intervalle pour Contrôler les aérateurs

Les eaux passent dans ce bassin contenant une multitude de bactéries qui forment des "boues activées" se nourrissant des pollutions dans un milieu aérobic grâce aux aérateurs avoisinant les un mètre de profondeurs et pour les bactéries au fond du bassin poursuivent le même traitement mais dans un milieu anaérobique et nettoyant ainsi les eaux (Metcalf et Eddy, 2014).



Figure 14 : Bassin d'aération STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Forme rectangulaire de :

Longueur : 66,0 m.

Largeur : 44,0 m.

Hauteur d'Eau : 4,5 m.

Profondeur totale : 5m

Hauteur Béton : 5,60 m.

Volume utile total : 26.136 m³.

Équipements des bassins.

Nombre de turbine : 12

Puissance des turbines installées : 75/55 KW

02 Oxymètres de mesure d'oxygène dissout.

✓ Étape 4- Clarification :

Les boues activées sont ensuite dirigées vers un second bassin où elles décantent. L'eau surnageant se clarifie petit à petit et, lorsqu'elle est totalement épurée, peut être rejetée dans l'oued. Les boues qui se sont déposées au fond du bassin sont, quant à elles, pompées et traitées ou recirculer vers le bassin biologique le traitement vise à éliminer les matières organiques des eaux usées avant la désinfection (ONA, 2025).



Figure 15 : Bassin de décantation STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Nombre : 02

Diamètre : 43 m.

Hauteur d'eau : 3 ,50 m.

3-Traitement chimique

La Chloration, désinfection



Figure 16 : bassin de chloration STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Le bassin de chloration est en béton armé

Longueur : 30m

Largeur : 12m

Hauteur utile : 3,5m

Hauteur totale : 4m

Volume : 1.260m

✓ Étape 5- Traitement des boues

Les boues en excès sont refoulées vers l'épaississeur, il s'agit d'un ouvrage de forme circulaire.



Figure 17 : forme des boues de station STEP de Saida (Photo : ONA, 2025)

Les dimensions de l'épaississeur sont :

Nombre : 01

Diamètre : 16 m.

Hauteur : 4 m.

Il s'agit de la première étape de traitement des boues, qui

La boue pour qu'elle soit ensuite pompée dans les lits de séchage, un liquide est extrait appelé lixiviat.

✓ **Étape 6 : Séchage des boues :**

Les boues épaissies sont ensuite extraites de l'épaississeur et acheminées vers le lit de séchage, Déshydratation des boues sur lits de séchage



Figure 18 : Lits de séchage STEP de Saida (photo : ONA, 2025)

Longueur : 30 m

Largeur : 15m

Nombre total des lits : 20

Surface totale à mettre en œuvre 9000 m²

Production annuelle des boues : plus de 83m³/an

Sert à la Réduction de la teneur en eau de la boue

5-Contraintes et défis du traitement des eaux usées en Algérie :

5.1 Contraintes techniques et technologiques :

- **Technologies de traitement limitées** : La majorité des stations d'épuration en Algérie utilisent des procédés de traitement secondaire, tels que les boues activées, qui ne permettent pas d'atteindre une qualité d'eau suffisante pour certaines réutilisations, notamment en agriculture. L'absence de traitements tertiaires, comme la désinfection avancée, limite les possibilités de réutilisation des eaux usées traitées en toute sécurité (**Boudhane et Ahmed , 2016**).
- **Vétusté et inefficacité des infrastructures** : De nombreuses stations d'épuration souffrent de problèmes de maintenance et d'une gestion inefficace, conduisant à des arrêts prolongés et à une performance réduite. Par exemple, il a été observé un arrêt total et prolongé de 50 stations de traitement et d'épuration des eaux usées, reflétant des lacunes en termes de maintenance et de gestion. (**MRE, 2021**).
- **Manque de formation technique** : Il existe un besoin accru de formation spécialisée pour le personnel opérant dans le domaine du traitement des eaux usées. L'absence de programmes de formation continue et de sensibilisation aux nouvelles technologies entrave l'adoption de solutions innovantes et efficaces. (**Benmansour, 2017**).

5.2 Limites économiques et financières

- **Investissements insuffisants** : Malgré les efforts consentis, les investissements dans le secteur de l'assainissement restent en deçà des besoins réels. Les ressources financières limitées entravent la modernisation des infrastructures et l'adoption de technologies avancées (**Boudhane et Ahmed,2016**).
- **Tarification inadéquate** : Les tarifs de l'eau et de l'assainissement ne reflètent pas toujours les coûts réels de traitement et de maintenance des infrastructures. Cette situation conduit à une dépendance accrue vis-à-vis des subventions publiques, compromettant la durabilité financière des services d'assainissement (**OCDE, 2022**).
- **Coûts opérationnels élevés** : Les technologies de traitement des eaux usées

nécessitent des dépenses opérationnelles significatives, notamment pour l'énergie, les produits chimiques et la maintenance. Ces coûts élevés limitent la capacité des opérateurs à assurer un service continu et efficace (**Metcalf et Eddy, 2014**).

5.3 Sensibilisation et acceptabilité sociale de la réutilisation des eaux usées traitées

- **Perception publique négative** : La réutilisation des eaux usées traitées est souvent perçue négativement par la population en raison de préoccupations sanitaires et culturelles. Cette réticence entrave l'adoption de pratiques de réutilisation, notamment dans le secteur agricole (**FAO ,2010**).
- **Manque de campagnes de sensibilisation** : Il existe un déficit en matière de communication et de sensibilisation du public sur les avantages et la sécurité de la réutilisation des eaux usées traitées. Des efforts accrus sont nécessaires pour informer et éduquer la population afin de favoriser une meilleure acceptation sociale.
- **Cadre réglementaire en évolution** : Bien que des avancées aient été réalisées, le cadre réglementaire encadrant la réutilisation des eaux usées traitées nécessite des clarifications et des renforcements pour assurer une mise en œuvre efficace et sécurisée des projets de réutilisation. (**ONU-Eau ,2020**).

Chapitre IV

Nouvelles approches et technologies émergentes

1-Nouvelles approches et technologies émergentes

1-1-Systèmes membranaires (MBR)

Les technologies membranaires, telles que les bioprocédés à membranes (MBR) et l'osmose inverse, représentent des avancées significatives dans le traitement des eaux usées. Les MBR combinent le traitement biologique et la filtration membranaire, offrant une qualité d'eau traitée élevée, adaptée à la réutilisation. L'osmose inverse permet l'élimination des sels et des micropolluants, essentielle dans les zones à stress hydrique élevé. En Algérie, ces technologies sont progressivement intégrées, notamment dans les projets industriels et urbains nécessitant une eau de haute qualité. **(Hebabaze, et al., 2016).**

1-2-Biotechnologies et bio-ingénierie

L'intégration de biotechnologies, telles que l'oxydation avancée (utilisant ozone, peroxyde d'hydrogène et lumière UV), améliore la dégradation des polluants récalcitrants dans les eaux usées. Ces méthodes offrent une purification plus efficace, réduisant les impacts environnementaux. Des initiatives en Algérie explorent ces technologies pour optimiser le traitement des eaux usées industrielles. **(Baadj, 2016).**

1-3-Bioremediation et solutions basées sur la nature

L'Algérie est classée dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques, au regard du seuil de rareté fixé par la banque mondiale à 1000 m³/hab./an. L'urbanisation croissante, l'industrialisation et la surpopulation, sont les principales causes de la dégradation de l'environnement et de la pollution. La situation de l'environnement s'empire de plus en plus à cause de la multiplicité des installations urbaines provisoires et très souvent inachevées et du manque de structures appropriées d'assainissement des eaux usées. Compte tenu des mauvaises performances des structures conventionnelles et de leur inadaptabilité aux contextes des pays en voies de développement **(Benabdallah et Mebarki, 2020).**

De nos jours, beaucoup d'intérêt a été attribué à la dépollution des eaux usées. Certes, il existe de nombreuses méthodes physico-chimiques et biologiques spécifiques de traitement, elles sont non seulement coûteuses et lourdes à mettre en œuvre, mais

elles provoquent également des impacts négatifs sur l'environnement. En revanche, le besoin de nouvelles techniques, économiquement compétitives et pouvant préserver les caractéristiques des écosystèmes s'est fait sentir. Ces techniques regroupées sous le terme générique de bioremédiation font appel ; soit à des microorganismes et aux produits de leur métabolisme, soit à des végétaux supérieurs et aux bactéries de leur rhizosphère (phytoremédiation), pour aboutir à la restauration des milieux pollués , Elles exploitent les capacités d'adaptation des systèmes racinaires aux fortes charges polluantes et aux conditions d'anoxie ou d'hypoxie du substrat, entraînant des relations symbiotiques entre les microorganismes et les racines qui favorisent l'élimination des polluants **(Gherib et al., 2016)**

Les techniques de phytoremédiation peuvent être utilisées en complément des procédés physico-chimiques et biologiques, elles présentent plusieurs avantages : fiabilités, faible coût et respect de l'environnement. Elles permettent ainsi de revégétaliser les sites pollués en améliorant en plus la qualité visuelle de l'espace aménagé. La phytoépuration utilise des plantes pour dépolluer les eaux usées, offrant une solution écologique et économique. Des recherches en Algérie ont démontré l'efficacité de certaines espèces locales dans l'absorption des contaminants, notamment les métaux lourds. Cette approche est particulièrement adaptée aux zones rurales et semi-urbaines. **(Gherib et al., 2016)**

2-Réutilisation et valorisation des eaux usées traitées

Le défi croissant que pose la gestion de l'eau et arriver à établir un équilibre entre la demande, l'utilisation de l'eau et le maintien de la qualité, que ce soit à l'échelle locale, régionale ou nationale n'est pas toujours facile. Cela est particulièrement difficile dans les régions arides et semi-arides des pays en voie de développement où l'eau est rare et où la population croît rapidement. Par conséquent, il y a des régions où les ressources en eau sont limitées, en particulier pendant les périodes de sécheresse et de demande élevée, et des régions où la consommation d'eau à des fins agricoles est très élevée (dans certaines régions, il s'agit de 70 % de la consommation totale). D'où l'intérêt que peut présenter la réutilisation de l'eau à l'échelle locale ou régionale. **(Bouzidi, 2020)**

La réutilisation de l'eau consiste en l'utilisation d'eau traitée à des fins utiles, notamment l'irrigation agricole et le refroidissement dans le secteur industriel. L'eau récupérée est un effluent traité pour obtenir une qualité conforme à un usage précis. La réutilisation directe fait référence à un système de réutilisation dans lequel l'eau récupérée est transportée jusqu'aux points où elle est réutilisée. La réutilisation indirecte concerne l'évacuation dans des eaux réceptrices (eaux de surface ou nappe souterraine) d'un effluent qui est ensuite assimilé puis prélevé en aval, ce qui ne correspond pas à une réutilisation directe planifiée de l'eau. (Bouzidi, 2020).

2-1-Les principales voies de réutilisation

La réutilisation des eaux usées épurées peut être réalisée de deux manières :

- **La réutilisation directe** : qui correspond à l'emploi immédiat des eaux usées, après épuration ; sans passage ni dilution de ces eaux dans le milieu naturel.

- **La réutilisation indirecte** : qui correspond à l'emploi des eaux usées épurées, après leur rejet et dilution dans le milieu naturel (cours d'eau, barrage, nappe d'eau souterraine...). (Moussouni, 2020)

En fonction des exigences de qualité des consommateurs, deux grandes classes de réutilisation peuvent être définies :

Les usages potables qui peuvent être directs, après un traitement poussé, ou indirects, après passage dans le milieu naturel,

Les usages non potables dans les secteurs agricoles (irrigation), industriel et urbain. (OMS, 2006)

2-3- Réutilisation à titre d'eau potable

La réutilisation directe à titre d'eau potable, soit l'acheminement direct d'une eau récupérée à un système d'approvisionnement en eau potable. Dans ce cas, l'eau ne revient jamais dans le milieu naturel ; les eaux Épurées sont directement acheminées de la station d'épuration à l'usine de traitement pour l'eau Potable (système « pipe to pipe »). L'unique exemple dans le monde de réutilisation directe se trouve en Afrique, à Windhoek, capitale de la Namibie. Cependant, ce mode de REUE sans passer par le traitement supplémentaire offert par le milieu naturel est déconseillé. Il doit être mis en œuvre uniquement quand aucune autre solution n'est possible. La réutilisation indirecte

à titre d'eau potable fait référence à l'augmentation des sources d'approvisionnement en eau potable à partir d'eaux récupérées hautement traitées.

La réutilisation est indirecte et non planifiée quand les eaux épurées sont rejetées dans un cours d'eau ou une réserve souterraine qui sert à l'alimentation d'une usine de traitement, sans que ce lien soit volontaire. Cette notion est à la limite de la définition d'une réutilisation. La réutilisation est indirecte et planifiée quand elle consiste à rejeter des effluents de station volontairement en amont d'une usine de traitement, au niveau du plan d'eau ou de la nappe qui sert d'ultime réservoir naturel avant le pompage et le traitement. La production d'eau potable est l'aboutissement le plus extrême de la réutilisation des eaux usées épurées. Elle a lieu essentiellement dans les zones arides ou semi-arides (ONEMA, 2012).

3-utilisations en irrigation des cultures vivrières et non vivrières

La plus répandue, permettant d'exploiter la matière fertilisante contenue dans ces eaux réalisant ainsi une économie d'engrais. Cette catégorie de réutilisation exige une qualité d'eau assez élevée et représente actuellement le plus haut degré de réutilisation pratiquée de façon courante. Entre autres exemples typiques d'utilisation non restreinte en milieu urbain à des fins agricoles ou récréatives, mentionnons (Bouzerzour, 2019) :

- **Utilisation en milieu urbain** : irrigation des parcs, terrains de jeu et cours de récréation ; protection contre les incendies ; fontaines et bassins ornementaux ; chasse d'eau de toilette et climatisation des édifices (Carennews, 2024).
- **Irrigation agricole des cultures vivrières destinées à la consommation humaine.** Les procédés de traitement usuels nécessaires comportent un traitement secondaire minimal suivi d'une filtration et d'une désinfection ; des limites strictes sont fixées en ce qui concerne la demande biochimique en oxygène (**DBO**) des effluents, leur turbidité, le total des coliformes et les coliformes fécaux, les résidus de désinfectant et le **pH**. (Bouguettaya et Hamdi, 2013)

3-1- Réutilisation et recyclage industriels

La réutilisation industrielle des eaux usées et le recyclage interne sont désormais une réalité technique et économique. Pour les pays industrialisés, l'eau recyclée fournit 85 % des besoins globaux en eau. Les centrales thermiques et nucléaires (eau de refroidissement) sont parmi les secteurs qui utilisent les eaux épurées en grande quantité. La qualité de l'eau réutilisée dépend de l'industrie ou de la production industrielle. Les applications sont nombreuses et on peut classer les secteurs où se pratique la réutilisation en fonction des différentes catégories d'activités industrielles : le secteur chimique et para chimique, le secteur agro-alimentaire, le secteur des industries mécaniques, métallurgiques. Le secteur industriel est celui qui utilise le plus d'eau. (Asano et *al.*, 2007).

La réutilisation des eaux usées des municipalités pour répondre aux besoins du secteur industriel a commencé dès les années 1940. L'utilisation des eaux usées récupérées aux fins des secteurs de la construction et de l'industrie, notamment le lavage des agrégats, la fabrication du béton, le nettoyage de l'équipement, l'alimentation des tours de refroidissement (à l'exclusion du refroidissement par évaporation), le nettoyage des cheminées, l'alimentation des chaudières et l'eau de fabrication (à l'exclusion de la transformation des aliments). Cependant, les exigences relatives à la qualité de l'eau tendent à être propres à l'industrie, puisque les changements de la composition chimique de l'eau peuvent modifier les procédés utilisés. Les préoccupations que pose la qualité de l'eau dans la réutilisation et le recyclage industriels touchent habituellement l'entartrage, la corrosion, la formation de bactéries, l'encrassement, la formation de mousse et les effets sur la santé des travailleurs que peut entraîner l'inhalation d'aérosols contenant des composés organiques volatils ou des agents pathogènes microbiologiques (Tchobanoglous et *al.*, 2014).

3-2- Amélioration des ressources

La principale motivation concernant la recharge de nappe est la dégradation de sa qualité environnementale et/ou la diminution de sa réserve en eau. Ce mode de réutilisation a lieu essentiellement dans des zones arides qui doivent faire face à des problèmes d'assèchement de Nappes, ou dans des zones côtières où les nappes sont envahies par l'eau de mer. Le dispositif de la recharge de nappe consiste à faire infiltrer

ou percoler les Eaux Usées Traitées dans le sous-sol dont les principaux objectifs sont : **(Nachi et Nedjadi, 2018).**

- La restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage et dont le rabattement est préjudiciable.
- La protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée
- Le stockage des eaux pour une utilisation différée.
- L'amélioration du niveau de traitement de l'eau en utilisant le pouvoir auto épurateur du sol. Les techniques de recharge reposent sur deux systèmes principaux de circulation de l'eau :
 - L'infiltration depuis la surface, dans des bassins ou des lits de cours d'eau.
 - L'injection profonde, par puits ou forages, où l'eau est introduite directement dans la nappe souterraine.

4-la digestion anaérobie

La digestion anaérobie est une technique de valorisation énergétique des boues d'épuration. L'état de l'art de cette technique témoigne des progrès significatifs réalisés dans la compréhension et l'application de cette technologie prometteuse. La digestion anaérobie, processus biologique de dégradation des matières organiques en l'absence d'oxygène, permet de transformer les boues d'épuration en biogaz riche en méthane, une source d'énergie renouvelable. Une des avancées majeures de la digestion anaérobie réside dans la caractérisation des boues d'épuration et leur adaptation aux conditions optimales pour le processus. Des études approfondies ont été menées pour comprendre la composition des boues, en termes de matières organiques, de nutriments et de contaminants. Cela a permis d'optimiser les paramètres de la digestion anaérobie tels que la température, **le pH**, la charge organique et la durée de rétention hydraulique, afin d'obtenir une production maximale de biogaz. De plus, des recherches ont été menées sur les différentes configurations de réacteurs utilisées pour la digestion anaérobie, notamment les réacteurs à voie liquide (continus ou discontinus), les réacteurs à voie sèche (lits fluidisés ou digesteurs en phases solide/liquide), ainsi que les systèmes hybrides combinant plusieurs types de réacteurs. Ces études ont permis de mieux

comprendre les performances de chaque configuration en termes d'efficacité de la digestion, de production de biogaz et de stabilité du processus **(Falipou et al., 2020)**.

Les avancées technologiques dans la surveillance et le contrôle des installations de digestion anaérobie ont également contribué à améliorer l'efficacité et la fiabilité de processus. L'utilisation de capteurs avancés, de systèmes de surveillance en ligne et de modèles prédictifs permet de surveiller en temps réel les paramètres clés de la digestion et les indicateurs de stabilité du processus. Cela permet une gestion proactive des installations et une optimisation des performances. Par ailleurs, la valorisation des produits dérivés de la digestion anaérobie a également fait l'objet de nombreuses recherches. Le biogaz produit peut-être utiliser pour la production d'électricité, de chaleur ou comme carburant pour les véhicules. De plus, la digestion anaérobie permet de produire un digestat, un résidu riche en éléments nutritifs, qui peut être utilisé comme fertilisant agricole ou comme amendement organique pour améliorer la qualité des sols **(Appels et al., 2011 ; Kumar et Samadder, 2017)**.

Il convient de souligner que malgré les nombreux avantages de la digestion anaérobie, des défis persistent. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité énergétique du processus, réduire les coûts de mise en œuvre, optimiser la gestion des sous-produits (comme les digestats) et minimiser les risques environnementaux potentiels, tels que les émissions de gaz à effet de serre et les polluants associés. De plus, des efforts sont déployés pour optimiser la gestion des résidus solides issus de la digestion anaérobie, tels que les déchets inertes ou les sous-produits non valorisables. En termes de recherche et développement, des études sont en cours pour explorer de nouvelles approches et technologies afin d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de la digestion anaérobie. Parmi ces avancées, on compte l'utilisation de prétraitements pour augmenter la biodégradabilité des boues, l'intégration de réacteurs à haute performance et de technologies de récupération de chaleur pour maximiser la production d'énergie, ainsi que l'exploration de substrats alternatifs pouvant être codigérés avec les boues d'épuration **(Zhang et Angelidaki, 2016 ; Mata-Alvarez et al., 2014)**.

Enfin, des efforts de normalisation et de réglementation sont en cours pour encadrer et promouvoir la digestion anaérobie en tant que solution durable de valorisation énergétique des boues d'épuration. Des normes et des directives sont élaborées pour garantir la qualité du biogaz produit, la sécurité des installations et la

conformité environnementale. Ces initiatives visent à encourager l'adoption de la digestion anaérobie à plus grande échelle, tant dans le secteur municipal que dans l'industrie (Sakar et Dincer, 2017).

4-1-La digestion anaérobie et la valorisation des boues d'épuration en Algérie : une approche durable pour la gestion des déchets

En Algérie, la digestion anaérobie est encore en phase émergente, mais elle commence à être explorée et mise en œuvre pour le traitement des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable. Certaines stations d'épuration utilisent déjà cette technologie pour la réduction des boues d'épuration et la production de biogaz (Bouzid et al., 2021 ; Khelifi et al., 2023).

Comme exemple, la station d'épuration de Baraki utilise la digestion anaérobie pour traiter les boues et produire du biogaz, lequel est partiellement réutilisé pour alimenter la station elle-même (Benali et al., 2022 ; MENV, 2023)

En parallèle, quelques projets pilotes ont été réalisés dans le domaine de la valorisation énergétique des déchets agricoles et des résidus agro-industriels, visant à produire du biogaz (Amara et al., 2023 ; FAO, 2022).

Cependant, le développement de cette filière reste confronté à plusieurs défis :

- Manque de sensibilisation du public et des décideurs ;
- Contraintes financières pour la mise en place des infrastructures ;
- Insuffisance de l'expertise technique locale.

Malgré ces obstacles, le potentiel de la digestion anaérobie en Algérie est considérable, grâce à la disponibilité importante de déchets organiques issus de l'agriculture, de l'industrie agroalimentaire et des stations d'épuration (Benali et al., 2022).

4-2-Valorisation énergétique des boues d'épuration : vers une gestion durable des déchets

L'Algérie s'oriente progressivement vers une approche durable de la gestion des déchets, en exploitant le potentiel énergétique et agronomique des boues d'épuration. Cette stratégie vise à produire de l'énergie tout en réutilisant ces sous-produits dans l'agriculture (**Belgacem et Chalabia,2023**).

Les principaux axes de cette valorisation sont les suivants :

4-3 Exploitation du potentiel énergétique des boues

L'Algérie s'est engagée à utiliser les boues générées par les stations d'épuration pour produire du biogaz, principalement composé de méthane. L'Office National de l'Assainissement (**ONA**) a lancé plusieurs initiatives pour produire de la chaleur et de l'électricité à partir de ce biogaz (**Ladjel , 2014**).

4-4 Installation de digesteurs dans les stations d'épuration

Les premières installations ont été mises en place dans les stations de Baraki (Alger) et de Batna, avec la production effective de biogaz. Toutefois, une extension de cette technologie est nécessaire dans d'autres stations, conformément aux résultats d'une étude menée en partenariat avec l'Union européenne.

4 –5 Utilisation des boues comme fertilisants

En complément de la production d'énergie, les boues sont également valorisées en tant qu'engrais. À Tizi Ouzou, l'ONA a déjà commencé à distribuer ces fertilisants aux agriculteurs, avec pour objectif d'étendre cette pratique à d'autres régions (**Ladjel , 2014**).

4-6 Élaboration d'un cadre réglementaire

Une procédure a été engagée auprès de l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR) pour la mise en place d'un cadre réglementaire relatif au recyclage agricole des boues, garantissant leur sécurité et leur efficacité. (Belgacem et Chalabia , 2023).

4-7 Perspectives d'avenir

La construction prévue d'environ 60 nouvelles stations d'épuration dans les prochaines années permettra d'augmenter le volume de boues disponibles pour la valorisation, ouvrant ainsi la voie à une approche circulaire de la gestion des déchets (MER, 2023).

La digestion anaérobie et la valorisation des boues d'épuration représentent une voie prometteuse pour l'Algérie, tant du point de vue environnemental qu'économique. En surmontant les obstacles techniques et institutionnels actuels, le pays peut consolider son engagement vers un développement durable, tout en optimisant la gestion de ses ressources en eau et en énergie (AND,2024).

5-Production d'énergie à partir des boues (biogaz, compostage)

5-1-Définition de biométhanisation

La biométhanisation consiste en une série d'opérations de dégradations biologiques des matières organiques qui se produisent en l'absence d'oxygène. Les produits résultants de la dégradation dégradations biologiques, peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat. La biométhanisation est définie comme la transformation, par la fermentation microbienne, des substances organiques en un gaz combustible appelé biogaz et un résidu solide, plus ou moins appauvri en matières organiques (Moletta, 2008). Définit la fermentation comme un processus bioénergétique qui n'implique pas une chaîne respiratoire ayant l'oxygène, le dioxyde de soufre et le nitrate comme accepteur final d'équivalents réducteurs (protons + électrons). (MER ,2023). La fermentation avait d'ailleurs été définie par Louis Pasteur, depuis 1860, comme une vie sans air, une vie en anaérobiose (Pasteur, 1860).

La composition de ce gaz est la suivante (% en volume) :

- CH₄ (méthane) : 50 à 80%
- CO₂ (dioxyde de carbone) : 20 à 45%
- H₂S (hydrogène sulfuré) : 0 à 1.5%
- NH₃ (ammoniac) : 0 à 0.05%
- H₂O (vapeur d'eau) : 13.3 à 16.4 % [en saturation]
- H₂ (hydrogène) : 0.002 à 0.05%
- CO (oxyde de carbone) : 5 à 29%
- N₂ (nitrogène) : 0.41 à 5.63% (**Ademe, 2020**).

5-2-Principe du biométhanisation

C'est la dégradation de matières organique en l'absence d'oxygène (digestion anaérobie) et à l'abri de la lumière par l'action combinée de plusieurs communautés de microorganismes (**Dennamia et al.,2007**).

5-3-Les conditions optimales pour la digestion anaérobie

La production de biogaz nécessite des conditions particulières de la température, de potentiel d'oxydo-réduction, de **pH**, d'absence d'inhibiteurs, de concentration en ammoniac (**NH₃**). L'anaérobie est une condition impérative au développement de la flore méthanogène. Le potentiel d'oxydo-réduction du milieu doit être de l'ordre de -300 mV. Le pH optimal se situe autour de 7. Si le pouvoir tampon du milieu en fermentation est insuffisant, il peut résulter une acidification du milieu par accumulation d'acides gras volatils. Cette acidification bloque la production de méthane. L'absence d'inhibiteurs de fermentation est bien entendu de rigueur. L'utilisation massive d'antibiotique ou de certains oligo-éléments dans l'alimentation animale inhibe la synthèse du biogaz. L'excès de sels conduisant à une conductivité élevée ou la présence de certains métaux lourds toxiques (cadmium, mercure...) causent également des dysfonctionnements dans le processus de biométhanisation. Facteur de stimulation biochimique à faible concentration, l'azote ammoniacal devient inhibiteur de méthanogenèse au-delà de 3g/l. toutefois, il semble que ce soit la forme non ionisée qui soit toxique. Certaines expériences mettent en évidence une adaptation des micro- organismes jusqu'à 5 g/l d'azote ammoniacal (**Moletta, 2005 ; Gerardi, 2003**).

Le rapport C/V ne doit jamais être supérieur à 35 avec un optimum de 30. Au-dessous, la production de gaz sera plus lente (**Dennamia et al., 2007**).

5-4-Les étapes de la biométhanisation

La biométhanisation se réalise en absence d'oxygène, ce qui permet de stabiliser les matières organiques en les transformant le plus complètement possible en méthane et en dioxyde de carbone. C'est le résultat d'une activité microbienne complexe qui se divise en quatre étapes principales :

- **L'hydrolyse** : Lors de l'hydrolyse, les macromolécules organiques sont transformées en produits plus petits. Us simples ; le déchet solide est ainsi liquéfié et hydrolysé en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation, on parle de « solubilisation » des matières organiques : par exemple, la cellulose est transformée en sucres solubles les que le glucose ou la cellobiose (**Moletta, 2005**).
- **L'acidogènes** : elle transforme les molécules simples par l'action des bactéries en acides de faibles poids moléculaire, tel l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate...) ; parallèlement, sont produits des alcools de faibles poids moléculaires, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire (H_2) (**Deublein et Steinhauser, 2008**).
- **L'acétogénèse** : tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autre que l'acétate (CH_3COO^-) le bicarbonate (HCO_3^-) et l'hydrogène moléculaire (H_2) nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices cétoènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, et d'hydrogène sulfuré (H_2S) (**Gerardi, 2003**).
- **La méthanogènes** : c'est la phase, au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate (CH_3COO^-) en méthane (CH_4) et en bicarbonate (HCO_3^-). Les secondes, hydrogénotrophiques, réduisent le bicarbonate (HCO_3^-) en méthane (CH_4) (**Angelidaki et Ahring, 1994**).

LES 4 ÉTAPES DE LA MÉTHANISATION

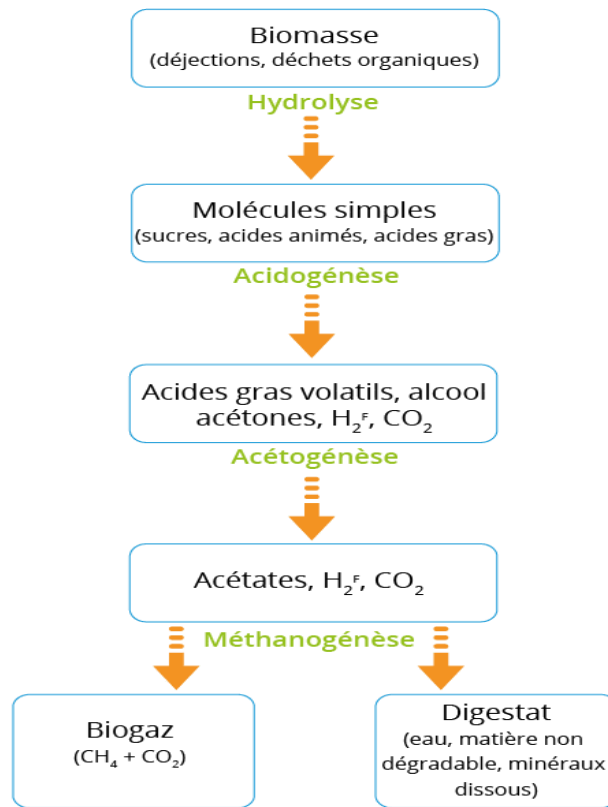


Figure 19 : les étapes de la méthanisation. (Gerardi, 2003)

- Les acétogènes, productrices de méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et d'éthylamines (Gerardi, 2003 ; Deublein et Steinhauser, 2008) :



- Les hydrogénotrophes, spécialisés dans la réduction du CO₂ par l'H₂ et la production de méthane à partir d'acide formique (Moletta, 2005 ; Gerardi, 2003) :



- Ces réactions sont lentes et peu exothermiques. Elles génèrent néanmoins 70 % du méthane produit

5-5-Equivalences énergétiques du biogaz

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un Nm³ de biogaz brut qui a une composition moyenne content 60% en méthane (CH₄) vante environ kWh et est semblable à celui de **(Dennamia et al., 2007 ; Deublein et Steinhauser, 2008):**

- ✓ 0 .4 litres de gaz butane.
- ✓ 0 .6 litres de gasoil
- ✓ 2 kilogrammes de charbon.
- ✓ 5kilogrammes de bois de chauffe.

Après sa purification (éliminati on en grande partie CO₂ et du gaz corrosif H₂S), son pouvoir calorifique supérieur (**PCS**) peut atteindre les 9 ,55 kWh/Nm³ ce qui représente l'équivalence de :

- 1.1 litre d'essence.
- 1liter de gasoil.
- 0.93 liter de gaz butane **(Kaloume, 2006)**

6-Recommandations pour améliorer le secteur de l'épuration des eaux usées en Algérie

- ✓ **Renforcement des infrastructures et optimisation des stations existantes**

Constats :

Plusieurs stations d'épuration en Algérie fonctionnent en-dessous de leur capacité nominale ou sont totalement à l'arrêt Ces défaillances sont dues au vieillissement des équipements, au manque de pièces de rechange, et à une mauvaise exploitation.

- ✓ **Amélioration de la gestion et du financement du traitement des eaux usées**

Constats : Le financement du secteur de l'assainissement repose fortement sur l'État. Il existe peu de partenariats public-privé (**PPP**) et très peu de recouvrement des coûts d'exploitation.

Conclusion et Recommandation

Conclusion et recommandation

L'épuration des eaux usées est aujourd'hui une nécessité vitale pour la protection des mers, rivières, zones humides et des nappes phréatiques, qui constituent nos principales sources d'eau potable. Dans une station d'épuration, on reproduit et intensifie les processus naturels de dégradation de la matière organique par les micro-organismes, dans le but de dépolluer efficacement l'eau avant son rejet ou sa réutilisation.

Mais au-delà de la simple préservation de l'environnement, il est désormais indispensable d'adopter une approche plus globale, qui consiste à :

- Identifier les activités humaines qui portent atteinte à l'environnement au point de nuire aux générations actuelles et futures ;
- Mettre en œuvre des actions correctives, à court, moyen et long terme.

Cette démarche est à la fois :

- Scientifique, car elle exige un développement continu des connaissances, encore limitées dans certains domaines liés à l'environnement, à l'épuration et à la gestion durable de l'eau ;
- Citoyenne, puisque les choix à effectuer impliquent des efforts et des coûts pour la société d'aujourd'hui, tout en engageant la responsabilité envers les générations futures
- Politique, car ces décisions doivent être prises collectivement, à l'échelle locale, nationale et parfois même mondiale, en tenant compte des enjeux globaux de durabilité et de justice environnementale.

Aujourd'hui, des efforts sont menés à l'échelle internationale non seulement pour améliorer les systèmes d'assainissement et de traitement des eaux usées, mais aussi pour valoriser les ressources qu'elles contiennent, comme l'eau douce, l'azote, le phosphore et la matière organique. L'objectif est de passer d'un modèle linéaire de gestion des eaux usées à un modèle circulaire, où réduction, réutilisation et récupération deviennent les maîtres mots d'une gestion durable de l'eau.

Recommandations pour une gestion durable des eaux usées :

Afin de renforcer la durabilité et l'efficacité du traitement et de la réutilisation des eaux usées en Algérie, plusieurs actions prioritaires peuvent être envisagées :

- Lancer des campagnes nationales de sensibilisation sur la sécurité sanitaire des eaux usées traitées, afin de réduire les réticences sociales et de promouvoir leur acceptation, notamment dans les usages agricoles et industriels.
- Encourager l'utilisation agricole des eaux traitées en :
 - ✓ Octroyant des subventions ciblées aux agriculteurs,
 - ✓ Proposant des sessions de formation sur les pratiques d'irrigation avec ces eaux,
 - ✓ Développant des projets pilotes réussis pour servir d'exemples concrets et reproductibles.
- Intégrer la gestion durable de l'eau dans les programmes scolaires et universitaires, afin de former une nouvelle génération sensibilisée aux enjeux hydriques, aux technologies de traitement, et à l'économie circulaire de l'eau.
- Créer des plateformes locales de concertation réunissant autorités locales, citoyens, agriculteurs et industriels, pour suivre, adapter et évaluer les projets de réutilisation des eaux usées
- Moderniser les stations d'épuration existantes en investissant dans des technologies moins énergivores et plus performantes, telles que les procédés à membranes (MBR) ou les réacteurs biologiques séquentiels (SBR), plus adaptés aux exigences de qualité de l'eau réutilisable.
- Mettre en place un programme national de réhabilitation des stations d'épuration en sous-performance, en établissant une priorisation par bassin hydraulique en fonction des besoins, de la sensibilité écologique et de la pression démographique.
- Numériser la gestion du traitement des eaux grâce à des systèmes de contrôle automatisés (SCADA), permettant le suivi en temps réel des performances, la

détection précoce des dysfonctionnements et une meilleure traçabilité des données

Annex et Bibliographie

Référence

Reference

- Afssa. (2008). Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation (Saisine n°2001-SA-0075). Agence française de sécurité sanitaire des aliments. <https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX-Ra-EauxUsees.pdf>
- Auteur(s) inconnu(s). (s.d.). Titre du document. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar. Consulté le 2 juin 2025, à l'adresse h REJSEK, 2002) <http://www.theses.rnu.tn/fr/dynamique/uploads/4b5047186001fdaca27115068578e933.pdf>
- Bakhou, M., & Aouggad, H. (2007). Application des systèmes d'information géographique pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines – Cas de la plaine de Maghnia. Mémoire de fin d'études, Département d'Hydraulique, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen
- Baumont, S., Camard, J.P., Lefranc, A., & Franconi, A. (2004). Réutilisation des eaux usées, risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220 p
- Belmahi, Ilhem. « L'Eau de Mer au Secours de l'Algérie : Le Défi du Dessalement ». Rosa Luxemburg Stiftung Afrique du Nord, 20 décembre 2024. Disponible en ligne : <https://rosaluxna.org/fr/publications/leau-de-mer-au-secours-de-lalgerie-le-defi-du-dessalement/>
- Bouamama Abbar. Influence de la physico-chimie des eaux de ruissellement sur la vulnérabilité des ouvrages de rétention. Génie civil. Normandie Université, 2018. Français. ffNNT : 2018NORMLH04ff. fftel-01792499
- Bouزيد, H., & Boudoukha, A. (2014). Évaluation de la pollution nitrée des eaux souterraines dans la plaine de la Mitidja (Algérie) : Sources et impacts sur la qualité de l'eau potable. Revue des Sciences de l'Eau, 27(4), 359-370.
- Chapman, D. (Éd.). (1996). Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring (2nd ed.). London: UNESCO/WHO/UNEP.
- Chouari, N., & Bouزيد, A. (2018). Intrusion saline et surexploitation des nappes phréatiques dans les zones côtières d'Algérie : Cas d'Oran, Alger et Jijel. Journal Algérien des Sciences de l'Environnement, 10(2), 45-56.
- Denideni, Y., & Maghnam, H. (2015). Métaux lourds et pollution. Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Algérie.
- Devillers J., Farret R., Girardin P., Rivière J.-L., Soulas G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides, Lavoisier Tec&Doc, Paris, 278 p
- Djemaci, H. (2009). Le coût économique de la dégradation de l'environnement en Algérie : Évaluation et implications. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Volume 9, Numéro 2.DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.8795> Disponible en ligne : <https://journals.openedition.org/vertigo/8795>
- FAO (2011) « The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture »
- FAO. (1988) Irrigation practice and water management. L.D. Doneen and D.W. Westcot. Irrigation and Drainage Paper 1, Rev. 1. FAO, Rome. 71 p.

Référence

- Fromant, G. (2015). Mesure de matières en suspension (MES) dans la colonne d'eau par combinaison de méthodes acoustiques et optiques [Thèse de doctorat, Institut Universitaire Européen de la Mer – IUEM, Université de Bretagne Occidentale]. HAL. <https://theses.hal.science/tel-01251084>
- Hadda, R. Y. (2023). Analyse des paramètres organoleptiques [Cours Hydro-Bromatologie, 5ème année Pharmacie, Université de Constantine 3]. Faculté de Médecine, Université de Constantine 3. <https://facmed.univ-constantine3.dz/wp-content/uploads/2023/11/Analyse-des-parametres-organoleptiques.pdf>
- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). Décret exécutif n° 10-23 du 12 janvier 2010 modifiant et complétant le décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 fixant les conditions de rejet des effluents. JORA n°03 du 17 janvier 2010, p. 9–12.
- Journal Officiel de la République Algérienne (JORA). Décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 fixant les conditions de rejet des effluents. JORA n°28 du 3 mai 2006, p. 9–22.
- Khelifi, A. (2019). Étude de la pollution organique des eaux usées par la mesure de la DBO5 : Application à une station d'épuration communale (Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger).
- Kherifi, W., & Bekiri, F. (2017). Les maladies à transmission hydrique en Algérie [Waterborne diseases in Algeria]. Journal Algérien des Régions Arides (JARA), 14, 64–73. Division Eau, Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Biskra, Algérie <https://www.crstra.dz/telechargement/journals/jara-14-2017/pdf/les-maladies-a-transmission-hydrique-en-algerie.pdf>
- Loubière, K., Benbelkacem, H., Foussard, J.-N., & Mathé, S. (2004). Application de l'oxydoréduction : Détermination de la pollution organique des eaux, mesure de la demande chimique en oxygène. Actualité Chimique, (279), octobre 2004.
- METAHRI Mohammed Saïd, Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi- Ouzou, faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012, 148 pages
- OMS (Organisation mondiale de la santé). (2006). Lignes directrices pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. Volume 2 : Utilisation des eaux usées en agriculture. Genève : Organisation mondiale de la santé.
- OUEZZANI Imen et LOUHADJ Maroua, Dépollution naturelle des eaux usées, mémoire de Master, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2023/2024.
- Redouane, C., M. Sara, et M. Farida. Suivi de quelques paramètres physicochimiques et bactériologiques dans les eaux du barrage et l'oued de Bouhamdane. Mémoire de master, Université 8 Mai 1945, Guelma, 2009.
- Rejsek, F. (2002) Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques. Scéren (CRDP AQUITAINE). Coll. Biologie technique. Sciences et techniques de l'environnement. 360p.

Référence

- Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9e éd.). Paris : Dunod.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. et al. (2009). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats (9th éd). Paris: Dunod.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). Chemistry for Environmental Engineering and Science (5e éd.). McGraw-Hill Education. ISBN : 978-0072480665
- Touati, M., et al. (2018). Impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines : Cas de la nappe alluvionnaire de Guelma-Boucheouf. Revue des Sciences et Technologies Synthèse, 37, 103–112
- VELP Scientifica. (2024, 16 mai). L'importance de la mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO) dans l'eau et les eaux usées. Consulté le 2 juin 2025, sur https://www.velp.com/fr-ww/limportance-de-la-mesure-de-la-demande-biochimique-en-oxygene-dbo-dans-leau-et-les-eaux-usees.aspx?srsId=AfmBOoq9GNPDsF9hyWvI_gnIfPp00gC4-5Dm8vRX0ya_irpr2abz3nP1
- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines on sanitation and health. Geneva: WHO.
Lien : <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>
- World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Youmatter. (2020, 5 juin ; mis à jour le 25 mars 2024). Eutrophisation : définition, causes, conséquences et solutions. Consulté le 2 juin 2025, à partir de [https://youmatter.world/fr/definition/eutrophisation-definition-causes-consequences-solutions/:contentReference\[oaicite:11\]{index=11](https://youmatter.world/fr/definition/eutrophisation-definition-causes-consequences-solutions/:contentReference[oaicite:11]{index=11)
- Abdelfatah, A. G., Ali, M. A., & Abdelbary, K. M. (2022). Recent Used Techniques and Promised Solutions for Biofiltration Treatment of Fish Wastewater. Egyptian Journal of Chemistry, 65(4), 93–104. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2022.116302.5268>
- Belhadj, M. (2016). Gestion et valorisation des boues d'épuration en Algérie : état des lieux et perspectives. Revue des Sciences de l'Eau et de l'Environnement, Université de Blida 1.
- Ben Djeddou, F. (2014). Épuration des eaux usées urbaines par procédé à boue activée de la région aride : cas Touggourt. Paramètres influents – variations saisonnières (Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie). Faculté des Mathématiques et des Sciences de la Matière.
- Benkhaled, M., & Boudjenouia, A. (2019). Les enjeux du traitement des eaux usées et de la valorisation des boues en Algérie. Revue des Sciences de l'Eau et de l'Environnement, 7(2), 45–56.
- Benyérou, D. (2020) Épuration et réutilisation des eaux résiduaires. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), Département d'Hydraulique.
- Berland J. M., Boutin C., Molle P., Cooper P. (2001), Procédés extensifs d'épuration des eaux usées, Office des publications des communautés européennes, Luxembourg.

Référence

- Berland, J.-M. (2024). Traitement des eaux résiduaires des agglomérations : Filières extensives et traitements tertiaires. Éditions Techniques de l'Ingénieur.
- Canler J-P. (2004), Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration: origines et solutions, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, et des affaires rurales (FNDAE n°33), document technique, Cemagref, France.
- Corentin Koninck. Procédés solaires basse température pour la désinfection d'eau de surface. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Perpignan, 2024. Français. ffNNT : 2024PERP0018ff. fftel04867589f
- Dahou, N. (2016). Traitement membranaire des rejets industriels [Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem]. Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique
- Deng, Y. (2018). Improvements to the performance of trickling filters by inclusion of alternative surface-active media (Doctoral dissertation, Loughborough University).
- Deronzier, G., & Choubert, J.-M. (2004). Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées : Comparaisons techniques et économiques des voies de traitement biologique et physico-chimique (Document technique FNDAE n°29). Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales, Cemagref. ISBN : 2-85362-630-X. Disponible sur : <http://www.eau.fndae.fr>
- Diette, S., & Vimont, M. (2007, 1er juin). Lagunage écologique. Centre de Ressources EnviroB.A.T-Méditerranée. Disponible sur : https://www.enviroboite.net/IMG/pdf/0706_Lagunage_ecologique_Diette_V1.pdf
- DIHANG.M.D., 2007 : « Mécanismes de coagulation et de floculation de suspensions d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux ». Thèse de Doctorat en Génie des Procédés et de l'environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Djahida Boukhalfa & Meryem El Madani. (2020).Projet CREM. Inventaire des bonnes pratiques dans le secteur de l'eau en Algérie. Alger : Ministère des Ressources en Eau, GIZ, OSS, Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau, juin Disponible sur : www.mre.dz / www.giz.de / www.oss-online.org
- Feki, M., & Bourguiba, A. (2012). Les procédés chimiques de traitement des eaux usées : état de l'art et application dans les pays du Maghreb. Revue des Sciences de l'Eau, 25(2), 161–177. <https://doi.org/10.7202/1009366ar>
- G Uerin M .M et TH O M Azeau, 1987 - E nviron nem ent T O 1. Edition d oin.
- GAID A.K., (1984) – L'épuration biologique des eaux usées urbaines. Edition OPU, Alger, Tome 1 ,261p.
- Iggui, K. (2020). Procédés biologiques de traitement des eaux (Polycopié de cours, 2e année Licence, Génie de l'eau). Université [à compléter], Année universitaire 2019/2020.
- Jemali, A., Soudi, B., & Berdai, H. (1998). Valorisation agricole des boues résiduaires : Valeur fertilisante et leur impact sur les sols. In Proceedings of the 13th International Congress on Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Use, Rabat, Maroc.

Référence

- Mampuya Kinda Fidele. Conception d'une station expérimentale de traitement des eaux usées par filtres plantés des macrophytes : “ Cas de l'Université Kimpa Vita d'Uíge /Angla ”. Génie civil. Université Côte d'Azur, 2020. Français. ffNNT : 2020COAZ4079ff. fftel-0319801
 - Melccfp , (2023). Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique. Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca>
 - SUEZ. (s.d.). Différents types de lagunage. Memento degremont®. suezwaterhandbook.fr
 - Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed.). Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill.
 - Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th Edition. McGraw-Hill Education.
 - Zighem, M. E. A. (2018). Cartographie des stations d'épuration (STEP) et analyse statistique de leur fonctionnement en Algérie https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/8722/1/ZIGHEM.Mohamed_El%20Amine.pdf
 - Zoubiri, A. (2013). Étude de traitement des eaux usées domestiques par boues activées en vue de leur recyclage en agriculture : Cas de la STEP de Médéa (Nord-Ouest de l'Algérie) [Mémoire de Master, Université Saad Dahlab Blida 1]. Dépôt institutionnel de l'université de Blida. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/1697>
 - Amel Blidi, Il en existe 211 sur le territoire national : cap sur les stations d'épuration, El Watan (mis à jour le 2 août 2023, 23:35) .
 - Boubekki, T. & Boudjema, H. (2016). « Contrôle du rendement épuratoire de la station d'épuration de Baraki (Alger) » : 97 % d'élimination des MES, 95 % réduction DCO, 94 % BDO5
 - <https://fr.scribd.com/document/468972956/Boubekki-Thinhinan-Boudjema-Hayat->
 - Ministère des Ressources en Eau, La station d'épuration de Baraki double sa capacité avec une seconde tranche, Algérie Presse Service (APS), repris par Radio Algérienne, 2015.
- Consulté sur : <https://radioalgerie.dz/news/fr/article/20150420/39683.html>
- Amellal Fawzi, Tiaret : Le défi de l'épuration des eaux usées, El Watan, 3 juin 2023
 - <https://elwatan-dz.com/tiaret-le-defi-de-lepuration-des-eaux-usees>
 - Office National de l'Assainissement (ONA). (2020). Rapport annuel sur les stations d'épuration en Algérie. Alger : Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique.
 - Rodier, J., Legube, B., Merlet, N. et al. (2009). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats (9th éd). Paris: Dunod. <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=2723616>
 - Mara, D. D. (2004). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan.
 - Belkheiri, T. (2013). Les systèmes de traitement extensifs des eaux usées domestiques dans le sud algérien : Cas des lagunes de Ghardaïa. Mémoire de Master, Université de Ghardaïa.

Référence

- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. and Stensel, H.D. (2003) Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th Edition, McGraw-Hill, Boston.
- ADEME (2017). Guide technique sur le traitement des eaux usées urbaines. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, 120 pages.
- Bouguettaya, M. et al. (2018). « Traitement des eaux usées : étapes de dessablage et déshuilage ». Revue des Sciences de l'Eau, 31(2), 140-145
- ONAS (Office National de l'Assainissement, Algérie) .2025. Rapports techniques sur les procédés de dessablage et déshuilage dans les STEP algériennes, notamment la STEP de Saida.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- BOUDHANE, N., & AHMED AMMAR, I. (2016). Optimisation du traitement biologique dans une station d'épuration à boues activées : cas de la STEP de Batna (Projet de fin d'études, Master en Hydraulique, Option : Technologies de Traitement des Eaux). Université de Batna, Faculté de Technologie, Département d'Hydraulique, Algérie.
- Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (MRE). (2021). Rapport sur l'état des infrastructures d'assainissement en Algérie. Alger : Direction de l'assainissement et de l'environnement.
- OCDE (2022). Tarification de l'eau pour une gestion durable : principes et pratiques. Organisation de Coopération et de Développement Économiques.
- FAO (2010). Wastewater treatment and use in agriculture – FAO Irrigation and Drainage Paper 47. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ONU-Eau (UN-Water) (2020). Wastewater: The Untapped Resource. Rapport mondial de Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), France (2020). La biométhanisation : principes et applications.
- Agence Nationale des Déchets. (2024). Rapport sur la valorisation énergétique des boues d'épuration. Alger, Algérie.
- Amara, S., Bensalem, R., & Haddad, M. (2023). Valorisation énergétique des déchets agricoles par digestion anaérobie en Algérie. Revue Algérienne de Génie Environnemental, 15(2), 45-58.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. Water Research, 28(3), 727–731. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90153-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90153-8)
- Appels, L., Baeyens, J., Degreëve, J., & Dewil, R. (2011). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science, 37(1), 36-51. DOI: 10.1016/j.pecs.2010.04.001
- Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. McGraw-Hill.

Référence

- BAADJ, M. A. (2016). Les procédés combinés d'oxydation chimique et biologique de traitement (Mémoire de master, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie de l'Environnement, Algérie). Sous la direction de Mlle ARRAR Jazia.
- BELGACEM, Fatima Zohra et OUNISSI, Chalabia Fatima Zohra, 2023. Station d'épuration à énergie positive par l'intégration de la digestion anaérobie : Département de Génie des Procédés et de l'Environnement.
- Benabdallah, S., & Mebarki, A. (2020). La gestion durable de l'eau en Algérie : Enjeux, limites et perspectives des solutions fondées sur la nature (SfN). *Revue des Sciences de l'Eau*, 33(2), 123-137.
- Benali, A., Khelifi, L., & Ould Ahmed, M. (2022). Optimisation de la digestion anaérobie dans la station d'épuration de Baraki. *Journal Algérien des Sciences de l'Eau*, 10(1), 23-34.
- Bouguettaya, D., & Hamdi, M. (2013). Reuse of treated wastewater for irrigation in Algeria: Current status and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 130, 1-8.
- Bouhelassa, S., Messaoudi, B., & Zennaki, A. (2021). La gouvernance de l'eau en Algérie : Enjeux et perspectives. *Revue des sciences sociales et humaines*, 40(1), 55–70.
- Bouzerzour, H., 2019. Gestion et réutilisation des eaux usées en agriculture en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(1), pp. 45-56.
- Bouzid, M., Saidi, N., & Zerguine, H. (2021). Perspectives de la digestion anaérobie pour la gestion durable des boues d'épuration en Algérie. *Cahiers de l'Environnement*, 12(3), 67-79.
- Bouzidi, Y. (2020). Réutilisation des eaux usées épurées en Algérie [Mémoire de Master, Université de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil & Hydraulique, Spécialité : Hydraulique, Option : Hydraulique et technique des eaux]. Sous la direction de Dr Beb Messaouda.
- Carenews. (2024, 5 janvier). Eaux usées : une solution pour l'irrigation agricole face aux sécheresses, sur <https://www.carenews.com>
- Dennamia, A., Dupont, J., & Lefèvre, P. (2007). La biométhanisation des matières organiques : principes et applications. Éditions Techniques de l'Environnement.
- DENNAMIA, A., Lyes, D., Bouchelaghem, H., & Kadi, M. (2007). Valorisation énergétique des déchets organiques par la biométhanisation. *Revue des énergies renouvelables*, 10(3), 339–346.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley-VCH.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley-VCH.
- FAO. (2022). Rapport sur les énergies renouvelables et la gestion des déchets agricoles en Afrique du Nord. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
- Gherib, A., Boufendi, M., Temime, A., & Bedouh, Y. (2016). Applications de la phytoremédiation dans le traitement des eaux usées en Algérie. *Larhyss Journal*, 27, 23–37.

Référence

•Hebabaze, S., Brand, C., Riechelmann, C., Nahli, A., Kraume, M., & Chlaida, M. (2016). Application d'un réacteur biologique membranaire "MBR" pour l'amélioration de la qualité des eaux épurées d'une unité d'industrie agroalimentaire au Maroc.

•ISSN 1112-3680. Consulté sur : <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/473>

•Khelifi, L., Benali, A., & Ould Ahmed, M. (2023). Technologies avancées de traitement des eaux usées et valorisation énergétique en Algérie. *Revue Internationale de l'Eau*, 18(4), 101-115.

•Kumar, G., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological aspects of anaerobic digestion for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 193-206.

DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.193

•Ladjel F., 2014."Perspectives de valorisation agricole et énergétique des boues d'épuration en Algérie," Office National de l'Assainissement (ONA),

•Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427.

DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.039

•Ministère de l'Environnement (2023). Rapport national sur la gestion des eaux usées et la valorisation des boues en Algérie. Alger : Gouvernement Algérien.

•Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables, Algérie (2023). Guide technique sur la biométhanisation des boues d'épuration.

•Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables. (2023). Plan national d'extension des stations d'épuration. Alger, Algérie.

•Moletta, R. (2005). La méthanisation : une technologie de traitement des effluents et des déchets organiques. *Techniques de l'Ingénieur*. J2 135.

•Moletta, Raymond. (2008). La méthanisation : une technologie mature au service du développement durable. Éditions Tec & Doc – Lavoisier.

•Moussouni, A. (2020). Épuration et réutilisation des eaux usées [Note de cours, Mastère 2 Hydraulique urbaine]. Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Institut des Sciences et de la Technologie, Mila.

•NACHI, Djamel Eddine et NEDJADI, Farouk2018.. La réutilisation des eaux usées épurées de la STEP de Bouzedjar. Mémoire de fin d'études en vue, Département de Génie de l'Eau et de l'Environnement,

•OCDE. (2019). Gouvernance de l'eau en Algérie : Analyse et recommandations. Organisation de coopération et de développement économiques. Disponible sur : <https://www.oecd.org/fr>

•OMS (2006). Lignes directrices pour l'utilisation sûre des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères : Volume 2 – Utilisation des eaux usées dans l'agriculture. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.

Référence

- ONEDD. (2020). Rapport sur l'état de l'environnement en Algérie. Office National de l'Environnement et du Développement Durable.
- ONEMA (2012). Réutilisation des eaux usées traitées : Panorama, enjeux et perspectives. Collection Comprendre pour agir. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, France.
- Pasteur, L. (1860). Études sur la fermentation.
- Sakar, S., & Dincer, I. (2017). Recent advances in biogas production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1-13.
DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.072
- Tchobanoglous, G., Stensel, H.D., & Tsuchihashi, R. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th Edition). McGraw-Hill Education.
- Zhang, C., & Angelidaki, I. (2016). Microbial community dynamics during anaerobic digestion of sewage sludge: Impact of temperature and organic loading rate. *Water Research*, 104, 232-241. DOI: 10.1016/j.watres.2016.08.002 s Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017.
- Ministère des Ressources en Eau (MRE). (2023). Rapport national sur l'état de l'assainissement en Algérie. Alger : Direction générale de l'assainissement