



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master dans le domaine SNV

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Option : Ecosystèmes Aquatiques

Thème

*Valorisation biologique des boues de la station d'épuration de
« BENI MERED » optimisation du procédé.*

Présenté par :

Soutenu le : 22 / 06 / 2025

Choucha sarah

Allal selma

Devant le jury:

Mme ELMAHDI.I

MAA/USDB1

Présidente

Mme BOULAHIA.I

MCA/USDB1

Examinatrice

Mme OURIACHE.H

MCB/USDB1

Promotrice

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force,
la volonté et les moyens nécessaires à l'accomplissement de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre promotrice, Mme **OURIACHE
Hadjer**, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Sa patience, ses conseils avisés, ainsi
que ses encouragements constants ont été d'un soutien précieux. Son regard critique nous a permis
de structurer notre travail avec rigueur et d'en assurer la réussite.*

*Nous adressons également nos remerciements à Mme **ELMAHDI Ibtissem** pour avoir accepté de
présider le jury, ainsi qu'à Mme **BOULAHIA Imane** pour avoir accepté d'examiner notre mémoire.
Leur disponibilité et leur engagement témoignent de leur investissement dans la formation et
l'évaluation des étudiants, et nous leur en sommes profondément reconnaissants.*



Je dédie ce travail à

Avec l'aide et la grâce de Dieu, cet humble travail a été achevé et je le dédie à

À mon père : darradji

À ma mère : Meriem

À mes sœurs : Hadjar et Zineb

A mes frères : Ibrahim et abdellah

A ma petite niece : Khadija

Au mari de ma sœur : Hicham

A ma grand-mère Aida, qu'elle repose en paix , et à ma grand-mère Nakhla

À mes tantes, oncles et tantes

A mes cousines maternelles et paternelles

Aux femmes de mes oncles et tantes

A tous ceux qui m'ont encouragé durant la réalisation de ce travail.

A toutes les personnes et tous mes collègues qui m'ont soutenu tout au long de mes études
à l'Université Saad Dahlab de Blida

SARAH



Je dédie ce travail à

Par la grâce et la miséricorde de Dieu, mon amie de toujours et moi avons obtenu notre diplôme. Je le dédie à :

Mon paradis, mon amie et mon puits de secrets, ma mère Asmaa.

Mon pilier et mon refuge, mon père Aliouat.

Ma précieuse et la joie de mon âme, ma sœur Boutaina.

Mon soutien et ma force, mes frères Abdellah, Abderrahmane, Ahmed et mon petit oiseau Abdelbarie.

Celui qui reconforte mon cœur et mon âme, Abdelhaq.

L'amie de mon cœur et de mon âme, qui n'est pas un être humain mais ma chatte Mami.

Ceux que mon cœur pleure et que le Créateur a rappelés à Lui : mon grand-père Ahmed et mon amie d'enfance Aïcha.

Ma seconde mère, ma chère grand-mère Assia, ainsi que ma deuxième grand-mère, la mère de mon père, Hadda.

Mes chères amies Lylia, Sabrina, Imane, Safaa, Maria, Chahinez et Sarah.

Ma seconde famille : mes tantes maternelles et paternelles, ainsi que mes oncles maternels et paternels.

Mes précieuses cousines : Zahida, Hadjer et Kawthar, ainsi qu'Imane et Samah, et mes cousines paternelles Zineb et Hadil.

Sans oublier mon amie et collègue Sarah.

Et enfin, à tous mes camarades et collègues qui m'ont soutenue tout au long de mon parcours universitaire à l'Université Saad Dahleb HBMC

Selma



Résumé

L'objectif de cette étude était d'évaluer le potentiel des boues issues de la station d'épuration de Beni Merad (wilaya de Blida) en analysant leurs propriétés physico-chimiques en vue de leur valorisation en tant qu'engrais organique pour l'agriculture.

Pour ce faire, une série d'analyses en laboratoire a été menée afin de déterminer la teneur des boues en éléments nutritifs essentiels, notamment l'azote total (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcaire total (CaCO_3) et l'oxyde de magnésium (MgO).

Les résultats obtenus ont révélé que l'échantillon traité à 2M de NaOH présente une composition chimique favorable, avec des concentrations élevées en nutriments et des propriétés physiques stables, le rendant apte à une utilisation agronomique. Cette richesse a été confirmée par les essais d'évaluation agronomique, qui ont mis en évidence l'efficacité de ces boues pour améliorer la fertilité du sol et la productivité végétale. Ces résultats suggèrent que ces déchets organiques peuvent être intégrés dans une logique d'économie circulaire et contribuer à la promotion de pratiques agricoles durables dans la région.

Mots clés : Boues d'épuration ; engrais organique, propriétés physico-chimiques ; station d'épuration ; valorisation agricole

Abstract

The aim of this study was to assess the potential of sludge from the Beni Merad wastewater treatment plant (wilaya of Blida) by analyzing its physico-chemical properties with a view to its use as an organic fertilizer for agriculture.

To this end, a series of laboratory analyses were carried out to determine the sludge's content of essential nutrients, including total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), total limestone (CaCO_3) and magnesium oxide (MgO).

The results obtained revealed that the 2M NaOH-treated sample has a favorable chemical composition, with high nutrient concentrations and stable physical properties, making it suitable for agronomic use. This richness was confirmed by agronomic evaluation trials, which highlighted the sludge's effectiveness in improving soil fertility and plant productivity. These results suggest that this organic waste can be integrated into a circular economy logic and contribute to the promotion of sustainable agricultural practices in the region.

Key words: Sewage sludge; organic fertilizer, physico-chemical properties; wastewater treatment plant; agricultural valorization.

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم إمكانات الحمأة الناتجة عن محطة بني مراد لمعالجة مياه الصرف الصحي (ولاية البليدة) من خلال تحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية بهدف استخدامها كسماد عضوي للزراعة. ولتحقيق هذه الغاية، أجريت سلسلة من التحاليل المخبرية لتحديد محتوى الحمأة من العناصر الغذائية الأساسية، بما في ذلك النيتروجين الكلي (N) والفوسفور (P) والبوتاسيوم (K) والحجر الجيري الكلي (CaCO_3) وأكسيد المغنيسيوم (MgO). كشفت النتائج التي تم الحصول عليها أن العينة المعالجة بـ 2M NaOH ذات تركيبة كيميائية مواتية، مع تراكيزات عالية من المغذيات وخصائص فيزيائية مستقرة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام الزراعي. وقد تأكد هذا الثراء من خلال تجارب التقييم الزراعي، التي أبرزت فعالية الحمأة في تحسين خصوبة التربة وإنتاجية النبات. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية دمج هذه النفايات العضوية في منطق الاقتصاد الدائري والمساهمة في تعزيز الممارسات الزراعية المستدامة في المنطقة.

الكلمات المفتاحية: حمأة مياه الصرف الصحي؛ الأسمدة العضوية، الخصائص الفيزيائية والكيميائية؛ محطة معالجة مياه الصرف الصحي؛ التثمين الزراعي.

Liste des abréviations

ETM: éléments traces métalliques

FV : Fraction volatile

MES : matière en suspension

MO : matière organique

MV : Matières volatiles

ONA : l'Office National de l'Assainissement

pH : potentiel d'Hydrogène

SARL: Société à Responsabilité Limitée

SPA : Société par Actions

STEP: Station dépuration

Liste des figures

Figure 1 : Bassin de décantation Primaire	6
Figure 2 : Bassin de décantation secondaire.....	7
Figure 3 : Boues mixte.....	8
Figure 4 : Vue aérienne de la Step de BeniMered	18
Figure 5 : laboratoire Rayhane de controle de qualité	19
Figure 6 : point de prélèvement (ONA).....	21
Figure 7 : Lavage des boues.....	22
Figure 8 : Filtration des boues.....	22
Figure 9 : Séchage des boues et agitation des boues.....	23
Figure 10 : pH mètre	24
Figure 11 : pr épar ation des boues.....	31

Liste des tableaux

Tableau I :Données de base de la STEP de Beni Mered.....	18
Tableau II : .Résultats des valeurs de pH pour les trois échantillons	33
Tableau III : Résultats des valeurs de la matière organique pour les trois échantillons	34
Tableau IV : Résultats des valeurs de l'azote pour les trois échantillons	35
Tableau V : Résultats des valeurs de phosphore pour les trois échantillons	36
Tableau VI : Résultats des valeurs de MgO pour les trois échantillons	37
Tableau VII : Résultats des valeurs de potassium pour les trois échantillons	38
Tableau VIII : le pourcentage de CaCO_3	38

Sommaire :

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I. Généralité sur les eaux usées	4
I.1. Définition des boues.....	4
I.2. Composition des boues.....	4
I.2.1. Potentiel fertilisant et valeur amendante	4
I.2.2. Teneur en matière organique	5
I.2.3. Présence d'éléments traces métalliques (ETM)	5
I.2.4. Diversité microbienne et risques sanitaires	5
I.3. Origine et classification des boues résiduaire	6
I.3.1. Boues primaire	6
I.3.2. Boues secondaires (ou biologiques)	7
I.3.3. Boues mixtes (ou tertiaires).....	7
I.4. Classification des boues.....	8
I.4.1. Classification selon les propriétés physico-chimiques.....	9
I.5. Les caractéristiques physiques et chimiques des boues.....	10
I.5.1. Siccité.....	10

1.5.2. Matières en suspension (MES).....	10
I.5.3. Matières volatiles (MV)	11
I.5.4. Fraction volatile (FV)	11
I.5.4. Viscosité.....	11
II. Traitement et valorisation des boues.....	11
II.1. Traitements physico-chimique	12
II.2. Traitements biologiques.....	12
II.3. Traitements thermiques.....	12
II.4. Avantages et limites des filières de traitement et de valorisation des boues	13
II.4.1. Avantages.....	13
II.4.2. Limites	13
II.5. Réglementation et pratiques d'épandage des boues.....	14

Chapitre II : Matériel et Méthodes

II.1. Présentation du lieu de stage	17
II.1.1. STEP de Beni-Mered	17
II.1.2. Laboratoire SARL Rayhane.....	19
II.2. Matériel.....	21
II.3. Mode de prélèvement.....	21
II.4. Préparation des échantillons des boues	22
II.5. Analyses physico-chimiques des Boues.....	23
II.5.1. Analyses physiques de sol	23
A. Détermination du pH des boues (méthode AFNOR NF X31-103).....	23
II.5.2 Analyses chimiques.....	24
A. Détermination de la matière organique par la méthode de Walkley-Black (Québec)...	24

B. Détermination du phosphore assimilable.....	25
C . Détermination du potassium assimilable.....	26
D. Détermination de la teneur en azote total	27
E. étermination des teneurs en chaux (CaO) et en magnésie (MgO).....	28
F. Détermination du Carbonate de calcium	30
II.6. Test de valorisation agricole des boues.....	30
Résultats et Discussion	
I. les analyse physico-chimiques des boues	33
I.1. Analyses physiques.....	33
I.1.2. Détermination le ph	33
I.2. Analyses chimiques.....	34
I.2.1. Détermination de l matière organique (MO).....	34
I.2.2. Détermination de l'azote.....	35
I.2.3.Détermination de phosphore.....	36
I 2.4. MgO	36
I.2.5. Potassium.....	37
I2.6. Carbonate de calcium	38
Conclusion générale	41
Références bibliographiques	44
Annexe	51

Introduction

La gestion des boues industrielles représente un défi environnemental et économique d'envergure, en raison de la diversité de leur origine, de leur composition chimique, et des risques potentiels qu'elles peuvent poser pour les sols, les cultures et la santé humaine. Produites en grande quantité lors du traitement des eaux usées, notamment dans les stations d'épuration, ces boues sont riches en matière organique et en éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium (Fytili & Zabaniotou, 2008). Longtemps considérées comme des déchets, elles sont aujourd'hui perçues comme une ressource valorisable, notamment dans le cadre d'une agriculture durable.

En effet, leur application contrôlée comme fertilisant permet de réduire significativement les volumes de déchets mis en décharge et de limiter l'usage d'engrais minéraux, dont la production est à la fois coûteuse et peu respectueuse de l'environnement (Singh & Agrawal, 2008 ; Wang et al., 2020). Plusieurs études ont mis en évidence leur potentiel agronomique.

Cependant, leur valorisation exige une évaluation préalable de leur composition physico-chimique et sanitaire, afin d'écarter tout risque de contamination, notamment par des métaux lourds ou d'autres composés toxiques (García-Delgado et al., 2012). Le recours à des traitements chimiques, tels que l'alcalinisation par la soude (NaOH), permet d'améliorer la stabilité des boues et de favoriser la disponibilité des nutriments (Zhou et al., 2020).

Dans ce contexte, notre étude vise à explorer le potentiel agronomique des boues issues de la station d'épuration de Beni Merad (wilaya de Blida, Algérie), par l'intermédiaire d'un traitement alcalin à différentes concentrations de NaOH (1 M, 2 M et 4 M), suivi d'une caractérisation physico-chimique approfondie.

L'objectif principal est de valoriser les boues de la station d'épuration de Beni Merad à des fins agricoles, à travers un traitement chimique optimisé et une évaluation de leurs propriétés fertilisantes.

Ce travail est structuré comme suit :

- **Partie bibliographique** : Synthèse des connaissances sur les boues industrielles, leurs propriétés, leur traitement et leur valorisation ;

Introduction

- **Matériels et méthodes** : Description des échantillons, protocole de traitement chimique (NaOH), et techniques analytiques ;
- **Résultats et discussion** : Présentation des résultats, interprétation et comparaison avec les données de la littérature .

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

Généralités sur les boues

I.1. Définition des boues

Les boues sont des suspensions complexes composées majoritairement d'eau et de matières solides en suspension, issues de la séparation physique, chimique ou biologique au cours des traitements appliqués aux eaux usées. Elles représentent un sous-produit inévitable du traitement des effluents domestiques et industriels (Fytili & Zabaniotou, 2022 ; Metcalf & Eddy, 2014). La consommation d'eau par les activités humaines, qu'elles soient domestiques ou industrielles, génère des eaux usées contenant divers polluants organiques et inorganiques. Ces eaux sont généralement collectées par les réseaux d'assainissement, puis dirigées vers des stations d'épuration où elles subissent plusieurs étapes de traitement avant leur rejet ou réutilisation, produisant en parallèle des quantités significatives de boues résiduelles (Lema et al., 2021 ; Tchobanoglous et al., 2013).

I.2. Composition des boues

Les boues résiduelles issues du traitement des eaux usées représentent un sous-produit complexe, composé majoritairement de matières biologiques issues des processus épuratoires, ainsi que d'éléments minéraux d'origine environnementale ou anthropique. Leur composition est dominée par une forte teneur en eau, tandis que la matière sèche est constituée de substances organiques et de minéraux riches en éléments nutritifs tels que l'azote (N), le phosphore (P) et le soufre (S) (SPDE, 2006). En raison de leur origine, ces boues hébergent une diversité microbienne importante, incluant des microorganismes utiles ainsi que des agents pathogènes potentiels. Par ailleurs, elles peuvent contenir des traces de métaux lourds provenant de sources industrielles, domestiques ou du ruissellement pluvial, ainsi que divers composés organiques plus ou moins transformés par l'activité microbienne (SPDE, 2006).

I.2.1. Potentiel fertilisant et valeur amendante

L'application contrôlée de boues sur les sols agricoles permet d'apporter tout ou partie des éléments nutritifs nécessaires à la croissance des cultures. Ces éléments comprennent notamment l'azote, le phosphore, le magnésium (Mg), le calcium (Ca) et le soufre, contribuant ainsi à corriger certaines carences du sol, bien que l'apport en potassium (K) reste généralement insuffisant (Zebarth et al., 2000 ; Su et al., 2004 ; Warman et al., 2005). Cette capacité fertilisante confère aux boues une valeur agronomique significative, à condition que leur application respecte les seuils réglementaires et les besoins des cultures.

I.2.2. Teneur en matière organique

La matière organique constitue une composante essentielle des boues résiduelles, représentant entre 30 et 80 % de la matière sèche. Elle comprend des particules solides séparées lors de la décantation primaire, ainsi que divers constituants biochimiques tels que les lipides (6–19 %), les polysaccharides, les protéines, les acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique), la lignine, ainsi que des métabolites microbiologiques résiduels issus des traitements biologiques comme la digestion anaérobie ou l'aération prolongée (**Metahri, 2012**). Cette richesse organique joue un rôle crucial dans l'amélioration de la structure du sol, la rétention en eau et l'activité biologique édaphique.

I.2.3. Présence d'éléments traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques présents dans les boues posent un risque écotoxique en raison de leur nature non biodégradable. Certains, tels que le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le chrome (Cr), sont des micronutriments essentiels au fonctionnement biologique des organismes à faibles concentrations, mais peuvent devenir toxiques lorsque leur spéciation chimique ou leur concentration dépasse certains seuils. D'autres éléments, comme le cadmium (Cd), le plomb (Pb) et le mercure (Hg), sont purement toxiques et sont introduits principalement par les rejets industriels en raison de leurs propriétés physico-chimiques (**Agence de l'Eau, 2016**). La gestion et la surveillance de ces métaux sont donc indispensables avant toute valorisation des boues.

I.2.4. Diversité microbienne et risques sanitaires

Les boues issues du traitement biologique des eaux usées contiennent une population microbienne variée, incluant à la fois des microorganismes épurateurs et des agents pathogènes. Ces derniers comprennent des bactéries, des virus, des parasites et des champignons, principalement dérivés des excréments humains et animaux (**Sahlström et al., 2004**). Leur présence impose un traitement hygiénisant rigoureux pour prévenir les risques sanitaires liés à leur épandage ou à toute autre forme de valorisation.

I.3. Origine et classification des boues résiduaires

Le traitement des eaux usées repose essentiellement sur des processus de séparation physique, chimique et biologique permettant d'éliminer ou de transformer les substances susceptibles de

Chapitre I : Revue bibliographique

polluer les milieux naturels (**Juven et al., 2014**). L'un des principaux sous-produits générés par ces procédés est la boue, issue des différentes étapes de traitement au sein des stations d'épuration. Ces boues présentent des caractéristiques physico-chimiques et biologiques variables selon leur origine, leur mode de production et le type d'eaux traitées (domestiques, industrielles ou mixtes).

Sur la base de leur provenance et de leur processus de formation, les boues peuvent être classées en trois catégories principales :

3.1.1 Les boues primaires

Sont produites lors de la première phase de traitement des eaux usées. Elles sont composées de matières solides lourdes qui se déposent naturellement au fond des bassins de décantation au cours du processus de clarification de l'eau. Riches en matières organiques, elles peuvent également contenir des polluants tels que des métaux lourds et des substances chimiques. Principalement constituées de particules en suspension facilement décantables, ces boues sont soit de grande taille, soit très denses. Leur teneur en solides volatils est relativement faible, se situant généralement entre 55 % et 60 %. En raison de cette faible teneur en matières organiques, elles présentent une excellente capacité de déshydratation, facilitant ainsi leur traitement ultérieur.



Figure 1 : Bassin de décantation Primaire (photo origine . 2025)

I.3.2. Boues secondaires (ou biologiques)

Les boues secondaires, également appelées boues biologiques, sont produites au cours du traitement secondaire des eaux usées, principalement dans les systèmes à boues activées ou autres procédés biologiques (filtres biologiques, lagunage, etc.). Elles résultent de la

Chapitre I : Revue bibliographique

croissance et de la multiplication des microorganismes (bactéries, protozoaires, champignons, etc.) qui assurent la dégradation de la matière organique dissoute dans les effluents.

Ces boues sont donc majoritairement constituées de biomasse microbienne floculée, ainsi que de produits de biosynthèse et de résidus cellulaires issus de la dégradation biologique. Leur teneur en matières volatiles est généralement plus élevée que celle des boues primaires, atteignant couramment 65 à 80 %, ce qui traduit une proportion importante de matière organique active.

Toutefois, leur texture plus fine et leur structure moins compacte rendent leur déshydratation plus difficile. Avant valorisation ou élimination, elles nécessitent souvent une étape de stabilisation (aérobie ou anaérobie) pour réduire leur charge organique et leur potentiel pathogène. Malgré leur faible teneur en polluants inorganiques par rapport aux boues primaires, elles peuvent contenir des traces de métaux ou de composés organiques issus de l'adsorption sur la biomasse.



Figure 2: Bassin de décantation secondaire (photo origine 2025)

I.3.3. Boues mixtes (ou tertiaires)

Les boues mixtes correspondent à un mélange de boues primaires et secondaires, souvent combinées dans des proportions variables selon les configurations des stations d'épuration. Elles peuvent également inclure des résidus issus de traitements tertiaires, notamment ceux destinés à la précipitation des nutriments (azote et phosphore), à l'élimination des micro-polluants ou à la désinfection finale.

Chapitre I : Revue bibliographique

Cette catégorie de boues présente une composition physico-chimique hétérogène, reflétant à la fois les caractéristiques des matières organiques biodégradables des boues biologiques et celles des matières décantables et potentiellement polluées des boues primaires. Leur teneur en solides volatils dépendra fortement du rapport entre les fractions primaire et secondaire, mais se situe généralement dans une gamme intermédiaire.

En raison de cette variabilité, les boues mixtes nécessitent une gestion plus rigoureuse pour optimiser leur traitement et leur valorisation. Elles peuvent être destinées à la digestion anaérobie, au compostage ou à l'épandage agricole, sous réserve d'un respect strict des normes sanitaires et environnementales.



Figure 3 : Boues mixte (photo origine 2025)

I.4. Classification des boues

Les boues issues du traitement des effluents peuvent être classées selon différents critères, notamment leur origine, leur mode de formation ou encore leurs caractéristiques physico-chimiques. Une distinction fondamentale est établie entre les **boues de procédé** et les **boues d'épuration** (Guibelin, 2014).

a. Boues de procédé

Les boues de procédé sont des sous-produits pâteux ou semi-solides directement générés au cours d'activités industrielles telles que les étapes de fabrication, de transformation ou de nettoyage. Elles se distinguent par leur forte charge en polluants organiques et/ou inorganiques, une grande variabilité de composition et une toxicité souvent élevée, les rendant inadaptées aux traitements biologiques classiques. Leur prise en charge nécessite donc des procédés spécifiques, en lien avec leur niveau de dangerosité environnementale et sanitaire

(Guibelin, 2014 ; Agence de l'eau, 2016).

b. Boues d'épuration

Les boues d'épuration proviennent quant à elles des différentes étapes de séparation solide/liquide dans les stations de traitement des eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique, industrielle ou mixte. Elles peuvent être classées comme primaires, secondaires ou mixtes, selon les procédés de traitement mis en œuvre (décantation, flottation, filtration, etc.). Ces boues font l'objet de nombreuses recherches sur leur valorisation, notamment via des approches durables (Guibelin, 2014).

Outre l'origine, les boues industrielles peuvent également être classées selon les procédés physico-chimiques appliqués durant le traitement, incluant notamment :

- **Oxydation** des métaux comme le fer (Fe) et le manganèse (Mn) via le permanganate de potassium ;
- **Coagulation** par le chlorure ferrique (FeCl_3) pour la déstabilisation des matières en suspension (MES) et la neutralisation des charges ;
- **Floculation** couplée à l'injection de chaux (CaO) pour réduire l'alcalinité et favoriser la précipitation des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), ainsi que des carbonates ;
- **Neutralisation acide** par ajout d'acide sulfurique ;
- **Filtration** sur sable pour éliminer les oxydes métalliques (FeO , MnO) et adsorption sur **charbon actif** pour réduire la matière organique dissoute ;
- **Désinfection** de l'eau par chloration (hypochlorite de sodium) ;
- **Injection contrôlée de boues** pour induire la décarbonatation complète des ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}).

1.4.1 Classification selon les propriétés physico-chimiques

L'évaluation détaillée des propriétés des boues repose sur deux grandes familles de paramètres :

a. Paramètres physiques

Ces paramètres sont généralement mesurés à différentes étapes de traitement et comprennent :

- **Séparation mécanique** selon la méthode quartenaire ;

- **Concassage et brûlage**, par exemple à l'aide d'une fraiseuse thermique ;
- **Tamissage et étiquetage granulométrique**, généralement à une maille inférieure à 80 mesh ($\approx 16 \mu\text{m}$).

b. Paramètres chimiques

La caractérisation chimique repose sur la détermination des teneurs en différents éléments ou composés, notamment :

- Oxyde de fer sous différentes formes (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO)
- Carbonate de calcium (CaCO_3)
- Aluminium (Al), silice (SiO_2), soufre (S) et carbone (C)
- Phosphore total (P).

I.5. Caractéristiques physiques et chimiques des boues

La caractérisation des boues repose sur plusieurs paramètres physico-chimiques fondamentaux qui influencent directement leur comportement, leur traitement et leur valorisation.

I.5.1. Siccité

La siccité, ou taux de matière sèche (MS), représente le pourcentage de matière solide dans les boues. Elle constitue un indicateur clé de leur consistance et de la concentration des solides. En fonction de ce paramètre, les boues peuvent être classées comme suit :

- **Boues liquides** : siccité de 0 à 10 % ;
- **Boues pâteuses** : 10 à 25 % ;
- **Boues solides** : 25 à 80 % ;
- **Boues sèches** : > 80 Cette classification est essentielle pour adapter les procédés de traitement, notamment en ce qui concerne la déshydratation ou la valorisation énergétique.

1.5.2. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) constituent la phase particulaire non dissoute des boues. Leur mesure est relativement aisée dans les fractions concentrées, mais nécessite des techniques plus sensibles — telles que la filtration membranaire dans les phases diluées. Un

bilan des MES peut être établi par soustraction des matières dissoutes (organiques et minérales) de la matière sèche totale, selon la relation expérimentale suivante:

$$\text{MES} = \text{MS} - (\text{matières dissoutes}) \text{ (Jardé, 2002).}$$

1.5.3 Matières volatiles (MV)

Les matières volatiles désignent la fraction organique thermodégradable des boues. Conformément à la norme **NF EN 12879 (2000)**, elles sont déterminées par calcination du résidu sec à 550 °C pendant deux heures. Le pourcentage massique de matières volatiles est obtenu en comparant la masse résiduelle avant et après traitement thermique.

1.5.4 Fraction volatile (FV)

La fraction volatile (FV), exprimée en pourcentage de la matière sèche, est le rapport entre la masse de matières volatiles (g/L) et celle de matière sèche totale (g/L). Cet indicateur renseigne sur le degré de stabilisation organique des boues, et oriente les choix technologiques pour leur traitement, notamment en termes de déshydratation, compostage ou incinération (**Dudkowski, 2000**).

1.5.5 Viscosité

La viscosité des boues est une propriété rhéologique dépendante de la concentration en solides. À faible teneur (généralement < 10–15 g/L), les boues se comportent comme des fluides newtoniens, avec des viscosités proches de celles de l'eau. En revanche, au-delà de ce seuil, elles présentent un comportement pseudo plastique, ou rhéo-fluidifiant, dont la modélisation est essentielle pour concevoir les équipements de transport et de traitement (**Sedki, 1995**).

II. Traitement et valorisation des boues

Le traitement et la valorisation des boues issues des systèmes d'épuration constituent une étape critique dans la chaîne de gestion des eaux usées. L'objectif principal est de réduire leur volume, leur toxicité, leur charge organique et leur teneur en agents pathogènes, tout en optimisant leur potentiel de valorisation, notamment sous forme de matière fertilisante ou de source d'énergie (**Kelessidis & Stasinakis, 2012 ; Fytili & Zabaniotou, 2008**).

Les filières de traitement peuvent être regroupées en quatre grandes catégories : **physico-**

chimiques, biologiques, thermiques, et agronomiques.

II.1. Traitements physico-chimiques

Les procédés physico-chimiques visent principalement à **épaissir, conditionner, et déshydrater** les boues, afin d'en faciliter la manipulation, le transport et le stockage. L'épaississement (gravitaire ou mécanique) permet d'augmenter la concentration en matières sèches, tandis que le conditionnement (à base de chaux ou de polymères) améliore la floculation et la déshydratation.

La déshydratation mécanique (centrifugation, filtres-presses, etc.) ou thermique permet d'atteindre une matière sèche plus élevée (jusqu'à 30–40 %). Ces étapes sont indispensables avant toute valorisation ou élimination finale (**Spinosa, 2001**).

II.2. Traitements biologiques

Les traitements biologiques sont conçus pour **stabiliser la matière organique**, réduire la production d'odeurs, et abaisser le potentiel pathogène des boues. Deux procédés dominent cette catégorie :

➤ **La digestion anaérobie**, réalisée en l'absence d'oxygène, dégrade les composés organiques et produit du biogaz (principalement du méthane), valorisable sur le plan énergétique (**Appels et al., 2008**) ;

➤ **La digestion aérobie**, plus rapide mais énergétiquement coûteuse, est adaptée aux petites unités de traitement et permet également une réduction efficace de la matière organique.

Ces procédés conduisent à une **boue stabilisée**, moins putrescible, et mieux adaptée aux valorisations ultérieures.

II.3. Traitements thermiques

Les boues déshydratées peuvent faire l'objet d'un traitement thermique, qui permet une **réduction drastique du volume** et une **neutralisation des agents pathogènes** :

- **L'incinération**, pratiquée à haute température ($> 850^{\circ}\text{C}$), permet de réduire jusqu'à 90 % le volume des boues, tout en produisant des cendres pouvant être valorisées ou mises en décharge (**Werther & Ogada, 1999**).

- **La pyrolyse et la gazéification**, procédés à plus basse température, produisent du gaz de synthèse et du biochar, et présentent un intérêt croissant dans une perspective d'économie circulaire (Lu et al., 2015).

II.4. Avantages et limites des filières de traitement et de valorisation des boues

La diversité des procédés disponibles pour le traitement et la valorisation des boues reflète la complexité de ces sous-produits, dont les caractéristiques varient fortement selon leur origine, leur composition et les contraintes locales (économiques, réglementaires, environnementales). Chaque filière présente des avantages spécifiques mais aussi des limites technico-économiques et environnementales à considérer.

II.4.1. Avantages

- **Réduction du volume** : Les procédés de déshydratation et les traitements thermiques permettent une réduction significative du volume des boues, facilitant leur transport et réduisant les coûts de gestion (Spinosa, 2001) ;

- **Valorisation énergétique** : La digestion anaérobie et les procédés thermiques (incinération, pyrolyse) permettent de produire du biogaz ou de l'énergie, contribuant à la transition vers des systèmes d'assainissement durables et autosuffisants (Appels et al., 2008 ; Lu et al., 2015) ;

- **Amélioration de la qualité agronomique des sols** : L'épandage de boues stabilisées constitue une source importante de nutriments et de matière organique, bénéfique pour les sols pauvres ou dégradés, tout en réduisant le recours aux engrais chimiques (Warman et al., 2005 ; Su et al., 2004) ;

- **Neutralisation biologique** : Les traitements biologiques permettent une réduction efficace de la charge organique, des odeurs et des agents pathogènes.

II.4.2. Limites

- **Risques environnementaux et sanitaires** : La présence d'éléments traces métalliques, de composés organiques persistants et de germes pathogènes constitue une menace potentielle pour les sols, les eaux souterraines et les chaînes alimentaires, en particulier lors d'une valorisation agricole mal contrôlée (Smith, 2009 ; Agence de l'eau, 2016) ;

- **Coûts d'investissement et d'exploitation** : Les procédés thermiques (incinération, pyrolyse) et certaines technologies de digestion nécessitent des infrastructures lourdes et des

coûts énergétiques élevés, souvent incompatibles avec les petites stations (**Werther & Ogada, 1999**) ;

➤ **Acceptabilité sociale** : L'épandage agricole peut susciter des réticences sociales liées aux nuisances olfactives, aux risques perçus pour la santé ou à la contamination des productions agricoles ;

➤ **Contraintes réglementaires** : De nombreuses réglementations encadrent l'usage des boues, limitant les concentrations admissibles en métaux lourds, agents pathogènes ou composés toxiques, ce qui peut restreindre certaines filières de valorisation (directive 86/278/CEE ; SPDE, 2006).

II.5. Réglementation et pratiques d'épandage des boues

L'épandage agricole constitue l'une des voies de valorisation des boues d'épuration. Selon les réglementations en vigueur, deux périodes principales sont autorisées pour l'épandage : **le printemps** (mars à avril) **et** la fin de l'été (août à octobre). En dehors de ces plages temporelles, l'épandage est strictement interdit, bien que la production de boues se poursuive tout au long de l'année. Cela implique la mise en place de solutions de **stockage appropriées**, afin de garantir une gestion continue et sécurisée des boues (Courrier de l'Environnement de l'INRA, 2000).

Le **stockage** joue également un rôle essentiel dans la réduction des agents pathogènes présents dans les boues. Il doit être effectué sur une durée allant de 12 à 18 mois, afin d'assurer une hygiénisation suffisante (**Wart, 2010**).

L'application des boues sur les sols agricoles est encadrée par plusieurs exigences :

- Elle doit être ajustée aux besoins nutritionnels des cultures (notamment en azote et en phosphore) et à la fertilité des sols ;
- Elle doit être compatible avec les mesures de protection des ressources en eau, en particulier contre la pollution par les nitrates dans les zones vulnérables ;
- Elle ne doit pas excéder 30 tonnes de matière sèche par hectare sur une période de **dix** ans (Courrier de l'Environnement de l'INRA, 20

Chapitre II :

Matériel et Méthodes

Chapitre II : Matériel et Méthodes

L'étude a été menée sur une période de trois mois et demi, allant du 5 février au 19 mai 2025. Les échantillons de boues utilisés pour les essais ont été prélevés au niveau de la station d'épuration de Béni Mered, située dans la wilaya de Blida, en Algérie. Cette station traite principalement les eaux usées domestiques et industrielles de la région, ce qui confère aux boues des caractéristiques physico-chimiques complexes. Les analyses physico-chimiques des échantillons (pH, matière sèche, teneur en matière organique, etc.) ont été effectuées dans le laboratoire « RAHYANA », basé à Soumaâ, également dans la wilaya de Blida.

II.1. Présentation du lieu de stage

II.1.1. STEP de Beni-Mered

La station d'épuration des eaux usées (STEP) de Béni Mered, située dans la wilaya de Blida, assure le traitement des eaux usées issues de l'aire urbaine de Blida-Béni Mered ainsi que des effluents industriels connectés au réseau d'assainissement. Implantée à l'est de la ville, à proximité de l'oued Béni Azaa, elle s'étend sur une superficie de 6 hectares et se trouve à environ 5 km au nord-est du centre-ville de Blida.

Cette station, exploitée par l'Office National de l'Assainissement (ONA), zone d'Alger, depuis les années 1980 (**Maazouz, 2022**), est conçue pour une capacité de traitement de 383 000 équivalents habitants à l'horizon 2003. Parmi cette capacité, une charge estimée à 40 000 équivalents habitants correspond aux effluents d'origine industrielle (voir Tableau I).

La STEP de Béni Mered collecte et traite les eaux usées en provenance de plusieurs communes constituant le Grand Blida, à savoir : Béni Mered, Blida, Ouled Yaïch et Bouarfa. Ce contexte urbain et industriel confère à la station un rôle central dans la gestion des eaux usées de la région, influençant directement la composition physico-chimique des boues produites.

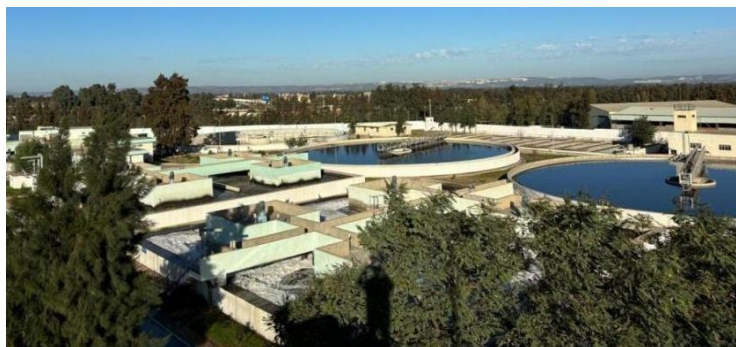


Figure 4 : Vue aérienne de la Step de BeniMared (photo origine 2025)

Tableau I : Données de base de la STEP de Beni Mered (**Maazouz, 2022**).

Capacité nominale	383 000 EH
Débit de pointe journalier	51 560 m ³ /j
Débit de pointe temps sec	3 310 m ³ /h
Débit de pointe de pluie	4 800 m ³ /h

Le processus de traitement des eaux usées au sein de la station d'épuration de Béni Mered est structuré en quatre grandes étapes principales :

➤ **Prétraitement** : Cette phase initiale comprend le dégrillage (élimination des déchets grossiers), le déshuilage (séparation des huiles et graisses flottantes) et le dessablage (extraction des particules lourdes comme le sable), permettant de protéger les installations en aval et d'optimiser l'efficacité des traitements suivants ;

➤ **Traitement primaire** : Cette étape consiste en une décantation physique permettant la séparation des matières en suspension par sédimentation, réduisant ainsi la charge polluante brute des eaux usées ;

➤ **Traitement biologique** : Basé sur des procédés biologiques (généralement par boues activées), il vise à éliminer la matière organique dissoute ainsi qu'une partie des nutriments (azote, phosphore), grâce à l'action de micro-organismes en milieu aéré ;

➤ **Traitement des boues** : Les boues issues des étapes précédentes subissent successivement un épaissement (réduction du volume par concentration), une stabilisation (réduction de la matière organique et des pathogènes, souvent par digestion anaérobie ou aérobie), puis une déshydratation (réduction de la teneur en eau, généralement par centrifugation ou filtre-pressé), en vue de leur valorisation ou élimination.

II.1.2 Présentation du Laboratoire SARL Rayhane

1. Historique et évolution

Le laboratoire Rayhane a été fondé en janvier 2023 sous forme de Société par Actions (SPA), dans le but de fournir des services d'analyses physico-chimiques et environnementales répondant aux normes nationales et internationales. Afin de renforcer sa flexibilité opérationnelle et d'optimiser sa gestion administrative et financière, la structure juridique de l'entreprise a été modifiée en mars 2025, devenant une Société à Responsabilité Limitée (SARL). Ce changement marque une étape importante dans son développement, en permettant une meilleure adaptation aux exigences du marché et une réactivité accrue face aux demandes spécifiques des partenaires industriels et institutionnels.



Figure 5 : laboratoire Rayhane de controle de qualité (photo originale, 2025)

2. Localisation

Le siège social de la SARL Rayhane est situé à Hamiz, Alger, tandis que le laboratoire principal est implanté à Soumaâ, dans la wilaya de Blida, plus précisément au 16Bis, Rue Amir Mahfoud. Cette implantation stratégique permet de couvrir efficacement les besoins analytiques de la région Centre du pays, en particulier dans les domaines de l'environnement, de l'industrie et de la santé publique.

Le laboratoire SARL Rayhane mobilise son expertise pour réaliser des analyses microbiologiques et physico-chimiques, en garantissant des résultats fiables, traçables et conformes aux normes en vigueur, notamment celles fixées par les autorités sanitaires et environnementales nationales.

3. Infrastructure et équipements

Chapitre II : Matériel et Méthodes

Le laboratoire SARL Rayhane est équipé de plusieurs espaces spécialisés, conçus pour garantir la réalisation d'analyses dans des conditions optimales de sécurité, de traçabilité et de conformité aux exigences normatives. Ces espaces sont organisés de manière fonctionnelle afin d'assurer une circulation fluide des échantillons et une séparation rigoureuse des activités analytiques.

➤ **Réception** : Espace dédié à l'accueil des échantillons et à l'enregistrement des demandes d'analyse. Cette étape assure une première vérification de la conformité des prélèvements et une traçabilité complète via un système de codification ;

➤ **Service physico-chimique** : Ce service prend en charge la réalisation des analyses physico-chimiques sur une grande diversité d'échantillons, incluant le sol, l'eau, les produits alimentaires et cosmétiques. Il est doté d'équipements adaptés pour la mesure des paramètres tels que le pH, la conductivité, la DCO, la teneur en métaux lourds, etc ;

➤ **Service microbiologique** : Organisé en **trois sections spécialisées**, ce service permet de mener les analyses microbiologiques dans des conditions maîtrisées :

Préparation : Élaboration des milieux de culture et préparation des réactifs nécessaires.

Ensemencement : Mise en culture des échantillons pour l'identification et le dénombrement des micro-organismes.

Incubation : Stockage des cultures dans des incubateurs régulés selon les températures spécifiques aux souches recherchées.

➤ **Chambre d'échantillothèque** : Espace réservé au stockage temporaire des échantillons, assurant leur conservation dans des conditions appropriées en vue de leur suivi et de la traçabilité des résultats ;

➤ **Chambre de stockage des produits** : Zone destinée à la conservation des réactifs chimiques, consommables et milieux de culture, dans des conditions de température, d'humidité et de sécurité optimales ;

➤ **Laverie** : Local affecté au nettoyage, à la stérilisation et à la désinfection du matériel de laboratoire, assurant le maintien de conditions d'hygiène strictes et la prévention des contaminations croisées.

II.2. Matériel

Les analyses physico-chimiques des boues ont été réalisées à l'aide d'un ensemble d'équipements modernes et adaptés, permettant d'assurer la précision, la fiabilité et la reproductibilité des résultats. Les principaux utilisés sont les suivants :

Verreries	Appareils
Boite de pétri	pH-mètre avec électrode combinée
Eprouvettes de 10 , 25 et 500 ml	Balance de précision
Bécher	Agitateur magnétique
Ballon a fond rond	plaque chauffante
Burette	étuve à 105°C et 120°C
Pipette	bain-marie
Erlenmeyer	Tamis
Fiole	Spectrophotomètre
Entonnoir	Réfrigérateur

II.3. Mode de prélèvement

Le point de prélèvement des échantillons a été défini à la sortie de l'unité de déshydratation des boues, correspondant à l'étape finale du traitement des boues au sein de la station d'épuration. Ce choix permet de disposer d'un matériau représentatif des boues prêtes à la valorisation ou à l'élimination. Les échantillons collectés ont ensuite été soumis à une série d'analyses physico-chimiques rigoureuses, effectuées au sein du laboratoire d'analyses qualité, selon des protocoles normalisés garantissant la fiabilité et la reproductibilité des résultats.



Figure 6: point de prélèvement (ONA)

II.4. Préparation des échantillons des boues

Les échantillons de boues ont été préparés selon un protocole standardisé, visant à homogénéiser la matière avant les essais expérimentaux. Les étapes successives sont décrites comme suit :

- **Lavage** : Une masse de 1,5 kg de boue brute a été lavée avec 3 litres d'eau distillée afin d'éliminer les impuretés solubles et les matières en suspension non fixées ;
- **Filtration** : Le mélange obtenu a été filtré à l'aide d'un papier filtre de laboratoire, permettant la séparation de la phase solide ;
- **Séchage** : Le résidu solide a été séché dans une étuve à 105 °C pendant 12 heures pour éliminer l'humidité résiduelle ;
- **Tamiséage** : La boue sèche a ensuite été tamisée à 200 μm , afin d'obtenir une poudre homogène à granulométrie contrôlée, adaptée aux traitements chimiques ;
- **Traitement alcalin** : La poudre tamisée a été mélangée avec des solutions de NaOH à différentes concentrations (1 M, 2 M et 4 M), dans le but de modifier les propriétés chimiques de la matrice (activation alcaline) ;
- **Activation thermique sous agitation** : Le mélange a été placé sur une plaque chauffante à 70 °C, sous agitation constante, afin de favoriser la réaction chimique entre la boue et l'hydroxyde de sodium ;
- **Séchage final** : Après traitement, le mélange a été de nouveau séché dans une étuve à 105 °C pendant 5 heures, pour stabiliser la phase solide obtenue ;
- **Ajustement du pH** : Enfin, le pH du matériau a été ajusté à une valeur comprise entre 5,6 et 6,2 à l'aide de vinaigre blanc (acide acétique dilué), afin d'obtenir une matrice chimiquement neutre ou légèrement acide, selon les exigences expérimentales.



Figure 7 : Lavage des boues



Figure 8 : Filtration des boues



Figure 9 : Séchage des boues et agitation des boues

II.5. Les analyses physico-chimiques des Boues

Les analyses ont été réalisées au sein du laboratoire d'analyses qualité Rayhane, garantissant la fiabilité des résultats grâce à l'utilisation d'équipements certifiés et de protocoles normalisés.

II.5.1. Les analyses physiques de sol

A. Détermination du pH des boues (méthode AFNOR NF X31-103)

La mesure du pH a été réalisée conformément à la norme **AFNOR NF X31-103**, spécifiquement adaptée aux matières solides et semi-solides telles que les boues. Le protocole suivi est détaillé comme suit :

- Prélever 10 g de l'échantillon de boue sèche et homogène ;
- Disperser l'échantillon dans 50 mL d'eau distillée ou d'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/L, utilisée pour stabiliser les ions en solution et améliorer la reproductibilité de la mesure ;
- Agiter mécaniquement la suspension pendant 30 minutes afin d'assurer un contact homogène entre la phase solide et le liquide ;
- Laisser la suspension au repos pendant 2 heures, afin de permettre la séparation des phases et l'équilibrage du pH en solution ;
- Le pH est mesuré dans la phase liquide surnageant à l'aide d'un pH-mètre calibré, selon les procédures standards d'étalonnage (avec solutions tampon pH 4, 7 et 10).



Figure10 : pH mètre (photo originale, 2025)

II.5.2. Les analyses chimiques

A. Détermination de la matière organique par la méthode de Walkley-Black (Québec)

Cette méthode repose sur l'oxydation du carbone organique présent dans l'échantillon à l'aide d'un excès de dichromate de potassium ($K_2 Cr_2 O_7$) en milieu acide sulfurique, suivie d'un titrage de l'excès de réactif par une solution de sulfate ferreux. Elle permet de déterminer indirectement la teneur en matière organique en suivant le protocole suivant :

- Introduire 0,5 g de boue sèche et homogène dans un Erlenmeyer de 250 mL ;
- Ajouter successivement 10 mL de dichromate de potassium ($K_2 Cr_2 O_7$) 1 N, puis 20 mL d'acide sulfurique concentré ($H_2 SO_4$) ;
- Agiter vigoureusement pendant 1 minute, puis laisser le mélange reposer pendant 30 minutes à température ambiante pour assurer l'oxydation du carbone organique,
- Ajouter dans le mélange : 100 mL d'eau distillée, puis 10 mL d'acide orthophosphorique ($H_3 PO_4$), et enfin 2 mL de solution indicatrice de diphenylamine (coloration initiale violette/bleue) ;
- Titrer l'excès de dichromate de potassium avec une solution de sulfate ferreux ($FeSO_4$) 0,5 N, jusqu'à apparition d'une coloration verte, indiquant la fin de la réaction.

Calculs

Le carbone organique (C) est déterminé selon l'équation :

$$C (mg) = (V_{blanc} - V_{échantillon}) \times N \times 4$$

Où :

V_{blanc} : Volume de $FeSO_4$ consommé pour le blanc (mL) ;

Chapitre II : Matériel et Méthodes

N = normalité du FeSO_4 (0,5 N)

1 mL de $\text{K}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$ 1 N = 4 mg de carbone.

La teneur en matière organique (MO) est ensuite obtenue par la formule :

$$\text{MO (\%)} = \text{C (\%)} \times 1,72$$

B . Détermination du phosphore assimilable

La détermination du phosphore assimilable se fait par méthode d'extraction à l'oxalate d'ammonium et dosage par spectrophotométrie (**NF X 31-116**), *le phosphore assimilable*, représentant la fraction biodisponible pour les plantes, est extrait à l'aide d'oxalate d'ammonium, puis dosé colorimétriquement par la méthode de l'acide ascorbique.

Le dosage se fait par deux étapes :

➤ Extraction

Peser 4 g de boue préalablement tamisée à 2 mm, puis introduire l'échantillon dans un flacon d'agitation de 150 mL ;

Ajouter 100 mL de solution d'oxalate d'ammonium 0,2 N ;

Placer le flacon sur un agitateur culbuteur et agiter pendant 2 heures pour assurer une extraction optimale du phosphore assimilable ;

Filtrer la suspension à l'aide d'un papier filtre qualitatif, en recueillant le filtrat pour le dosage.

➤ Dosage colorimétrique

Le dosage est effectué sur 10 mL du filtrat, dans des tubes à essai, selon le protocole suivant :

- Prélever 1,5 mL de la solution extraite (ou moins, si forte teneur en phosphates) ;
- Ajouter successivement : 2 mL de réactif sulfo-molybdique, puis 6,5 mL de solution d'acide ascorbique ;
- Bien agiter le mélange pour homogénéiser la coloration ;
- Chauffer les tubes au bain-marie bouillant pendant 10 à 12 minutes, afin de développer la coloration ;
- Laisser les tubes refroidir à température ambiante ;
- Mesurer l'absorbance à 825 nm à l'aide d'un spectrophotomètre ;

Chapitre II : Matériel et Méthodes

- La concentration en phosphore est déterminée par lecture sur une courbe d'étalonnage.

Calcul :

$$P_2 O_5 \text{ (ppm)} = (X \times U \times V) / (P \times v) = (X / 6) \times 1000$$

Avec :

X : concentration lue sur le graphe ;

U : volume de solution utilisée ;

v : volume de la prise d'essai ;

V : volume de la solution d'extraction ;

P : poids de la prise d'essai

C . Détermination du potassium assimilable

La détermination du potassium assimilable se fait par la méthode à l'acétate d'ammonium (*AFNOR X31-108 ; ORSTOM, Bondy – France*). Le potassium assimilable représente la fraction échangeable du potassium dans le sol ou les boues, directement disponible pour les plantes. L'extraction s'effectue à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium, suivie d'une quantification par spectrophotométrie ou photométrie de flamme.

➤ Extraction du potassium échangeable

- Prélever 5 g d'échantillon de terre fine ou de boue tamisée ;
- Introduire l'échantillon dans une fiole agitatrice de 200 mL, puis ajouter 50 mL de solution d'acétate d'ammonium 1 N (pH ~7) ;
- Agiter mécaniquement pendant 1 heure pour permettre l'extraction des cations échangeables, notamment le potassium ;
- Filtrer la suspension dans une fiole jaugée de 50 mL, puis compléter au trait avec de l'eau distillée (ou de l'acétate d'ammonium).

➤ Préparation de la gamme d'étalonnage

- Solution mère : Chlorure de potassium (KCl) à 1000 ppm ;
- Solution fille à 100 ppm : Prélever 10 mL de la solution mère et compléter à 100 mL

avec de l'eau distillée ;

- Solutions d'étalonnage : Préparer les concentrations suivantes dans des fioles jaugées de 100 mL : 0,5 ppm, 1 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 8 ppm, 12 ppm, 20 ppm ; en diluant la solution fille avec de l'eau distillée ou de l'acétate d'ammonium.

➤ Dosage

Le dosage du potassium extrait s'effectue généralement par photométrie de flamme ou spectrométrie d'émission atomique, en comparant les absorbances des échantillons à la courbe d'étalonnage.

La concentration en potassium est exprimée en méq/100 g de sol selon la formule suivante :

$$K \text{ (meq/100g de sol)} = (R \times V \times 100) / (1000 \times P \times 39)$$

R : concentration en K (mg/L) lue sur la courbe d'étalonnage ;

V : volume d'extrait (50 mL) ;

P : masse d'échantillon (5 g) ;

39 : poids atomique du potassium (K).

D . Détermination de la teneur en azote total – Méthode de Kjeldahl

La méthode de **Kjeldahl** est une méthode classique utilisée pour la détermination de l'azote total dans les échantillons organiques (sols, boues, matières organiques). Elle se déroule en trois étapes principales : **digestion**, **distillation** et **titration**.

➤ Digestion

Objectif de cette étape est de transformer l'azote organique en ion ammonium (NH_4^+) en milieu acide et oxydant.

- Peser 2 à 5 g de l'échantillon (sol ou boues) dans un matras de Kjeldahl.
- Ajouter 2 g d'un mélange catalyseur (généralement sulfate de potassium + sulfate de cuivre ou sélénium) et 20 mL d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4).
- Chauffer sous une hotte aspirante jusqu'à l'ébullition.
- Poursuivre la digestion jusqu'à obtention d'un liquide clair et incolore (ce qui peut prendre entre 1h et 2h selon la matrice).
- Laisser refroidir, puis transférer quantitativement dans une fiole jaugée de 100 mL.

Chapitre II : Matériel et Méthodes

- Compléter au trait avec de l'eau distillée.

➤ Distillation

Objectif de cette étape est de libérer l'ammoniac (NH_3) par alcalinisation, puis le piéger dans une solution acide.

- Prélever 20 mL de la solution digérée ;
- Introduire ce volume dans un ballon de distillation ;
- Ajouter successivement : 50 mL de soude (NaOH) à 40 % puis 50 mL d'eau distillée ;
- Mettre en route l'unité de distillation Kjeldahl ;
- Recueillir l'ammoniac distillé dans un bécher contenant 30 mL d'acide borique à 4 % auquel on ajoute quelques gouttes d'un indicateur mixte (rouge de méthyle + bleu de bromothymol) ;
- Continuer la distillation jusqu'à obtention d'environ 100 mL de distillat.

➤ Titration

L'objectif de cette étape est de quantifier l'azote par titration de l'ammoniac capturé.

- Titrer le distillat avec de l'acide sulfurique ou chlorhydrique 0.05 N, jusqu'au virage de couleur du vert au violet ;
- Réaliser un blanc (témoin) en suivant la même procédure sans échantillon, pour corriger le volume d'acide consommé par les réactifs seuls.

Calcul:

$$\text{N\%} = ((v-v') \times N \times 14 / p \times 10) \times fd$$

v : volume d'acide consommé pendant la titration de l'échantillon ;

v' : volume du témoin ;

N : la normalité de l'acide utilisé pour la titration ;

P : poids de l'échantillon ;

Fd : facteur de dilution ;

E . Détermination des teneurs en chaux (CaO) et en magnésie (MgO)

La détermination se fait par la méthode de titration complexométrique à l'EDTA (

: AQS DQC-DR-P-0001 – Iron Ore Sample Collection for Chemical and Physical Testing) en suivant le protocole suivant :

Chapitre II : Matériel et Méthodes

- Peser 0,5 g de boue dans un bécher résistant à l'acide ;
- Ajouter 25 mL d'acide chlorhydrique concentré (HCl 37 %) ;
- Chauffer doucement sur une plaque chauffante jusqu'à dissolution complète ;
- Ajouter 10 mL d'acide nitrique (HNO₃). Le dégagement de fumées oranges indique l'oxydation des matières organiques ;
- Ajouter ensuite 10 mL d'acide perchlorique (HClO₄) jusqu'à l'apparition d'un précipité blanc (indiquant la précipitation de certaines impuretés) ;
- Ajouter 10 mL d'eau distillée ;
- Filtrer la solution obtenue pour éliminer les résidus insolubles ;
- Transférer le filtrat dans une fiole jaugée de 250 mL et compléter au trait avec de l'eau distillée.

➤ Détermination de la chaux (CaO)

- Prélever 25 mL de l'aliquote préparée ;
- Ajouter 2 g de NH₄ Cl et 10 mL de NH₄ OH ;
- Chauffer la solution sur plaque pour évaporer les gaz ;
- Filtrer si nécessaire ;
- Ajouter 2 gouttes d'indicateur pnR, puis ajuster le pH avec NaOH (20 %) jusqu'à apparition d'une couleur pourpre ;
- Titrer à l'EDTA (0,01 M) jusqu'à virage de la couleur au bleu ciel.

$$\text{CaO (\%)} = (V_{\text{EDTA}} \times C_{\text{EDTA}} \times 10 \times M_{\text{CaO}}) / m_{\text{échantillon}}$$

V_{EDTA} : volume d'EDTA utilisé (mL) ;

C_{EDTA} : concentration de l'EDTA (mol/L) ;

M_{CaO} : masse molaire de la chaux (56,08 g/mol) ;

m : masse de l'échantillon (g).

➤ Détermination de la magnésie (MgO)

- Prélever 25 mL de l'aliquote ;
- Ajouter 2 g de NH₄ Cl et 10 mL de NH₄ OH, chauffer légèrement pour évaporation des odeurs ;

Chapitre II : Matériel et Méthodes

- Filtrer si nécessaire ;
- Ajouter 2 mL d'indicateur EBTet 2 mL de solution tampon ;
- Titrer à l'EDTA (0,01 M) jusqu'au virage de la couleur au bleu foncé.

$$\text{MgO (\%)} = [(V_{\text{EDTAMg}} - V_{\text{EDTACa}}) \times C_{\text{EDTA}} \times 10 \times \text{MMgO}] \times 100 / 1000 \times m$$

V_{EDTAMg} : volume total d'EDTA utilisé pour Ca + Mg ;

V_{EDTACa} : volume d'EDTA utilisé pour Ca seul ;

M_{MgO} : masse molaire de MgO (40,30 g/mol) ;

m : masse de l'échantillon (g).

F . Détermination du calcaire total

La détermination du calcaire total a été fait par la méthode du calcimètre de Bernard (**Référence : Norme AFNOR - Méthode calcimétrique**). Cette méthode repose sur la réaction entre le carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans l'échantillon et l'acide chlorhydrique (HCl), qui dégage du dioxyde de carbone (CO_2). Le volume de gaz produit est proportionnel à la teneur en carbonate de calcium, et est mesuré à l'aide d'un calcimètre de Bernard

- Peser 1 g (ou 0,5 g selon la teneur présumée) d'échantillon.
- Introduire l'acide HCl dans le tube sans le verser sur l'échantillon.
- Connecter l'erenmeyer au calcimètre et équilibrer les niveaux d'eau.
- Verser l'acide sur l'échantillon et agiter énergiquement.
- Lire le volume de gaz (V1) après stabilisation.
- Répéter avec 0,2 g de CaCO_3 pur pour obtenir V2.

Calcul :

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (V1 \times 0,2 \times 100) / (P \times V2) = (V1 \times 20) / (P \times V2)$$

Avec :

V1 = volume de gaz de l'échantillon,

V2 = volume du témoin,

P = poids de l'échantillon.

II.6. Test de valorisation agricole des boues

Dans cette section, un test de valorisation agricole des boues issues de la STEP de l'ONA a été réalisé afin d'évaluer leur potentiel en tant qu'amendement organique. Deux mélanges de proportions différentes ont été préparés pour chaque échantillon, à savoir :

Chapitre II : Matériel et Méthodes

- **Mélange 1** : 50 % de boue + 50 % de sol
- **Mélange 2** : 25 % de boue + 75 % de sol

Le matériel végétal utilisé dans cette expérimentation est **la tomate (*Solanum lycopersicum*)**, en tant qu'espèce modèle représentative des cultures maraîchères. Ces essais ont pour objectif d'observer l'effet des boues sur la croissance des plantes, ainsi que leur éventuelle toxicité ou leur capacité fertilisante.



Figure 11 : préparation des boues (photo origine . 2025)

Chapitre III :

Résultats et Discussion

I. Les analyses physico-chimiques des boues

I.1. Les analyses physiques

II.1.2. Détermination le pH

La variation du pH des boues urbaines traitées par NaOH reflète l'influence directe de la concentration molaire de l'hydroxyde de sodium sur les caractéristiques physico-chimiques du substrat. Cette variation influe significativement sur la biodisponibilité des nutriments et la sécurité d'usage en agriculture. Le traitement à 3M NaOH induit un milieu fortement basique (pH = 10,92), ce qui favorise la précipitation de certains éléments nutritifs tels que le phosphore sous forme de phosphates peu solubles, réduisant ainsi leur assimilation par les plantes **(FAO, 2005)**. Cependant, un tel pH élevé peut présenter un intérêt agronomique dans le cadre d'un amendement destiné à des sols acides, en contribuant à l'élévation du pH du sol et à la neutralisation de la toxicité liée à l'aluminium échangeable. À l'opposé, le traitement à 1M NaOH aboutit à un pH légèrement acide (5,79), ceci pourrait être expliqué par la réaction des métaux existant dans la boue avec les ions hydroxydes en produisant des complexes d'hydroxydes de métal et des ions H^+ , ces résultats induit à un risque accru de relargage de métaux lourds, notamment le cadmium ou le plomb, et pouvant générer des effets phytotoxiques lors de l'application au sol **(Bouldin et al., 2004)**. Seul le traitement à 2M NaOH permet d'atteindre un pH neutre (7,31), considéré comme optimal pour la majorité des cultures, car il maximise la disponibilité des macro- et micronutriments tout en maintenant la stabilité chimique et biologique du sol **(INRA, 2002)**. Ainsi, le pH des boues traitées constitue un paramètre déterminant dans leur valorisation agronomique, et son ajustement est essentiel pour éviter les effets délétères sur les écosystèmes cultivés.

Tableau II : Résultats des valeurs de pH pour les trois échantillons

Echantillon	Avant traitement	1M	2M	3M
pH	6,5	5.75	7.31	10.92

I.2. Analyses chimiques

I.2.1. Détermination de la matière organique (MO)

La matière organique (MO) représente un composant fondamental des sols, jouant un rôle clé dans le cycle du carbone, la fertilité biologique et la structure physique du sol. Son analyse dans les boues traitées au NaOH révèle une influence directe de la concentration molaire sur la qualité agronomique finale du produit. L'échantillon traité avec 1M NaOH présente une teneur en MO exceptionnelle de 72,40 %, largement supérieure au seuil de 30 % requis par la norme **NF U 44-051** pour être classé comme amendement organique stabilisé. Une telle richesse en matière organique confère au substrat un fort potentiel pour améliorer la structure des sols, stimuler l'activité microbienne et renforcer la capacité de rétention en eau et en nutriments, qualités particulièrement recherchées pour la réhabilitation des sols pauvres ou dégradés (**INRA, 2002 ; FAO, 2005**).

Le traitement à 2M NaOH, avec une teneur de 43,10 %, reste dans la gamme des valeurs considérées comme optimales pour des composts stabilisés ou fumiers mûrs. Ce niveau permet un apport équilibré de carbone organique tout en limitant les risques de fermentation, contribuant à une bonne stabilité biologique et à une efficacité agronomique durable (**Garg & Gupta, 2021**).

À l'opposé, le traitement avec 3M NaOH induit une chute significative de la MO à 13,79 %, insuffisante pour une valorisation organique selon les standards établis. Ce niveau bas de matière organique réduit fortement le bénéfice agronomique potentiel, notamment en ce qui concerne l'amélioration de la structure du sol et le maintien de la biodiversité microbienne, rendant ce traitement peu recommandé pour une application directe en agriculture (**Bouldin et al., 2004 ; Müller-Stöver et al., 2018**).

Tableau III: Résultats des valeurs de la matière organique pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
M.O %	72.40	43.1	13.79

I 2. 2 Détermination de l'azote

L'azote (N) est un élément majeur de la nutrition végétale, indispensable à la synthèse des acides aminés, des protéines, des enzymes et à la formation de la chlorophylle. Sa présence en quantité suffisante dans les amendements organiques est un indicateur fondamental de leur potentiel fertilisant. Les résultats obtenus révèlent que le traitement à 2M NaOH génère la teneur en azote la plus élevée (0,82 %), ce qui place cet échantillon parmi les boues les plus intéressantes du point de vue agronomique et nutritif. Cette valeur est cohérente avec les standards des engrais organiques efficaces, qui doivent pouvoir répondre à une partie des besoins azotés des cultures, notamment au cours des phases de croissance végétative rapide (FAO, 2006 ; Montemurro et al., 2010).

L'échantillon 3M NaOH, avec 0,49 %, constitue un apport intermédiaire, encore acceptable pour certaines cultures peu exigeantes ou en complément d'autres sources fertilisantes. À l'inverse, le traitement à 1M NaOH affiche une teneur en azote plus faible (0,41 %), ce qui peut sembler paradoxal compte tenu de sa richesse en matière organique. Ce phénomène peut s'expliquer par la forme majoritairement organique et non minéralisée de l'azote (Brennan et al., 2012).

Tableau IV : Résultats des valeurs de l'azote pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
N % (g/100g de boue)	0.41	0.82	0.49

I .2.3 Détermination de phosphore

Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel au bon développement des plantes, en particulier pour la formation des racines, la floraison et la fructification. Dans les amendements organiques, sa forme et sa biodisponibilité dépendent fortement de la nature chimique des composés phosphorés. Les résultats expérimentaux indiquent une augmentation progressive du phosphore soluble avec l'élévation de la concentration en NaOH : 0,49 mg/L pour l'échantillon 1M, 1,87 mg/L pour 2M, et 2,59 mg/L pour 3M. Cette évolution traduit une mobilisation croissante du phosphore au fur et à mesure de la désorganisation de la matrice organique.

Tableau V : Résultats des valeurs de phosphore pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
Phosphore (mg/L)	0,49	1.87	2.59

I.2.4 MgO

Les résultats présentés dans le tableau mettent en évidence des variations significatives des teneurs en oxyde de magnésium (MgO) entre les différents traitements. L'échantillon traité avec 2M NaOH affiche la concentration la plus élevée en MgO (2,3 %), suivi par l'échantillon 1M NaOH (1,5 %), tandis que le traitement 3M NaOH présente la valeur la plus faible (0,8 %). Le magnésium, sous forme d'oxyde (MgO), joue un rôle clé dans la photosynthèse, en tant que constituant central de la molécule de chlorophylle (**Marschner, 2012**). Ainsi, une teneur élevée en MgO, comme observée dans l'échantillon 2M, peut améliorer l'efficacité photosynthétique et répondre aux besoins des sols carencés en magnésium. Les concentrations observées dans 1M (1,5 %) restent bénéfiques, bien que moindres, tandis que 3M (0,8 %) pourrait présenter un intérêt agronomique limité sous cet aspect. Toutefois, l'apport de magnésium doit être évalué dans le cadre d'un équilibre global des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), afin d'éviter des interactions antagonistes pouvant nuire à l'absorption racinaire, comme l'ont souligné plusieurs études sur la dynamique des éléments nutritifs dans les sols (**Fageria, 2001** ; **Mengel & Kirkby, 2001**). Ces résultats soulignent donc l'importance d'un dosage adapté du MgO pour garantir une disponibilité optimale tout en évitant les déséquilibres nutritionnels.

Tableau VI : Résultats des valeurs de MgO pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
MgO %	1.5	2.3	0.8

I.2.5 Potassium

Les résultats obtenus montrent des concentrations très élevées en potassium (K) dans les extraits analysés, avec une valeur maximale enregistrée dans l'échantillon 3M (159,16 %), suivie de l'échantillon 1M (142,53 %) et enfin de 2M (120,96 %). Ces valeurs dépassent largement les teneurs attendues pour un engrais organique, qui se situent généralement entre 1 % et 5 % en matière sèche (**Bernal et al., 2009** ; **Zheljaskov 2004**).

Chapitre III : Résultats et Discussion

Cette forte disponibilité peut être attribuée à solubilisation accrue en milieu acide, qui favorise la libération du potassium échangeable et soluble (**Zörb et al., 2014**). Le potassium est un élément essentiel pour la plante, impliqué dans la régulation osmotique, la résistance aux stress abiotiques et la qualité des fruits et tubercules (**Marschner, 2012**). Ainsi, la teneur élevée observée dans l'échantillon 3M pourrait représenter un avantage agronomique important, à condition que l'équilibre ionique global (notamment avec Ca^{2+} et Mg^{2+}) soit préservé pour éviter les antagonismes nutritionnels.

Tableau VII : Résultats des valeurs de potassium pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
K %	142.53	120.96	159.16

I.2.6 Calcaire

L'analyse des teneurs en carbonate de calcium (CaCO_3) révèle une présence exclusivement dans l'échantillon 2M, avec une concentration de 1,5 %, tandis que les échantillons 1M et 3M n'en contiennent aucune quantité détectable. Le carbonate de calcium est couramment utilisé comme amendement calcaire pour corriger l'acidité des sols (**Fageria & Baligar, 2008**). Bien que la teneur reste relativement modeste, elle confère au traitement 2M une certaine polyvalence, en lui permettant de jouer à la fois un rôle nutritif et un rôle correctif vis-à-vis du pH. L'absence de carbonate de calcium dans les traitements 1M et 3M suggère que les conditions de traitement ou les caractéristiques initiales du substrat n'étaient pas favorables à la préservation ou à la formation de CaCO_3 . Ce résultat souligne l'importance du protocole d'extraction et du pH de traitement dans la stabilité des carbonates, souvent sensibles à la dissolution en conditions acides ou à la précipitation en milieux basiques (**McBride, 1994**).

Tableau VIII : Résultats des valeurs de calcaire pour les trois échantillons

Echantillon	1M	2M	3M
CaCO_3 %	0	1.5	0

Conclusion

Conclusion

Les boues industrielles, issues de divers procédés de traitement des eaux usées, notamment celles générées par la station d'épuration (STEP) ONA de Beni Mered (wilaya de Blida), représentent un sous-produit dont la valorisation constitue une alternative écologique et économique prometteuse. Leur utilisation en tant qu'amendement organique permet non seulement de limiter les impacts environnementaux liés à leur accumulation, mais également de restituer aux sols des nutriments essentiels à la croissance des plantes.

Toutefois, leur application directe en agriculture demeure délicate en raison de la possible présence de contaminants ou de composés inhibiteurs. Un traitement préalable s'avère donc nécessaire pour stabiliser la matière, améliorer sa qualité chimique et garantir sa sécurité d'usage. Parmi les procédés de traitement les plus efficaces figure l'alcalinisation à l'aide de l'hydroxyde de sodium (NaOH). Ce traitement permet de neutraliser les substances acides, de réduire la charge pathogène et de favoriser la solubilisation des éléments nutritifs tels que l'azote (N) et le phosphore (P), les rendant plus biodisponibles pour les végétaux.

Les résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail ont mis en évidence une amélioration significative de la germination et de la croissance des plantes dans les substrats amendés avec des boues traitées au NaOH, en comparaison aux échantillons non traités. Ces observations confirment l'intérêt agronomique de cette approche et ouvrent des perspectives intéressantes en matière de gestion durable des déchets industriels.

Les principaux atouts de la valorisation des boues industrielles par traitement alcalin peuvent être résumés comme suit :

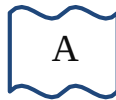
1. **Gestion durable des déchets** : La transformation des boues en intrants agricoles permet de réduire leur volume, tout en évitant des méthodes d'élimination coûteuses et polluantes telles que l'incinération ou l'enfouissement.
2. **Amélioration de la fertilité des sols** : Grâce à leur richesse en nutriments, notamment en azote, phosphore, magnésium et potassium, les boues traitées favorisent une meilleure structure et productivité des sols.

Conclusion

3. **Réduction de la dépendance aux engrais chimiques** : En substituant partiellement les fertilisants de synthèse, cette approche contribue à diminuer les impacts environnementaux liés à leur fabrication et à leur usage intensif.
4. **Avantage économique pour les agriculteurs** : L'utilisation de boues traitées comme amendement constitue une solution économique, susceptible de réduire les coûts d'exploitation tout en maintenant de bonnes performances agronomiques.

En conclusion, la valorisation des boues industrielles après traitement chimique au NaOH s'inscrit dans une stratégie d'économie circulaire et de transition agroécologique, conciliant gestion des déchets, protection de l'environnement et soutien à une agriculture plus résiliente.

Références bibliographiques



Agence de l'eau. (2016). *Les boues de stations d'épuration : données générales et valorisation*. Ministère de l'Environnement, France.

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>

Agence de l'Eau Seine-Normandie. 2016. *Gestion des sédiments : Guide méthodologique pour l'élaboration des projets de dragage*. Nanterre : Agence de l'Eau Seine-Normandie. <https://www.eau-seine-normandie.fr>

Agence de l'Eau (2016). *Évaluation de la qualité des boues urbaines et de leur valorisation*.

Agence de l'eau. (2016). Qualité des boues recyclées des stations d'épuration urbaines bassins Rhône Méditerranée et Corse : Évolution de 2000 à 2014 [En ligne]. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2-4 allée de Lodz, 69363 Lyon cedex 07. Disponible sur : www.eaurmc.fr (consulté le 02/02/2018).



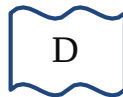
Bouldin, D.R., Klausner, S.D. & Kowal, N.E. (2004). *Agronomic use of municipal sludge*. Journal of Environmental Quality

Brennan, R.B. et al. (2012). *Impact of pH and ammonia loss during sludge treatment*. Journal of Environmental Management.

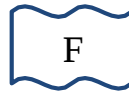
Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., & Billen, G. (2013). *Human alteration of the global phosphorus cycle*. Earth System Science Data.

Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453.

Références bibliographiques



Dudkowski, D. (2000). *Les boues d'épuration et leur traitement thermique*. Éditions Techniques de l'Ingénieur.



Fageria, N. K. (2001). *Nutrient interactions in crop plants*. Journal of Plant Nutrition, 24(8), 1269–1290.

FAO (2005). *Fertilizer use by crop*. FAO Soils Bulletin, Rome.

FAO (2005). *Organic Matter in Soils*. FAO Soils Bulletin.

FAO (2006). *Plant nutrition for food security*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin.

Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2022). **Sewage sludge management: A review on technologies and energy potential**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112375.

Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116–140.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>



Guibelin, Éric. 2014. *Valorisation des sédiments de dragage : état de l'art et perspectives*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/dechets-liquides-et-solides-42671210/valorisation-des-sediments-de-dragage-g1010/>

García-Delgado, M., et al. (2012). Degradation of hydrocarbons and heavy metal bioavailability in diesel-polluted soil remediated by composting. *Environmental Research*, 116, 1–7.

Garg, A. & Gupta, A. (2021). *Valorization of sewage sludge for agriculture*. Environmental Research, Elsevier.



INRA (2002). *Les matières organiques dans les sols agricoles : rôles, effets et gestion*. Éditions Quae.



Juven, B., et al. (2014). *Traitement des eaux usées : mécanismes et enjeux environnementaux*. Éditions universitaires européennes.

Jardé, E. (2002). *Les matières en suspension dans les boues : méthodes de caractérisation et enjeux environnementaux*. Revue des Sciences de l'Eau, 15(2), 231–245.



Kelessidis, A., & Stasinakis, A. S. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in EU member states. *Waste Management*, 32(6), 1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>



Lema, J. M., Martínez, S. S., & Omil, F. (2021). **Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy and the Environment**. IWA Publishing.

Lu, Q., He, Z. L., & Stoffella, P. J. (2015). Land application of biosolids in the USA: A review. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012, Article ID 201462. <https://doi.org/10.1155/2012/201462>

Références bibliographiques



Metahri, D. (2012). *Caractérisation physico-chimique et biologique des boues d'épuration urbaines dans une station de traitement des eaux usées : cas de la STEP de Sétif*. Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas – Sétif 1.

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery** (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Metahri, D. (2012). *Caractérisation physico-chimique et biologique des boues d'épuration urbaines : valorisation en agriculture et impacts environnementaux*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.

Montemurro, F., Diacono, M., & Convertini, G. (2010). *Use of organic amendments in integrated nutrient management*. Agronomy for Sustainable Development

Marschner, H. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.

Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers.

McBride, M. B. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.



NF EN 12879. (2000). *Caractérisation des boues — Détermination de la perte au feu de la matière sèche*. AFNOR.



Sahlström, L., Aspan, A., Bagge, E., Danielsson-Tham, M. L., & Albiñ, A. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, 38(8), 1989–1994. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.031>

Références bibliographiques

Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*, 35(1), 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.009>

SPDE. (2006). *Stratégie de gestion des boues d'épuration municipales au Québec*. Société de Protection des Données Environnementales.

Su, D. C., Wong, J. W. C., & Wong, M. H. (2004). Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with ash-stabilized sewage sludge. *Environmental International*, 29(7), 895–902. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00101-1)

Sedki, K. (1995). *Étude rhéologique des boues résiduelles urbaines : application à l'optimisation de la déshydratation*. Thèse de doctorat, INSA Lyon.

Singh, R. P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347–358

Su, D. C., et al. (2004). **Nutrient content of municipal sludge and its impact on soil fertility and crop yield**. *Bioresource Technology*, 95(3), 329–334.

Sahlström, L., et al. (2004). **Microbial pathogens in sewage sludge: Standards, treatment and monitoring**. *Waste Management & Research*, 22(1), 79–85.

Sharpley, A.N. et al. (2003). *Phosphorus loss from land to water*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology.



Vecteur Environnement. (2007). *Guide technique sur la gestion des boues d'épuration municipales*. Québec : Vecteur Environnement inc.



Références bibliographiques

Wang, M., et al. (2020). Recent advances in sludge treatment and disposal. *Journal of Environmental Management*, 275, 111243.

Warman, P. R., Termeer, W. C., & McLaughlin, N. B. (2005). Sewage sludge characteristics and land application in agriculture. *Biocycle*, 46(9), 62–65.

Werther, J., & Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1), 55–116. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)

Warman, P. R., et al. (2005). **Land application of sewage biosolids: Effects on soil and crop quality**. *Sci. Total Environ.*, 357(1–3), 119–133.



Zheljazkov, V. D., & Warman, P. R. (2004). Application of high rates of municipal biosolids in soil: Effects on soil and element uptake by crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(17–18), 2861–2884.

Zhou, Z., He, P., & Shao, L. (2020). Sludge alkaline treatment for stabilization and resource recovery: Advances and prospects. *Bioresource Technology*, 303, 122897.

Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669.

Zebarth, B. J., Neilsen, G. H., Hogue, E. J., & Neilsen, D. (2000). Influence of organic waste amendments on selected soil physical and chemical properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(3), 419–428. <https://doi.org/10.4141/S99-056>

Annexes

Annexes

Annexe I : Norme d'interprétation des analyses chimique du sol

Tableau n°01 : Norme d'interprétation pour la matière organique .

M.O %	Niveau
0.7	Sol très pauvre
0.7 - 1.5	Sol pauvre
1.5 - 3.0	Sol moyennement pauvre
3.0 - 6	Sol bien pourvu
6	Sol très bien pourvu

Tableau n°02 : classification du sol selon le ph .

ph	Qualité de sol
ph<5	Fortement acide
5<ph<5.9	Franchement acide
6<ph<6.5	Légèrement acide
6.6<ph<7.3	Neutre
7.4<ph<7.7	Légerment alcalin
ph>7.7	Alcalin

Tableau n°03 : Norme d'interprétation pour les élément nutritif .

Nature de Sol	Sol très Pauvre	Sol pauvre	Sol moyen	Sol riche	Sol très riche
Azote %	<0.05	0.05 à 0.1	0.1 à 0.15	0.15 à 0.25	>0.25
Potassium (meq /100g)	-	<0.25	0.25< K <0.5	0.5< K <1	>1

Tableau n°04 : classification des sols selon le pourcentage de calcaire (CaCO3)

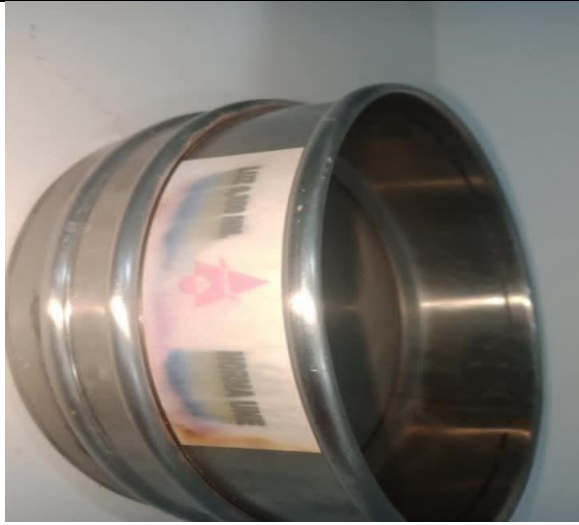
Taux de CaCO3%	Nature du sol
0 à 5	Peut calcaire
5 à 15	Moyennement calcaire
15 à 30	Calcaire
> 30	Très calcaire

Tableau n°05 : Norme d'interprétation pour le phosphore assimilable olsen

	Qualification du sol
0 - 5	Très basse
5 - 10	Basse
10 - 22	Moyen
> 22	Elevé

Annexes

Matériel biologique



Tamis



pH mètre



Agitateur magnétique



Balance de précision



bain-marie



Spectrophotomètre



Figure 26 : Matériel des analyses physico-chimiques et bactériologiques (**photos originales, 2025**)

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة البليدة (1)
Université Blida (1)



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master dans le domaine SNV

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Option : Ecosystèmes Aquatiques

Thème

*Valorisation biologique des boues de la station d'épuration de
« BENI MERED » optimisation du procédé.*

Présenté par :

Soutenu le : 22/06/2025

Choucha sarah

Allal selma

Devant le jury:

Mme ELMAHDI.I

MAA/USDB1

Présidente

Mme BOULAHIA.I

MCA/USDB1

Examinatrice

Mme OURIACHE.H

MCB/USDB1

Promotrice