

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Sciences de la Mer

Domaine :

- Aménagement.
- Science de la nature et de la vie.

Option :

- Environnement marin et protection des écosystèmes.
- Biotechnologie marine.

Thème :

**Évaluation de la capacité de valorisation des boues issues des
stations d'épuration par co-compostage avec des sous-
produits halieutiques**

Présenté par : **AIAD Maroua**

BENZAOUI Safa Raitha

Soutenu le 20/06/2026 devant le jury suivant :

M. KADA M.	MAA	Président
M. BOUGHRIRA A.	MAA	Encadrant
Mme CHAOU N.	MAA	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux.

Nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires à la réalisation de ce travail.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, **M. Boughrira A**, pour son suivi rigoureux et ses orientations précieuses qui ont guidé ce travail.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement **Mme Chaou N** et **Mme Amrouche L** pour leur disponibilité constante, leurs conseils avisés et le soutien indéfectible qu'elles nous ont apporté tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres de notre jury, **M. KADA M** et **Mme Chaou N**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail et pour le temps qu'ils y consacrent.*

*Notre reconnaissance va également à **Mme Houda** et **M. Noureddine**, ingénieurs de laboratoire, pour leur assistance technique de qualité. Nous remercions chaleureusement l'équipe technique de l'ENSSMAL, et tout particulièrement **M. Mustapha** et **M. Mohammed**, pour leur dévouement et leur contribution essentielle à la réussite de nos expérimentations.*

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet. Que chacun trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

AIAD Maroua et BENZAOUI Safa Raitha

Dédicace

À Allah, le Tout-Puissant et le Tout-Miséricordieux,

je rends grâce pour m'avoir guidée, soutenue et permis de surmonter les épreuves. Alhamdulillah pour Ses bénédictions.

À moi-même...

Je dédie ce mémoire à la jeune femme que j'étais au premier jour de ce parcours : celle qui avançait avec des rêves plein les yeux, mais aussi des doutes qui pesaient lourd. Je le dédie à celle que je suis devenue au fil de ces années : une femme forgée par les défis, sculptée par la persévérance, et grandie par chaque obstacle qu'elle a choisi de transformer en tremplin. Je suis fière de chaque nuit blanche traversée seule, de chaque problème technique résolu à force de ténacité, de chaque moment où j'ai failli renoncer... et où je ne l'ai pas fait. Cette résilience est désormais ma plus belle signature, et ce diplôme, ma plus belle victoire sur moi-même.

À mon binôme, BENZAOUI Safa Raïtha, Pour notre précieuse collaboration, ton soutien et cette réussite que nous partageons.

À mes parents, Rachid et Nora...

Vous êtes les fondations sur lesquelles j'ai bâti chaque rêve. Papa, tu as été ma boussole dans la tempête, ma force tranquille et silencieuse, cet homme dont la confiance en moi ne s'est jamais éteinte, même quand la mienne vacillait. Maman, tu as été mon refuge, ma lumière douce dans les nuits d'angoisse, toi dont les prières ont été mon bouclier et dont les mots ont apaisé mes tempêtes intérieures. Ce diplôme est le vôtre autant qu'il est le mien — il est le fruit de vos sacrifices que vous n'avez jamais comptés, de votre amour que vous n'avez jamais mesuré, et de cette éducation magnifique que vous m'avez offerte avec tout votre cœur. Vous êtes mon trésor le plus précieux, et tout ce que je suis, tout ce que je deviens, c'est parce que vous avez su, depuis toujours, allumer en moi une lumière que rien ne peut éteindre. Je vous aime infiniment.

À ma sœur et mes frères...

À ma sœur Safa, ma confidente celle à qui je n'ai jamais eu besoin d'expliquer ce que je ressentais, car tu l'avais déjà compris avant même que je parle, mon miroir ;

à Youcef, mon pilier discret mais solide sur lequel je me suis appuyée plus d'une fois;

et à Amir, mon fils, mon rayon de bonheur chaque jour.

Vous avez été mon équilibre face aux tempêtes, mes complices dans la joie et mes soutiens indéfectibles. Votre présence est ma force, et votre amour, mon refuge le plus précieux. Merci d'être mon essence, tout simplement.

À mes amies...

Zineb, mon alliée de cœur ; Chahinez, dont la présence fut ma constance ; et Hind, merci pour ton amitié sincère. À vous toutes qui avez porté mes doutes, partagé mes éclats de rire et illuminé mes jours sombres : votre amitié est le plus beau cadeau de ce parcours.

Maroua

Dédicace

À Allah le Tout-Puissant, dont la grâce m'a enveloppée à chaque instant de ce voyage. Merci de m'avoir accordé la foi pour croire, la force pour avancer et la lumière pour traverser les zones d'ombre.

Alhamdulillah pour Ta bienveillance infinie.

À celle que j'affronte et que je dépasse chaque jour :

***Moi-même.** Je dédie ce travail à la jeune fille hésitante du premier jour, et je célèbre la femme debout aujourd'hui. Ce parcours n'a pas seulement été académique, il a été une véritable transformation. Je suis fière d'avoir tenu bon quand tout devenait difficile, d'avoir trouvé en moi des ressources insoupçonnées, d'avoir transformé chaque doute en une certitude : celle que je suis capable de tout accomplir. Ce diplôme est le témoin de ma force, de ma ténacité et de ma renaissance.*

***À mon binôme, AIAD Maroua...** En témoignage de notre collaboration scientifique pour la réalisation de ce projet de fin d'études.*

À mon regretté grand-père, BENZAOUI ALI ...

À la mémoire de mon cher grand-père, dont le départ a laissé un grand vide, mais dont le nom et les valeurs continuent de résonner en moi. J'aurais tant aimé que tu sois là pour partager ce moment de joie, mais je sais que de là où tu es, tu veilles sur moi. Que ce succès soit un hommage à ta mémoire et que ton âme.

À mes parents...

Vous êtes mes piliers, mes repères, et les architectes de ma réussite. Papa, Omar, ton regard fier a été mon plus beau moteur, et ton soutien silencieux m'a donné des ailes lorsque je manquais de souffle. Ta confiance en moi est ma plus grande richesse. Maman, Yamina, tes prières murmurées à l'aube ont été mon plus tendre bouclier, et ton amour inconditionnel a guéri toutes mes fatigues. Tu es mon refuge de douceur. Tout ce que j'accomplis est le prolongement de vos sacrifices. Ce diplôme vous appartient, il est le reflet de votre dévouement. Je vous aime plus que les mots ne puissent le dire.

À ma famille, mes repères et mes sources de bonheur...

Je dédie ce succès à mes sœurs, Marwa, ma complice absolue, la plus proche de mon cœur, mon miroir et mon refuge dans chaque tempête, dont la présence à mes côtés est mon plus bel équilibre. À ma cousine Zineb, toi que je considère comme ma propre sœur, mon alliée de toujours, qui sait lire en moi sans que j'aie à parler et qui partage chacune de mes joies. À ma petite sœur Remas, mon rayon de fraîcheur quotidien, qui apporte tant de légèreté et de sourires dans ma vie, même dans les moments les plus chargés. À Mohamed, mon unique et petit frère, ma fierté et le protecteur de demain, dont la simple présence remplit nos vies de joie. À mes grandes sœurs, Imane et Lina, mes guides et mes exemples de toujours, dont la sagesse et la bienveillance m'ont tracé le chemin.

À mes amies d'or...

Toute ma gratitude s'adresse à Hind, mon alliée de toujours et mon binôme de cœur pendant trois belles années d'études, pour cette complicité unique, ce soutien indéfectible et tous les défis relevés main dans la main. À Manal, pour tes précieux conseils, ta douceur et tous les éclats de rire partagés qui ont illuminé mes journées sombres. Merci d'avoir été là et d'avoir rendu ce long parcours tellement plus léger. Votre amitié est une bénédiction que je garde précieusement.

À une lueur inattendue... À celui dont la présence récente a suffi à illuminer les derniers pas de ce parcours. À cette jolie évidence qui est venue, sans un bruit, adoucir la fin de mon voyage.

BENZAOUI Safa Raitha

RÉSUMÉ

Face à la production croissante de boues issues des stations d'épuration des eaux usées (STEP) et aux volumes importants de déchets du secteur halieutique, ce travail propose une valorisation intégrée inscrite dans les principes de l'économie circulaire. L'étude s'appuie sur les boues déshydratées de la STEP de Beni Messous (Alger) et sur une farine fabriquée à partir de déchets halieutiques locaux (têtes, arêtes, écailles et viscères).

Les boues présentent une siccité de 18,40 %, un pH de 7,94, une teneur en MO de 59,95 %, un NTK de 5,69 %, un phosphore total de 2,27 % et un C/N de 6,13. La farine de poisson affiche une MS de 94,14 %, un pH de 5,57, une MO de 79,36 %, des protéines brutes de 32,43 % et des lipides de 34,31 %. Les deux matrices sont conformes à la norme NA 17731 pour les ETMs, à l'exception d'une non-conformité en spores de bactéries anaérobies sulfito-réductrices (ASR) dans les boues.

Le co-compostage mené selon la méthode de Berkeley à l'échelle du laboratoire (réacteurs de 5 kg) n'a pas atteint la phase thermophile requise (55–65 °C) : la température a stagné entre 12 et 15 °C en raison d'un effet d'échelle défavorable et de conditions hivernales. Ces résultats soulignent la nécessité de respecter la masse critique minimale d'un mètre cube et d'isoler thermiquement les réacteurs.

Les essais d'adsorption ont démontré l'excellente capacité de la farine de poisson à fixer les métaux lourds : le zinc (Zn^{2+}) est totalement adsorbé (100 %) pour les deux doses testées (1 g et 3 g), tandis que le cuivre (Cu^{2+}) atteint des taux de 67,63 % et 56,25 %, avec des capacités maximales de 1,353 mg/g et 0,375 mg/g respectivement.

Ce travail démontre la faisabilité scientifique d'une valorisation circulaire des boues de STEP et des déchets halieutiques en biofertilisant organique sécurisé, tout en confirmant le potentiel de la farine de poisson comme agent de stabilisation des métaux lourds.

Mots-clés : boues de STEP · déchets halieutiques · farine de poisson · co-compostage · Berkeley · ETMs · biosorption · économie circulaire.

ABSTRACT

Facing the dual challenge posed, on the one hand, by the increasing generation of wastewater treatment plant (WWTP) sludge, and on the other hand, by the mounting volumes of fishery waste, this study proposes an integrated valorization approach based on circular economy principles, using dewatered sludge from Beni Messous WWTP (Algiers) and fishmeal produced from local fishery by-products.

Sludge showed 18.40% dry matter, pH 7.94, 59.95% OM, 5.69% NTK, 2.27% total phosphorus and C/N of 6.13. Fishmeal showed 94.14% DM, pH 5.57, 79.36% OM, 32.43% crude protein and 34.31% lipids. Both matrices complied with NA 17731 for heavy metals, except for anaerobic sulfite-reducing bacteria (ASR) spores in sludge.

The Berkeley-method co-composting trial at laboratory scale (5 kg reactors) failed to reach the thermophilic phase (55–65 °C), with temperatures stagnating between 12–15 °C due to unfavorable scale effect and winter conditions, highlighting the need for the minimum critical mass of one cubic meter.

Adsorption tests showed excellent heavy metal removal by defatted fishmeal: Zn^{2+} was fully adsorbed (100%) at both doses (1 g and 3 g); Cu^{2+} reached 67.63% and 56.25% removal with maximum capacities of 1.353 mg/g and 0.375 mg/g.

This work reveals the scientific feasibility of a circular valorization of WWTP sludge and fishery waste into a safe organic biofertilizer, while validating fishmeal as an effective heavy metal stabilization agent.

Keywords: WWTP sludge · fishery waste · fishmeal · co-composting · Berkeley · trace metals · biosorption · circular economy.

ملخص

في ظل الإنتاج المتزايد للحماة الناتجة عن محطات معالجة مياه الصرف الصحي، وحجم النفايات الكبير الناتج عن قطاع الصيد البحري، يقترح هذا العمل تثميناً متكاملًا يندرج ضمن مبادئ الاقتصاد الدائري. تعتمد الدراسة على حماة مجففة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي لبني مسوس (الجزائر)، وعلى دقيق مصنوع من نفايات الصيد المحلية (الرؤوس، العظام، القشور، والأحشاء).

تتميز الحماة بنسبة جفاف تبلغ 18.40%، ودرجة حموضة 7.94، ومحتوى من المادة العضوية 59.95%، و NTK بنسبة 5.69%، وفوسفور كلي 2.27%، ونسبة C/N تساوي 6.13. بينما يحتوي دقيق السمك على مادة جافة بنسبة 94.14%، ودرجة حموضة 5.57، ومادة عضوية 79.36%، وبروتين خام 32.43%، ودهون 34.31%. تتوافق كلتا المادتين مع معيار NA 17731 بالنسبة للعناصر المعدنية السامة، مع تسجيل حالة عدم مطابقة واحدة تخص الأبواغ البكتيرية اللاهوائية المختزلة للكبريت.

لم يصل التخليط المشترك وفق طريقة بيركلي على المستوى المخبري (مفاعلات سعة 5 كغ) إلى مرحلة الحرارة المحبة (55–65 درجة مئوية)، حيث بقيت درجة الحرارة بين 12 و15 درجة مئوية، بسبب تأثير مقياس غير ملائم وظروف شتوية. تؤكد هذه النتائج ضرورة احترام الكتلة الحرجة الدنيا البالغة مترًا مكعبًا واحدًا، وعزل المفاعلات حراريًا.

أظهرت تجارب الامتزاز قدرة ممتازة لدقيق السمك على تثبيت المعادن الثقيلة: حيث تم امتزاز الزنك كليًا (100%) للجرعتين المختبريتين (1 غ و 3 غ)، بينما بلغ امتزاز النحاس نسبتي 67.63% و 56.25%، وبأقصى قدرات امتزاز بلغت 1.353 ملغ/غ و 0.375 ملغ/غ على التوالي.

يُثبت هذا العمل الجدوى العلمية لتثمين دائري لكل من حماة محطات معالجة المياه ونفايات الصيد البحري في سماد عضوي حيوي مأمون، مع تأكيد قدرة دقيق السمك كعامل مثبت للمعادن الثقيلة.

كلمات مفتاحية: حماة محطات معالجة المياه · نفايات الصيد · دقيق السمك · تخليط مشترك · بيركلي · العناصر المعدنية السامة · الامتزاز الحيوي · الاقتصاد الدائري.

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des Abréviations	2
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS	4
I. Boues des STEP	4
I.1. Définition et Origine	4
I.2. Les types des boues	4
I.2.1. Les boues primaires	4
I.2.2. Les boues secondaires	4
I.2.3. Les boues mixtes	5
I.3. Composition des boues	5
I.3.1. Les éléments utiles	5
I.3.2. Les éléments indésirables	6
I.3.3. Les micro-organismes pathogènes	6
I.3.4. Les Éléments fertilisants	7
I.4. Mode de traitement des boues	7
I.4.1. Épaississement et déshydratation des boues	7
I.4.2. Stabilisation	8
I.4.3. Hygiénisation	8
I.4.4. Destinations finales des boues	8
I.5. Etat des lieux des boues de STEP en Algérie	10
I.6. Les normes et réglementation algérienne de l'utilisation des boues	11
II. Eléments traces métalliques	12
II.1. Définition des ETMs	12
II.2. Origine des ETMs	12
II.3. Normes	12
II.4. Les ETM dans les boues des STEP	13
III. Sous-produits de la pêche et de l'aquaculture	14

III.1. État des Lieux du Secteur Halieutique Mondial	14
III.2. Le secteur de la pêche et de l'aquaculture en Algérie.....	15
III.2.1. État de la production nationale	15
III.2.3. Aspects socio-économiques et commerce	17
III.2.4. Consommation et enjeux.....	17
III.3. Définitions et Terminologie des Déchets et Coproduits	17
III.4. Origines et Sources de Génération des Déchets.....	18
III.5. Analyse structurelle et distribution pondérale des fractions.....	20
III.6. Caractérisation nutritionnelle et propriétés biochimiques	20
III.7. Impacts environnementaux et exigences de gestion durable	21
III.8. Solutions pour une Économie Circulaire	21
III.9. Voies de valorisation et opportunités économiques des sous-produits.....	21
III.10. Mécanismes de biosorption des métaux lourds par les constituants des déchets halieutiques	22
III.10.1. Fraction organique.....	22
III.10.2. Fraction minérale	22
IV. Étude de la farine de poisson.....	23
IV.1. Historique de la farine de poisson	23
IV.2. Définition et terminologie	24
IV.3. Cadre réglementaire et normatif.....	24
IV.4. Classifications et types de farines de poisson	24
IV.5. Composition nutritionnelle des farines de coproduits.....	25
IV.6. Procédés de fabrication	26
V. Le Co-Compostage	27
V.1. Définition de Compostage.....	27
V.2. Définition de Co-Compostage.....	27
V.3. Méthode de Berkeley	27
V.3.1. Choix de la méthode.....	27
V.3.2. Présentation de la technique.....	28
V.3.3. Avantages du procédé.....	28
V.4. Potentiel de bioremédiation et stabilisation des métaux lourds.....	30
Chapitre II : Matériels et Méthodes	32
I. Présentation de la station d'épuration.....	32
II. Échantillonnage de Boues déshydratées	32
III. Échantillonnage et collecte de la biomasse de déchets halieutiques.....	32
IV. Fabrication de la farine issue de déchets halieutiques	33

V. Caractérisation physico-chimique, valeur nutritionnelle et sécurité sanitaire des matrices d'étude
35

V.1. Propriétés physico-chimiques et valeurs nutritionnelles.....	35
V.1.1. Caractérisation de l'état hydrique et des constantes physiques	35
V.1.2. Caractérisation de la composition chimique (Minérale, Organique et Métallique).....	39
V.1.3. Caractérisation biochimique et nutritionnelle.....	45
V.2. Contrôle microbiologique et innocuité sanitaire.....	55
V.2.1. Prétraitement et pasteurisation des échantillons avant co-compostage	56
V.2.2. Stérilisation de la verrerie et du matériel de laboratoire.....	56
V.2.3. Contrôle Microbiologique.....	56
V.2.3.a. Préparation des Échantillons et Dilutions Décimales.....	56
V.2.3.b. Dénombrement de la Flore Aérobie Mésophile Totale (FAMT).....	57
V.2.3.c. Recherche et Dénombrement des Coliformes (Méthode NPP).....	58
V.2.3.d. Dénombrement des Staphylocoques.....	60
V.2.3.e. Dénombrement des Levures et Moisissures	60
V.2.3.f. Recherche des Salmonelles (Salmonella)	61
V.2.3.g. Dénombrement des Spores de Bactéries Anaérobies Sulfito-Réductrices (ASR)	62
V.2.3.h. Recherche et dénombrement des œufs d'helminthes.....	63
VI. Préparation de Co-Compost : Boues de STEP et Farine issue de déchets halieutiques.....	64
VII. Essai d'adsorption et lixiviation métallique.....	69
Chapitre III : Résultats et discussions.....	72
I. Observations sur le processus de fabrication de la farine issue de déchets halieutiques	72
II. Évaluation de l'état hydrique et des constantes physiques	74
II.1. Analyse de l'humidité et taux d'hydratation	74
II.2. Mesure du pH et stabilité chimique	75
III. Évaluation de la richesse minérale, du potentiel organique et de l'innocuité environnementale.....	76
III.1.Évaluation de la richesse minérale et du potentiel organique.....	76
III.2.Évaluation de la charge métallique (Éléments Traces Métalliques).....	77
IV. Évaluation des nutriments (Azote total et Phosphore total)	79
IV.1. La teneur en Azote total	79
IV.2. La teneur en phosphore total	80
IV.3. Détermination et évaluation du Rapport C/N.....	82
V. Évaluation du profil biochimique et potentiel nutritionnel	83
V.1. Évaluation de la teneur en protéines brutes	83
V.2. Évaluation de la teneur en matières grasses brutes (fraction lipidique)	84

V.4. Estimation de l'Extractif Non Azoté (ENA)	85
VI. Contrôle microbiologique	86
VII. Synthèse Globale du Profil des Matières Premières et Conformité à l'Usage Agricole	88
VII.1.Comparaison des Boues avec les Normes (INERIS, NA 17731, NF U 44-095)	88
VII.2.Comparaison de la Farine de Poisson avec les Normes (J.O.R.A. N° 39).....	90
VIII. Évaluation du co-compostage.....	91
IX. Essai de capacité d'adsorption du Cu et du Zn par la farine de poisson.....	92
X. La validation de l'hypothèse de recherche	95
X.1. Validation de l'efficacité intrinsèque de la farine en milieu aqueux.....	95
CONCLUSION	97
Références bibliographiques	95
.....	95
Annexes	0

Liste des figures

Figure 01. Évolution quantitative des stations d'épuration des eaux usées (STEP) en Algérie sur la période 2000–2024 (M'Hamed, 2025).	10
Figure 02. Évolution chronologique de la production mondiale d'animaux aquatiques par secteur de capture et d'aquaculture (1950–2022) (FAO, 2024).....	14
Figure 03. La flotte nationale par type de métier (ONS,2022).....	16
Figure 04. Différentes étapes du procédé expérimental de préparation et de stabilisation de la farine issue de déchets halieutiques. (a : Prétraitement, b : Cuisson, c : Pressage, d : Séchage, e : Broyage, f : Conditionnement)	34
Figure 05. Étapes de pesée et de préparation thermogravimétrique pour l'analyse de la siccité de la farine de poisson (a) et des boues de STEP (b).	36
Figure 06. Dispositif expérimental et étapes de mesure du pH des solutions d'analyse à l'aide d'un pH-mètre de précision.	38
Figure 07. Étape finale de calcination et phase de stabilisation thermique des cendres au dessiccateur.	40
Figure 08. Échantillon lyophilisé Broyé.....	43
Figure 09. Minéralisation à froid.....	44
Figure 010. Différentes étapes de la phase de minéralisation acide par la méthode de Kjeldahl. (1 : introduction de l'échantillon et du mélange catalytique, 2 : addition de H ₂ SO ₄ concentré, 3 : chauffage de la solution sur rampe de minéralisation, 4 : obtention du minéralisat limpide après digestion complète).	47
Figure 11. Différentes étapes du procédé de distillation (Méthode de Kjeldahl). (1 : transfert de l'échantillon minéralisé, 2 : alcalinisation par ajout de NaOH et virage de la solution, 3 : unité de distillation et collecte du distillat ammoniacal dans l'acide borique).....	48
Figure 12. Virage coloré au point d'équivalence lors du titrage volumétrique de l'ammoniac distillé. (1 : avant virage ; 2 : point final du dosage).....	48
Figure 14. Étapes expérimentales de l'analyse de phosphore soluble (1 : Préparation de la solution mère ; 2 : Préparation de la gamme étalon ; 3 : Extraction de l'échantillon dans l'eau distillée ; 4 : Préparation de l'échantillon pour l'analyse)	52
Figure 15. Étapes séquentielles du protocole de détermination de la teneur en matières grasses (Extraction Soxhlet) (a : hydrolyse, b : Extraction Soxhlet, c : concentration, séchage à poids constant et pesée finale).	54
Dans un premier temps, les boues déshydratées et la farine de poisson ont été mélangées intimement. La base azotée principale de notre compost a été constituée par ce pré-mélange (Figure 16).	65
Figure 16. Incorporation et pré-mélange mécanique de la farine de poisson et des boues d'épuration déshydratées.	66
Figure 17. Procédé de chargement du bioréacteur par stratification alternée des substrats.	66
Figure 18. Aspect des réacteurs au 4ème jour du cycle de co-compostage (stade pré-retournement).	67

Figure 19. État macroscopique des substrats des Essais 1 et 2 après le premier retournement et l'aération mécanique initiale.	67
Figure 20. Prise de mesure de la température centrale du substrat pour le contrôle de l'activité microbienne.	68
Figure 21. Prélèvement d'échantillons représentatifs du compost pour le suivi cinétique du pH.	68
Figure 22. Filtrats après Adsorption (1g et 3g de farine).	70
Figure 23. Apparition d'un gradient d'humidité et d'un début de fermentation anaérobie lors du séchage des coproduits en couches épaisses.	72
Figure 24. Optimisation cinétique du traitement thermique de la farine expérimentale : Comparaison de l'état macroscopique entre le début (1 ^{er}) et la fin (5 ^{ème} jour) du séchage.	73
Figure 25. Répartition proportionnelle entre la teneur en humidité (H%) et la matière sèche (MS%) des deux matrices initiales d'étude. (1 : boues d'épuration de la STEP, 2 : farine expérimentale de déchets de poisson).	75
Figure 26. Répartition proportionnelle entre la teneur matières minérales (MM%) et la matières organique (MO%) des deux matrices initiales d'étude. (1 : farine expérimentale de déchets de poisson, 2 : boues d'épuration de la STEP).	77
Figure 27. Courbe d'étalonnage spectrophotométrique du cadmium (Cd) par SAA et modélisation de sa régression linéaire.	78
Figure 28. Courbe d'étalonnage de phosphore.	81
Figure 29. Répartition de la composition centésimale de la farine expérimentale de déchets de poisson sur matière sèche. (a : profil organique, b : profil global).	86
Figure 30. Aspect macroscopique des cultures microbiologiques sur milieux sélectifs de la boue de STEP (B) et de la farine de poisson (FP)	86
Figure 31. Evolution des températures : Essai 1 vs Essai 2 (Avril/Mai 2026).	91
Figure 32. Valeurs limites de concentration en métaux lourds autorisées dans les sols récepteurs de boues d'épuration (Norme NA 17731).	
Figure 33. Teneurs limites en éléments traces métalliques (ETMs) fixées par la norme française NF U 44-095 « Amendements organiques — Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux ».	
Figure 34. Critères microbiologiques applicables aux produits de la pêche (Journal Officiel de la République Algérienne n° 39, 2017) – Référence pour la valorisation des sous-produits halieutiques.	
Figure 35. Table de Mac Grady pour la détermination du Nombre le Plus Probable (NPP) de micro-organismes par gramme ou millilitre d'échantillon.	

Liste des tableaux

Tableau 01. Valeurs limites réglementaires en Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les boues résiduelles selon la norme algérienne NA 17731.....	12
Tableau 02. Indicateurs clés de la production, de l'économie et de la structure socio-professionnelle du secteur halieutique et aquacole mondial en 2022 (FAO, 2024).	15
Tableau 03. Principaux producteurs de sous-produits halieutiques et aquacoles (par catégorie).	19
Tableau 04. Répartition pondérale moyenne, caractéristiques morphologiques et potentiel nutritionnel des différentes fractions de coproduits halieutiques.	20
Tableau 05. Profil nutritionnel et molécules bioactives des farines de coproduits de pêche.	26
Tableau 06. Influence de la fréquence de retournement sur la durée du processus de compostage.	30
Tableau 07. Préparation des solutions étalons pour l'établissement de la courbe d'étalonnage.	51
Tableau 08. Composition des mélanges expérimentaux de co-compostage et justification des proportions utilisées.	65
Tableau 09. Profil nutritionnel et physico-chimique de référence de la farine de poisson entier selon les standards de la FAO (2001).	73
Tableau 10. Résultats des pesées analytiques et taux d'humidité moyens (H%) de la boue de STEP et de farine expérimentale de déchets de poisson sur trois essais successifs.	74
Tableau 11. Valeurs individuelles et moyennes du pH de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson sur trois essais successifs	75
Tableau 12. Résultats des pesées analytiques après calcination au four à moufle et teneurs moyennes en matières minérales (MM%) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.	76
Tableau 13. Teneurs moyennes en métaux lourds et comparaison aux normes.	78
Tableau 14. Données expérimentales du dosage de Kjeldahl et teneurs moyennes en azote total (N%) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.	79
Tableau 15. Données de calibration spectrophotométrique : paramètres de constitution et absorbances de la gamme étalon du phosphore.	80
Tableau 16. Résultats des pesées analytiques pour la détermination du taux de lipides de la farine expérimentale de poisson.	84
Tableau 17. Résultats des dénombrements microbiologiques sur différentes gélose sélectives et profils de dilutions sérielles des deux matrices initiales.	87
Tableau 18. Dénombrement microbien global et charges sanitaires absolues (UFC/g de MS) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.	88
Tableau 19. Tableau récapitulatif de l'adsorption du Cuivre et du Zinc.	93
Tableau 20. caractérisation physico-chimique des boues de step (beni messous, alger)	
Tableau 21. Composition physico-chimique de la farine de poisson (déchets halieutiques locaux).	

Liste des Abréviations

Abréviation	Définition / Signification
Al	Aluminium
ANRED	Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets
APT	Eau Peptonée Tamponnée
BCPL	Bouillon Lactosé au Rouge de Phénol et à la Bile
BLBVB	Bouillon Lactosé Bilé au Vert Brillant
C/N	Rapport Carbone sur Azote
°C	Température
C	Concentration
Ca	Calcium
CaO	Oxyde de Calcium
CaSO₄	Sulfate de Calcium
CB	Cendres Brutes
Cd	Cadmium
CO₂	Dioxyde de Carbone
COT	Carbone Organique Total
Cr	Chrome
CTO	Composés Traces Organiques
Cu	Cuivre
-C=O	Carbonyles
CX/PR	Codex Alimentarius/Pesticide Residues
DBO₅	Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours
DHA	Acide Docosahexaénoïque (acide gras oméga-3)
E' / E₁	Echantillon
EH	Équivalents-Habitants
ENA	Extractif Non Azoté (fraction glucidique)
EPA	Acide Eicosapentaénoïque (acide gras oméga-3)
ETM	Éléments Traces Métalliques

ETMs	Éléments Traces Métalliques (pluriel)
FAMT	la Flore Aérobie Mésophile Totale
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (Food and Agriculture Organization)
Fe	Fer
FSSAI	Food Safety and Standards Authority of India
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
GMS	Grandes et Moyennes Surfaces
H%	Teneur en Humidité (pourcentage)
H+	Ions hydrogène
HCl	Acide chlorhydrique
H₂SO₄	Acide Sulfurique
H₂O₂	Peroxyde d'hydrogène
H₃BO₃	Acide Borique
Hg	Mercure
HNO₃	Acide Nitrique
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
ISSA	Les cendres des boues d'épuration d'incinération
ISO	Organisation Internationale de Normalisation (International Organization for Standardization)
J.O.R.A. N° 39	Journal Officiel de la République Algérienne N° 39
K	Potassium
K₂SO₄	Sulfate de Potassium
M₀ / m₀	Masse
MAT	Matières Azotées Totales
Mds	Milliards
MES	Matières En Suspension
Mg	Magnésium

MG	Matières Grasses (lipides bruts)
MM	Matière Minérale
MM%	Teneur en Matière Minérale (pourcentage)
MO	Matière Organique
MO%	Teneur en Matière Organique (pourcentage)
MPB	Matières Protéiques Brutes
MS	Matière Sèche
MS%	Teneur en Matière Sèche (pourcentage)
MVS	Matières Volatiles Sèches
N	Azote
NA	Norme Algérienne
NaOH	Hydroxyde de Sodium
NF EN	Norme Française / Norme Européenne
NH4+	Ion Ammonium
-NH2	Les groupes amines
NH3	Ammoniac
Ni	Nickel
NO3-	Ion Nitrate
NTK	Azote Total Kjeldahl
NPP	Nombre le Plus Probable
P	Phosphore
Pb	Plomb
PB	Protéines Brutes
pH	Potentiel Hydrogène
PO4	Groupes Phosphates
PUFA	Acides Gras Polyinsaturés à Longue Chaîne (Polyunsaturated Fatty Acids)
PO4	Les groupes phosphates
PCA	Plate Count Agar
RCA	République Centrafricaine

S	Soufre
S-S	Salmonella-Shigella Agar
S₀	Solution mère
Se	Sélénium
SEAAL	Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger
SDA	Sabouraud Dextrose Agar
SFB	Bouillon SF pour <i>Streptococcus Faecalis</i>
STEP	Station d'Épuration des eaux usées
T°	Température
UFC	Unité Formant Colonie
USD	United States Dollar
V	Volume
VF	Viande-Foie
XXe	20e siècle
Y	Poids de l'échantillon de départ.
Zn	Zinc

Introduction

INTRODUCTION

L'urbanisation croissante et le développement des infrastructures d'assainissement engendrent une production massive de boues issues des stations d'épuration des eaux usées (STEP). En Algérie, le parc national est passé de 45 STEP en l'an 2000 à plus de 232 unités en 2024, générant annuellement près de 68 000 tonnes de boues déshydratées (M'Hamed, 2025). Ces résidus concentrent des charges organiques fermentescibles, des éléments traces métalliques (ETMs) et des micro-organismes potentiellement pathogènes. Leur gestion représente un problème sanitaire, économique et environnemental de première ampleur, d'autant que les filières classiques d'élimination — mise en décharge, incinération — demeurent coûteuses et polluantes.

Face à ce défi, l'économie circulaire s'impose comme un cadre de réponse structurant. En réintégrant les déchets dans les cycles de production, cette approche transforme les passifs environnementaux en ressources stratégiques. Les boues de STEP, riches en matière organique, en azote et en phosphore, constituent ainsi un amendement organique de premier ordre, à condition de maîtriser leur charge contaminante. Dans cette même logique, les sous-produits du secteur halieutique — têtes, arêtes, écailles et viscères — représentant entre 30 et 70 % de la biomasse totale capturée (Dhar et al., 2024), offrent un second gisement considérable encore insuffisamment valorisé le long des 2148 km de façade littorale algérienne.

L'originalité de la présente étude réside dans l'évaluation de la synergie envisageable entre ces deux flux. En associant les boues de STEP à une farine produite à partir de déchets halieutiques locaux, le co-compostage selon la méthode de Berkeley offre une piste prometteuse pour analyser la faisabilité de créer un amendement organique complet et sécurisé. De surcroît, la richesse de la farine de poisson en hydroxyapatite et en chitosane lui confère des propriétés de biosorption des métaux lourds, ouvrant une double perspective : étudier l'aptitude à fertiliser les sols tout en neutralisant les contaminants métalliques issus des boues.

Ce projet de fin d'études s'appuie sur les boues déshydratées de la STEP de Beni Messous (Alger), mise en service en 2007 par la SEAAL, traitant les effluents de cinq communes de l'ouest algérois avec un rendement d'épuration de 95 %. La biomasse halieutique a été collectée auprès de poissonneries, restaurants et zones portuaires locales.

Ce travail poursuit plusieurs objectifs complémentaires :

- Caractériser les deux matrices sur les plans physico-chimique et microbiologique, afin d'évaluer leur potentiel fertilisant et leur innocuité sanitaire avant toute valorisation.
- Explorer la capacité de traitement par la mise en œuvre d'un processus de co-compostage à l'échelle du laboratoire selon la méthode de Berkeley et en suivre les paramètres cinétiques.
- Évaluer la capacité d'adsorption de la farine de poisson vis-à-vis des éléments traces métalliques (ETMs) en milieu aqueux synthétique afin de confirmer son potentiel de stabilisation de ces éléments dans les boues.

Le présent mémoire s'articule en trois chapitres :

- CHAPITRE I : est consacré à la synthèse bibliographique (boues de STEP, sous-produits halieutiques, compostage et biosorption) ;
- CHAPITRE II : décrit le protocole expérimental (échantillonnage, fabrication de la farine, analyses physico-chimiques, microbiologiques et métalliques, essais d'adsorption) ;
- CHAPITRE III : présente et discute les résultats en les confrontant aux normes algériennes et à la littérature scientifique internationale.

En définitive, ce travail se veut une contribution rigoureuse à la réflexion sur la gestion durable des déchets organiques en Algérie, en évaluant dans quelle mesure une approche circulaire peut transformer deux problèmes environnementaux distincts en une solution unique, bénéfique pour les sols, les eaux et la collectivité.

Chapitre I :

Généralités

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

La gestion des résidus organiques s'inscrit désormais au cœur des enjeux de l'économie circulaire, où la finalité n'est plus l'élimination des déchets, mais leur réintégration dans des cycles de production durables. Cette approche permet de transformer des passifs environnementaux, tels que les boues de stations d'épuration (STEP), en ressources stratégiques pour la régénération des écosystèmes.

Dans cette optique de valorisation, le secteur halieutique offre un gisement considérable à travers ses sous-produits de la pêche. La transformation de ces matières en farine de poisson ne constitue pas seulement une solution technique de recyclage, mais devient le catalyseur d'une synergie biologique plus vaste. En associant ces flux au processus de co-compostage, il devient possible de fermer la boucle matière, transformant des nuisances industrielles en amendements organiques capables de restaurer la fertilité des sols.

I. Boues des STEP

I.1. Définition et Origine

Les boues des STEP sont définies comme des résidus solides, semi-solides ou liquides issus du traitement des eaux usées, générés principalement lors des phases primaire et secondaire (Whitley & Salem, 2006)

Leur production découle de l'application de normes environnementales, conduisant à l'accumulation de matières organiques et inorganiques qui nécessitent une gestion spécifique (Rong-yan, 2006).

I.2. Les types des boues

I.2.1. Les boues primaires

Issues de la décantation simple de l'effluent, elles sont également désignées sous le terme de « boues fraîches » (Bougrier, 2005).

Provenant du décanteur primaire, elles se caractérisent par une forte teneur en matière organique (20 à 30 % de la DBO₅), une concentration élevée en MES (80 à 90 %), ainsi qu'une couleur noire et une odeur désagréable (Pacchiano et al., 1993).

I.2.2. Les boues secondaires

Produites par les traitements biologiques (décanteur secondaire), elles présentent des teneurs plus élevées en azote et en acide phosphorique que les boues primaires (Bracewell et al., 1980).

Il s'agit de boues fraîches biologiques, principalement constituées de floes bactériens, dont le potentiel de fermentation est fonction du temps de séjour dans le bassin d'aération (âge des boues).

I.2.3. Les boues mixtes

Leurs propriétés varient selon les proportions respectives de boues primaires et secondaires. Ces boues présentent un caractère hautement fermentescible (Shin & Moon, 1996).

I.3. Composition des boues

La composition des boues est variable et dépend de l'origine des eaux usées, du type de traitement et de la période. Elle comprend généralement trois catégories d'éléments : des éléments utiles, des éléments indésirables et des micro-organismes pathogènes (BOULAHBAL.O, 2011).

I.3.1. Les éléments utiles

I.3.1.a. La matière organique

La teneur en matière organique, comparable à celle d'un fumier, varie de 30 à 80% de la MS. Elle est composée de lipides, polysaccharides, protéines, acides aminés, lignine, ainsi que de produits du métabolisme et de corps microbiens.

I.3.1.b. Les éléments fertilisants et amendements

Les boues contiennent des quantités appréciables d'éléments nutritifs (N, P, Ca, Mg, S) qui peuvent couvrir tout ou partie des besoins des cultures, à l'exception du potassium (K) généralement présent en faible quantité (0,5 à 1,5% MS).

Ce sont donc ces éléments qui déterminent la qualité agronomique des boues. Les éléments les plus importants sont les suivants :

- L'Azote

Présent 1-8% de la MS sous formes organique et ammoniacale (NH_4^+), mais généralement pas sous forme nitrique (NO_3^-).

- Le Phosphore

Présent sous forme organique (5 à 6 %) et sous forme minérale, associé au fer (Fe), à l'aluminium (Al), au calcium (Ca) et au magnésium (Mg). Son taux d'assimilation est estimé à environ 70 %.

- **Le Calcium**

Les boues sont généralement riches en calcium en quantité appréciable : Des valeurs de 0.2 à 1.5% du CaO dans les boues liquides et de 2 à plus de 20% de CaO dans les boues solides (Guerfi, 2012).

- **Le Magnésium**

Sa teneur est généralement faible (0,5 à 1,5% MS) en raison de sa solubilité

- **Le Potassium**

Caractérisées par une carence en potassium (0,5 à 1,5 % MS (Moletta & Cansell, 2003), les boues voient leur teneur limitée par la solubilité de cet élément, lequel est préférentiellement évacué dans les eaux rejetées (“Collection OTV, N° 2,” 1997).

I.3.2. Les éléments indésirables

La charge polluante des boues se compose notamment d'éléments traces métalliques (ETMs) et de composés traces organiques (CTO).

I.3.2.a. Les éléments traces métalliques (ETMs)

Les boues concentrent 70 à 90% des ETMs présents dans les eaux usées entrantes, provenant majoritairement des rejets industriels. Certains (Zn, Cu, Fe) sont des oligo-éléments essentiels mais toxiques à haute dose, tandis que d'autres (Cd, Pb, Hg) sont toxiques même à faible dose. (BOULAHBAL, 2011) (DEROUICHE, 2012)

I.3.2.b. Les composés traces organiques (CTO)

Ce sont des produits chimiques d'origines domestiques (détergents, solvants, peinture...), industrielles, urbaines (eau de ruissellement drainant la pollution liée à la circulation automobile...), plus ou moins bien dégradés dans les sols (DEROUICHE, 2012)

Malgré leur aspect non cumulatif, les CTO peuvent, à forte dose, devenir toxiques pour les micro-organismes responsables de la fertilité des sols (BOULAHBAL, 2011)

I.3.3. Les micro-organismes pathogènes

Les boues, notamment brutes, hébergent une grande diversité de micro-organismes, dont une faible proportion peut être pathogène (virus, bactéries) et provient principalement des matières fécales (BOUAISSA, 2015).

I.3.4. Les Éléments fertilisants

D'importantes quantités en composés inorganiques usuels se retrouvent dans les boues à savoir : N, P, K, Ca et Mg. La concentration en azote varie entre 1 et 5 % de la matière sèche. L'apport de ces composés au sol peut couvrir, en partie ou en totalité les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésium, calcium et en soufre. Cet apport peut aussi corriger des carences (Zebarth et al., 2000) (Warman & Termeer, 2005) (Su et al., 2004) Les éléments en traces tels que le cuivre et le zinc présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des communautés du sol. Cependant la valorisation de ce résidu nécessite une bonne connaissance de sa valeur agronomique afin de le comparer aux engrais minéraux classiquement employés par les agriculteurs.

I.4. Mode de traitement des boues

Face à l'urbanisation croissante, à la multiplication des sites de dépollution et à des normes de plus en plus strictes, la gestion et la valorisation des boues de station d'épuration constituent un enjeu majeur. Ces dernières années, les volumes de boues issues du traitement des eaux ont fortement augmenté.

En parallèle, les filières de traitement de ces résidus se sont développées et perfectionnées. Le choix du mode de traitement dépend de la destination finale des boues, qui doit respecter des exigences de qualité spécifiques. L'objectif est de produire des boues en quantité réduite, de meilleure qualité et sans danger pour l'environnement (Collard, 2015).

I.4.1. Épaississement et déshydratation des boues

Cette première étape vise à améliorer les propriétés physiques des boues et à réduire leur volume de trois à six fois, ce qui diminue les surfaces d'épandage ainsi que les coûts de stockage, transport et élimination.

Plusieurs procédés existent : l'épaississement, la déshydratation et le séchage, classés par ordre croissant d'efficacité et de coût. L'épaississement, gravitaire ou mécanique, augmente la teneur en matières sèches sans éliminer le caractère liquide des boues.

La déshydratation, plus poussée, fait passer les boues de l'état liquide à l'état pâte grâce à des centrifugeuses, filtres-presses ou filtres à bandes, portant la siccité entre 15 et 20 %.

Enfin, le séchage par chauffage, lits de sable ou évaporation élimine quasi totalement l'eau restante (siccité d'environ 65 %) et réduit les boues en poudre ou granulés (Collard, 2015).

I.4.2. Stabilisation

Les boues de station d'épuration contiennent des matières organiques, des éléments minéraux et des micro-organismes, dont des pathogènes. La stabilisation vise à réduire leur fermentescibilité en dégradant la matière organique ou en inhibant l'activité biologique. Lorsqu'elle est réalisée par voie anaérobie, elle permet notamment la production de biogaz valorisable. Les principaux procédés de stabilisation sont la voie aérobie, la voie anaérobie et la voie chimique.

La voie aérobie s'effectue dans des bassins d'aération ou par compostage qui est également un procédé de stabilisation par voie aérobie. Ce dernier reproduit de manière accélérée la décomposition naturelle de la matière organique. Le processus se déroule en trois phases : une dégradation initiale par des bactéries qui élèvent la température entre 50 et 70 °C, une phase de stabilisation, puis une phase de maturation qui transforme la matière en composés humiques. Le produit obtenu peut servir d'amendement pour les sols (Astals et al., 2012).

La stabilisation chimique repose sur le chaulage. Ici, la matière organique n'est pas transformée : l'ajout de chaux augmente le pH et bloque l'activité bactérienne, tout en déshydratant les boues. Le chaulage préserve leur valeur nutritive pour les sols.

I.4.3. Hygiénisation

Cette étape de traitement thermique vise à éliminer les micro-organismes issus des eaux usées et des procédés de dépollution, afin d'obtenir un résidu sans agents pathogènes, propre à un épandage maîtrisé et sécurisé.

Le chaulage constitue également une méthode d'hygiénisation : l'élévation du pH neutralise les organismes potentiellement dangereux. De la même manière, la montée en température lors de la première phase de compostage assure la destruction des pathogènes (Collard, 2015).

I.4.4. Destinations finales des boues

Les destinations finales des boues provenant des stations d'épuration (STEP) sont essentielles pour la durabilité environnementale. Il existe différentes méthodes d'élimination des boues, chacune ayant ses avantages et ses défis. Les sections suivantes décrivent les principales méthodes d'élimination et leurs implications.

- **Mise en décharge**

La mise en décharge des boues d'épuration est l'une des options d'élimination des boues produites par les installations municipales de traitement des eaux usées. Cela implique l'enfouissement des boues dans des zones désignées, mais il est moins privilégié que l'épandage sur le sol en raison de préoccupations environnementales (Younos, 1987).

- **Usage agricole**

L'épandage agricole constitue une voie de valorisation majeure pour les boues des stations d'épuration, permettant de recycler leur richesse en matière organique et en éléments fertilisants comme l'azote et le phosphore (Kacprzak et al., 2017). Cette pratique améliore les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Wolejko et al., 2018). Cependant, elle est strictement encadrée dans les pays développés en raison des risques potentiels liés à la présence de contaminants (métaux lourds, pathogènes, composés organiques) (Bondarczuk et al., 2016). Son autorisation est donc conditionnée au respect de critères stricts, notamment concernant les teneurs en éléments traces métalliques et l'élimination des micro-organismes pathogènes (Fijalkowski et al., 2018).

- **Production de ciment et de béton**

La production de ciment et de béton à partir de boues d'épuration consiste à calciner les boues pour créer des cendres, qui sont ensuite incorporées au ciment. Ce processus permet d'obtenir un ciment vert respectueux de l'environnement, qui aborde la gestion des déchets et réduit les émissions de carbone dans la construction (Djafari et al., 2024).

- **Incinération**

L'incinération des boues d'épuration est un procédé de traitement thermique qui réduit efficacement le volume des boues d'épuration tout en détruisant les contaminants organiques. Cette méthode est de plus en plus prisée en raison de sa vitesse de traitement élevée et de son potentiel de récupération d'énergie. Cependant, elle génère également des sous-produits, tels que les cendres des boues d'épuration d'incinération (ISSA), qui peuvent être recyclées en matériaux tels que le clinker de ciment, ce qui présente des avantages à la fois environnementaux et économiques (Lian & Ruan, 2024).

I.5. Etat des lieux des boues de STEP en Algérie

Le parc algérien de stations d'épuration (STEP) a connu une expansion remarquable. En passant de 45 stations en l'an 2000 à 232 STEP en fonctionnement en 2024 (**figure 01**), le pays vise une capacité de traitement de 1 500 hm³/an. La capacité mise en place a donc connu une hausse spectaculaire, passant de 90 hm³/an en 2000 à 1 000 hm³/an en 2020, témoignant d'une tendance d'investissement constante.

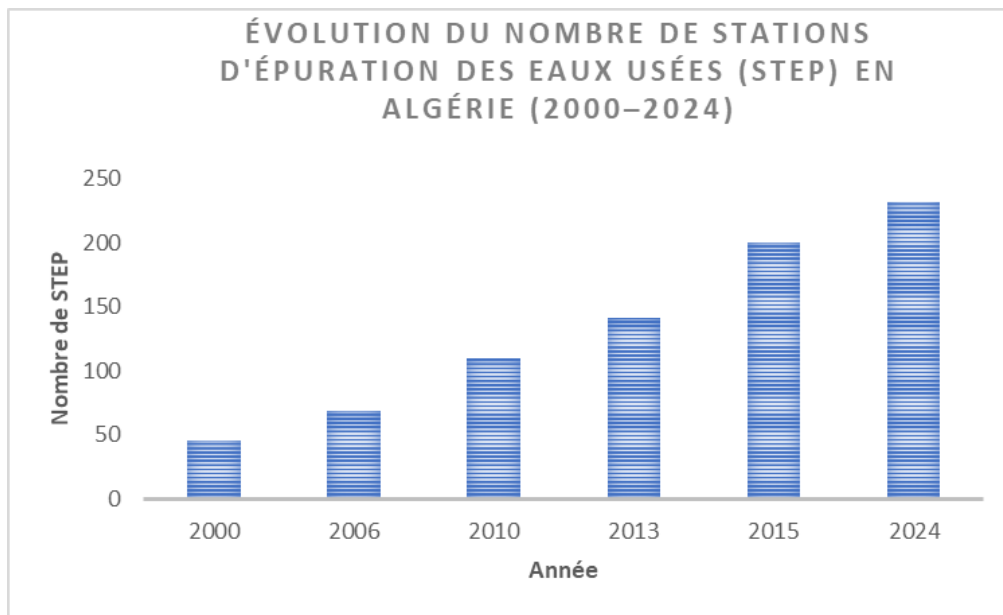


Figure 01. Évolution quantitative des stations d'épuration des eaux usées (STEP) en Algérie sur la période 2000–2024 (M'Hamed, 2025).

À l'heure actuelle, 213 STEP génèrent approximativement 68 000 tonnes de boue chaque année. Toutefois, cette production est susceptible d'augmenter en raison de l'expansion des nouvelles infrastructures. Le défi majeur provient du taux d'épuration national de 54%, qui indique une utilisation insuffisante des capacités en place (moins de 50% de leur capacité), ce qui restreint le volume de boues réellement accessible et traité.

Malgré la production significative, l'utilisation des boues est considérablement limitée. Ceci est dû à divers obstacles techniques (absence de traitement tertiaire, désinfection inadéquate), réglementaires (décret n°10-23 fixant les caractéristiques techniques des systèmes d'épuration des eaux usées et arrêté de 2012) et environnementaux (rejets en mer, pollution), contrairement aux ambitions nationales qui visent leur emploi dans les secteurs agricole ou énergétique (M'Hamed, 2025).

I.6. Les normes et réglementation algérienne de l'utilisation des boues

En Algérie, la gestion des boues issues de l'épuration des eaux usées est encadrée par un dispositif normatif rigoureux visant à protéger la santé publique et les écosystèmes. Ce cadre définit les exigences relatives au traitement et à la valorisation de ces sous-produits, particulièrement pour un usage agricole sécurisé.

Les principales normes et références techniques en vigueur sont les suivantes :

- **Norme algérienne NA 17671 (2010)** Matières fertilisantes – Boues des ouvrages de traitement des eaux épurées urbaines – Dénominations et spécifications
Cette norme définit les termes techniques et les critères (physico-chimiques et biologiques) essentiels à la valorisation des boues d'épuration en Algérie. En fixant des seuils rigoureux pour la matière sèche, les nutriments et les métaux traces, elle sert de guide pour assurer un usage agricole sécurisé, préservant ainsi durablement la santé des sols et la qualité des cultures.
- **Norme algérienne NA 17731 (2017)** établit les spécifications pour la valorisation des boues résiduelles issues des stations d'épuration à des fins agricoles
Le texte définit les conditions d'utilisation et les limites en fonction des concentrations de métaux traces et d'agents pathogènes. Son objectif est de minimiser l'application d'engrais chimiques et d'améliorer la gestion des sous-produits en tenant compte des considérations environnementales. La norme a été approuvée par un comité technique national et comprend des définitions pertinentes et des références normatives.
- **Norme algérienne NA 17672 (2010)** Amendements organiques Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux
Cette norme définit les conditions d'utilisation des boues stabilisées en agriculture, notamment les doses, les fréquences d'épandage et les types de sols ou de cultures concernés. Elle précise également les restrictions d'usage, telles que les zones interdites et les délais à respecter avant récolte.

Elle s'applique aux boues provenant des stations d'épuration des eaux usées urbaines d'une capacité supérieure ou égale à 2 000 équivalents-habitants (EH), destinées à un usage agricole, notamment pour l'épandage direct, le compostage ou la production de digestat.

II. Éléments traces métalliques

II.1. Définition des ETMs

Les éléments traces métalliques, appelés métaux traces, sont définis comme des métaux présents en faibles concentrations dans les différents compartiments de l'environnement. Ces éléments, tels que le chrome, le cuivre, le zinc et le fer, sont essentiels pour les processus biologiques en petites quantités, mais peuvent présenter une toxicité à des niveaux élevés. (Lead, 2005) (Robbins et al., 2020)

II.2. Origine des ETMs

La plupart des métaux se trouvent à de faibles concentrations dans le sol, mais les activités humaines peuvent augmenter ces niveaux (Banuelos & Ajwa, 1999), et ils peuvent également être émis dans l'atmosphère par des sources naturelles et anthropiques. Le comportement des métaux dans le sol est influencé par leur origine et leurs formes chimiques (Senesil et al., 1999). Les sources de métaux peuvent être classées en deux catégories principales : naturelles et anthropiques.

II.3. Normes

D'après la norme algérienne **NA 17731**, qui établit les spécifications pour la valorisation des boues résiduaires issues des stations d'épuration à des fins agricoles, les teneurs en Éléments Traces Métalliques (ETM) ne doivent pas excéder les valeurs limites suivantes :

Tableau 01. Valeurs limites réglementaires en Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les boues résiduaires selon la norme algérienne NA 17731.

Éléments traces métalliques	Valeur maximale (mg/Kg MS)
Cadmium	3.0
Chrome	150
Mercure	1.5
Nickel	75
Plomb	300
Cuivre	140
Zinc	300

II.4. Les ETM dans les boues des STEP

Les STEP concentrent 70 à 90 % des ETMs des eaux usées, transférés de la phase liquide vers la phase solide durant le traitement. (BOULAHBAL.O, 2011)

Majoritairement issus des rejets industriels, certains ETM (Zn, Cu, Fe) sont nécessaires mais toxiques à forte dose, tandis que d'autres (Cd, Pb, Hg) sont hautement toxiques même à faibles teneurs. (BOULAHBAL.O, 2011)

La teneur et la spéciation des ETMs sont étroitement liées à la nature des activités raccordées au réseau d'assainissement. En raison de leur caractère non biodégradable, ces polluants persistent dans l'écosystème et subissent une bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire. (Amir et al., 2005) (Jouraiphy, 2007) (McBride, 2003).

L'évaluation du risque lié aux ETMs ne peut pas se baser uniquement sur leur teneur totale ; leur spéciation chimique est nécessaire pour apprécier leur mobilité et leur biodisponibilité (Hsu & Lo, 2001).

III. Sous-produits de la pêche et de l'aquaculture

III.1. État des Lieux du Secteur Halieutique Mondial

Le secteur de la pêche et de l'aquaculture a franchi des seuils historiques **en 2022**, marquant un tournant dans la sécurité alimentaire mondiale. Pour la première fois, la production aquacole a dépassé celle de la pêche de capture, représentant désormais **51 %** de la production totale d'animaux aquatiques (FAO, 2024).

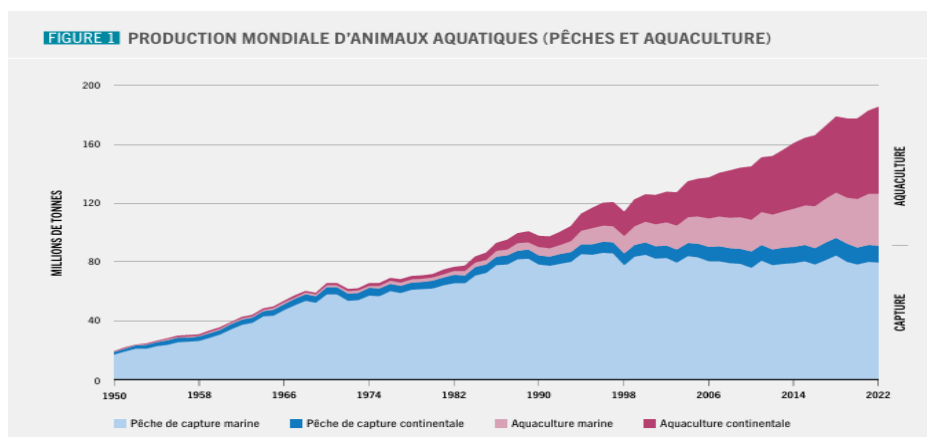


Figure 02. Évolution chronologique de la production mondiale d'animaux aquatiques par secteur de capture et d'aquaculture (1950–2022) (FAO, 2024).

Afin de dresser un bilan global du secteur, **le tableau 02** synthétise les principales données statistiques de l'année 2022. Il met en évidence les volumes de production (animaux et algues), les performances commerciales ainsi que l'impact social de la filière à travers l'évolution des emplois à l'échelle mondiale.

Tableau 02. Indicateurs clés de la production, de l'économie et de la structure socio-professionnelle du secteur halieutique et aquacole mondial en 2022 (FAO, 2024).

Catégorie	Indicateur / Type	Statistiques Clés (2022)	Caractéristiques / Tendances
Production	Totale (Animaux + Algues)	223,2 millions de tonnes	Record historique
Secteur	Aquaculture	94,4 millions de tonnes	51% de la production (Leader)
	Pêche de capture	91,0 millions de tonnes	49% de la production
Économie	Valeur commerciale	452 milliards USD	Dont 296 Mds USD pour l'aquaculture
Social	Emploi total	61,8 millions de personnes	Secteur primaire

III.2. Le secteur de la pêche et de l'aquaculture en Algérie

L'analyse des indicateurs de la pêche et de l'aquaculture en Algérie présentée ci-après s'appuie sur les données officielles publiées par l'Office National des Statistiques (ONS, 2022). Ce bilan macroéconomique et technique permet de dresser un état des lieux précis de la production halieutique, de la structure de la flotte, ainsi que des dynamiques socio-économiques et commerciales qui caractérisent le paysage marin national pour l'année 2022.

III.2.1. État de la production nationale

En 2022, la production halieutique algérienne a atteint **116 790 tonnes**, enregistrant une hausse remarquable de **19,8 %** par rapport à 2021.

- **Par espèces :** Le secteur reste dominé par les **poissons pélagiques (72,2 %** du volume global), portés par les petits pélagiques (78 317 tonnes). Les poissons démersaux (9 600 t) et les crustacés (2 974 t) affichent également de fortes progressions, respectivement de 45,1 % et 44,1 %.

- **Aquaculture** : Elle progresse de **15,4 %** pour totaliser **5 524 tonnes**, tirée par la pisciculture marine (59,1 %). La wilaya de Chlef demeure le pôle principal avec **28,4 %** de la production aquacole nationale.
- **Répartition régionale** : La wilaya de Tipaza occupe le premier rang national avec 14 441 tonnes (+105,8 %), suivie de Skikda (10 521 t) et Tlemcen (10 385 t).

III.2.2. Flotte de pêche et infrastructures

La flottille nationale (hors corailleurs) s'élève à **6 044 unités** (+1,3 % en un an), parallèlement à une baisse de 2,3 % des navires inactifs.

- **Petits métiers** : Ils représentent 65,4 % de la flotte globale (3 952 navires), principalement constitués d'embarcations de moins de 6 mètres. Ce segment souffre d'un sous-emploi technique majeur avec 51 % d'unités inactives.
- **Sardiniers et Chalutiers** : Les sardiniers comptent 1 510 unités (25,0 %) et les chalutiers 552 unités (9,1 %), majoritairement dimensionnés entre 12 et 24 mètres.
- **Infrastructures** : Liée à la configuration portuaire, Tipaza concentre la flotte la plus importante (14,0 % soit 844 navires), devant Annaba (621) et Boumerdes (585).

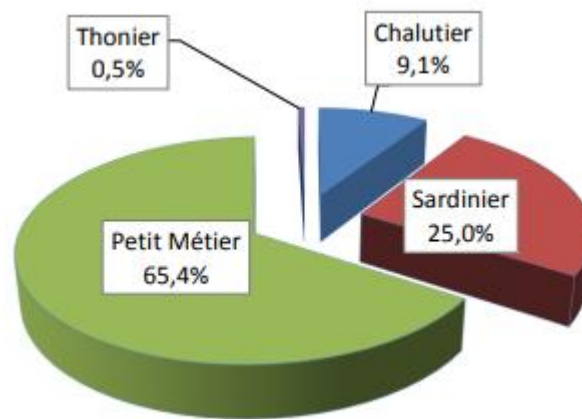


Figure 03. La flotte nationale par type de métier (ONS,2022)

III.2.3. Aspects socio-économiques et commerce

III.2.3.a. Emploi :

La population marine a augmenté de 10,9 %, générant 15 543 nouveaux postes pour un total de 157 897 travailleurs. Les emplois indirects prédominent à 55,5 %, tandis que Tipaza et Mostaganem se placent en tête des wilayas employeuses.

III.2.3.b. Commerce extérieur :

- **Importations :** Elles reculent de 21,3 % en volume (30 112 tonnes), malgré une hausse de 10,9 % en valeur (109,9 millions de dollars). Les filets de poissons constituent le premier poste d'achat (59,1 % du volume).
- **Exportations :** Elles chutent à 3 089 tonnes (-37,8 %), mais leur valeur financière bondit de 60,4 % pour atteindre 23,8 millions de dollars, portées à 69,5 % par les poissons vivants.

III.2.4. Consommation et enjeux

- **Déficit commercial :** La balance commerciale du secteur reste déficitaire à 86,1 millions de dollars. Cependant, le taux de couverture des importations par les exportations s'est nettement amélioré, passant de 7,2 % en 2020 à 21,7 % en 2022.
- **Valorisation industrielle :** Les filets de poisson congelés absorbent 67,49 % des devises à l'importation. L'enjeu majeur réside dans la transformation locale des petits pélagiques (surabondants) pour réduire cette dépendance extérieure.
- **Optimisation technique :** Les « Petits Métiers » concentrent 79,2 % des navires inactifs du pays. Moderniser et réguler cette flotte artisanale constitue un levier clé pour stabiliser l'approvisionnement des marchés locaux.

III.3. Définitions et Terminologie des Déchets et Coproduits

La littérature scientifique distingue rigoureusement les différentes fractions issues de la transformation :

- **Les co-produits :** Désignent les parties du poisson qui, bien que secondaires par rapport au filet, sont destinées à la consommation humaine, comme le foie ou certaines huiles de qualité alimentaire (Patrascu & Aprodu, 2017) (Linder et al., 2006).

- **Les sous-produits** : Regroupent les parties non destinées à l'alimentation humaine (viscères, têtes, arêtes, peaux) mais qui conservent des composants précieux pour d'autres applications industrielles ou agricoles (Patrascu & Aprodu, 2017).
- **Les déchets de poisson** englobent l'ensemble des résidus solides (carcasses, viscères, peaux) et liquides générés lors de la capture, de la transformation et de la commercialisation, représentant entre **30 et 70 %** de la biomasse totale du poisson (Dhar et al., 2024).

III.4. Origines et Sources de Génération des Déchets

Les déchets de poisson ne sont pas seulement le produit de l'industrie ; ils sont générés à chaque étape de la chaîne de valeur halieutique. On distingue trois sources principales :

- **La chaîne de valeur globale** : Les résidus proviennent des prises accessoires (by-catch), de **la manutention** à bord, des centres de débarquement, ainsi que du transport, du stockage, des détaillants et des consommateurs finaux (Redman, 2022) (Mohanty, 2020).
- **L'activité de transformation industrielle** : C'est la source la plus massive. Environ **70 % de la production** mondiale de poisson est soumise à une transformation industrielle (Mohanty, 2020).
- **Les étapes de production** : Au cours de la transformation (étourdissement, calibrage, éviscération et filetage), les pertes générées par étape varient entre **20 % et 80 %** selon l'espèce et le produit final (Mohanty, 2020 ; Jaies et al., 2024). À l'échelle mondiale, on estime qu'environ les **deux tiers (66 %)** du poisson capturé finissent sous forme de déchets (Coppola et al., 2021).

Le **tableau 03** ci-dessous résume les principaux producteurs de sous-produits de la pêche et de l'aquaculture, catégorisés par aquaculture, pêche, transformation et distribution.

Pour chaque groupe d'espèces, les types de sous-produits générés et les rendements estimés, en % du poids vif, ainsi que les références scientifiques correspondantes, sont indiqués.

Cette compilation tente de fournir un aperçu des ressources secondaires disponibles pour une utilisation potentielle dans le cadre d'une approche d'économie circulaire.

Tableau 03. Principaux producteurs de sous-produits halieutiques et aquacoles (par catégorie).

Catégorie	Sous-catégorie / Espèces	Principaux sous-produits	Rendement (% du poids vif)	Références
AQUACULTURE	Salmonidés (saumon, truite)	Têtes, viscères, squelettes, parures, peau, mortalités	20–43 %	(Nikoo et al., 2019) ; (Malcorps et al., 2021) ; (Love et al., 2022)
	Poissons marins (bar, dorade)	Têtes, viscères, parures, peau, écailles	55–60 %	(Valcarcel et al., 2020) ; (Caruso et al., 2020)
	Poissons-chats (pangasius, catfish)	Mortalités, rebuts, têtes, viscères, peau	23–54 %	(Love et al., 2022) ; (Viglia et al., 2022) ; (Nikoo et al., 2023)
	Crevettes d'élevage	Têtes, carapaces, queues	44–62 %	(Sachindra et al., 2006) ; (Roy et al., 2021) ; (Nikoo et al., 2023)
	Mollusques bivalves	Coquilles, byssus, liquide intervalvaire	60–80 %	(Silva et al., 2019) ; (Caruso et al., 2020)
PÊCHE	Gadidés (lieu, cabillaud)	Têtes, viscères, arêtes, peau, rejets	50–58 %	(Bechtel, 2003) ; (Rustad et al., 2011) ; (Love et al., 2022)
	Petits pélagiques (sardine, anchois)	Poissons non destinés à la consommation, têtes, viscères	40–60 %	(Irianto et al., 2014) ; (Shahidi et al., 2019) ; (Cooney et al., 2023)
	Thonidés (thon, bonite)	Têtes, peaux, arêtes, viscères, "chair rouge"	50–55 %	(Irianto et al., 2014) ; (Vázquez et al., 2022) ; (Roy et al., 2022)
	Crustacés (crabe, crevette sauvage)	Coquilles, carapaces, têtes, pattes	40–85 %	(Irianto et al., 2014) ; (Shahidi et al., 2019) ; (Caruso et al., 2020)
	Céphalopodes (calmar, seiche)	Têtes, tentacules, viscères, peaux, encres	52–60 %	(Ezquerria-Brauer & Aubourg, 2019) ; (Caruso et al., 2020)
TRANSFORMATION	Conserveries	"Stickwater" (eau de cuisson), têtes, arêtes	Jusqu'à 40 %	(Arvanitoyannis & Kassaveti, 2008) ; (Martínez-Montañó et al., 2021)
	Filetage / Fumage	Parures, peaux, chutes, squelettes	50–70 %	(Ghaly et al., 2013) ; (Stevens et al., 2018) ; (Cooney et al., 2023) ;
	Décorticage	Carapaces, têtes	40–60 %	(Sachindra et al., 2006) ; (Roy et al., 2021) ;
DISTRIBUTION	Poissonneries, GMS, ménages	Invendus, têtes, arêtes, peaux, restes	10–56 %	(Stenmarck et al., 2016) ; (FAO, 2018) ; (Love et al., 2022)

III.5. Analyse structurelle et distribution pondérale des fractions

La morphologie du poisson détermine la nature des déchets produits lors du filetage. La répartition moyenne des composants se présente comme suit (Murugan et al., 2024); (Montoya & Sanchez, 2022).

Tableau 04. Répartition pondérale moyenne, caractéristiques morphologiques et potentiel nutritionnel des différentes fractions de coproduits halieutiques.

Catégorie de déchet	Proportion (%)	Caractéristiques et Richesse Nutritionnelle
Viscères / Abats	12 - 18	Riches en enzymes, lipides et acides aminés
Têtes	9 - 12	Source importante de protéines et de lipides
Arêtes / Os	9 - 15	Haute teneur en minéraux (riches en apatite : un phosphate naturel, Calcium...)
Peau	1 - 3	Forte concentration en collagène et gélatine
Écailles	~ 5	Composés de chitine et minéraux
Nageoires et parures	1 - 3	Protéines structurales

III.6. Caractérisation nutritionnelle et propriétés biochimiques

Les sous-produits du poisson constituent une biomasse riche et complexe, dont la composition varie selon l'habitat.

- **Profil global :** Ces résidus sont une source majeure de **protéines** (environ 58 % de la matière sèche) et de **lipides** (19 %) (Murugan et al., 2024).
- **Spécificités par espèce :** Les poissons **d'eau douce** présentent généralement une teneur en **humidité** (70,13 %) et en **protéines** brutes (18,15 %) plus élevée, tandis que les poissons **marins** sont plus riches en **cendres/minéraux** (16,54 %) et en **lipides** (Mgbechidinma et al., 2022).
- **Composition par organe :** La **peau** est particulièrement riche en **protéines** (collagène), tandis que la **tête**, les **os** et les **intestins** sont d'excellentes sources de **lipides**. Les **acides gras**

dominants identifiés sont les acides oléique, palmitique, linoléique et eicosénoïque. Les os et parures représentent aussi une source essentielle de calcium (Kandyliari et al., 2020).

III.7. Impacts environnementaux et exigences de gestion durable

Une mauvaise gestion de ces résidus peut causer des effets écologiques graves, y compris la contamination de l'eau due à une surcharge en nutriments (eutrophisation) et la dégradation de la biodiversité (Begum et al., 2024); (Caruso, 2016). Cette demande croissante de poisson à l'échelle mondiale intensifie le risque de pollution.

Il est crucial de mettre en place des techniques de valorisation à l'échelon local, telles que le compostage, pour réduire ces effets (Essabiri et al., 2022).

III.8. Solutions pour une Économie Circulaire

La transition vers une économie circulaire constitue la solution majeure pour transformer ces défis en opportunités. En recyclant les déchets en engrais organiques, on limite la perte de nutriments et on favorise la durabilité des écosystèmes terrestres (Dhar et al., 2024).

Ces stratégies de gestion permettent non seulement de réduire l'empreinte écologique, mais aussi d'améliorer les marges bénéficiaires des industries de la pêche en créant des produits à haute valeur ajoutée comme les biopolymères (Aboudamia et al., 2024).

III.9. Voies de valorisation et opportunités économiques des sous-produits

La transformation de cette biomasse en produits à haute valeur ajoutée peut s'articuler autour de quatre axes principaux (Maia Junior & de Oliveira Sales, 2013) (Dash et al., 2022) :

- a. **Agriculture** : Recyclage sous forme d'engrais organiques et de fumiers pour améliorer la fertilité des sols (Dhar et al., 2024) (Jaies et al., 2024).
- b. **Alimentation pour animaux et aquaculture** : Fabrication de farine de poisson, d'huiles et d'hydrolysats de protéines grâce à des techniques mécaniques ou biotechnologiques (Saleh et al., 2022).
- c. **Industrie pharmaceutique et cosmétique** : Extraction de composés bioactifs, de collagène, de gélatine et de lipides spécifiques (Linder et al., 2006) ; (Hussain et al., 2025).

- d. **Applications chimiques et aromatiques** : Production d'extraits aromatiques et de produits chimiques biosourcés (Linder et al., 2006) ; (Maia Junior & de Oliveira Sales, 2013).

III.10. Mécanismes de biosorption des métaux lourds par les constituants des déchets halieutiques

La valorisation des déchets de poisson, notamment les écailles, arêtes et peaux ... en tant que biosorbants repose sur leur composition chimique et structurale unique. Ces matériaux ne sont pas de simples déchets organiques, mais des complexes biopolymériques riches en sites réactifs capables de fixer les métaux lourds.

III.10.1. Fraction organique

La fraction organique des écailles est principalement constituée de fibres de collagène entrelacées. Ces protéines sont riches en groupes fonctionnels qui agissent comme des ligands pour les ions métalliques :

- **Groupes Amines et Carbonyles** : Les analyses par spectroscopie infrarouge (FTIR) démontrent que les groupes amines ($-NH_2$) et carbonyles ($-C=O$) sont les principaux sites de chélation pour des métaux comme le Zinc (Zn^{2+}) et le Fer (Fe^{2+}) (Othman et al., 2016) ; (Zayadi & Othman, 2013).
- **Chitosane et Chitine** : Dans le cas des déchets de crustacés, le chitosane modifié présente une densité élevée de groupes hydroxyles ($-OH$) et amines, permettant une élimination efficace du Chrome et du Nickel par des mécanismes de partage d'électrons (Rahman et al., 2023).
- **Sites de liaison azotés** : La présence de composés nitrés et de liaisons peptidiques dans les écailles de Tilapia permet une interaction électrostatique forte avec les cations métalliques en solution (Zayadi & Othman, 2013).

III.10.2. Fraction minérale

La phase minérale joue un rôle crucial dans l'immobilisation des métaux lourds :

- **Échange Cationique** : Les ions Calcium (Ca^{2+}) de la structure minérale peuvent être substitués par des ions de métaux lourds tels que le Plomb (Pb^{2+}) et le Cadmium (Cd^{2+}) (Pal & Maiti, 2020) ; (Stevens & Batlokwa, 2017).

- **Precipitation et adsorption :** Les groupements phosphates (PO_4^{3-}) agissent comme des sites de complexation de surface qui immobilisent les métaux sous forme de phosphates métalliques stables. Ce mécanisme réduit significativement la mobilité des contaminants, limitant ainsi leur toxicité au sein des sédiments ou des eaux usées (Pal & Maiti, 2020) ; (Sultana et al., 2025).

IV. Etude de la farine de poisson

La valorisation des sous-produits de la pêche et de l'aquaculture s'inscrit dans la rationalisation des pertes et l'optimisation des ressources marines sous l'angle de l'économie circulaire (Cooney et al., 2023). Chaque année, l'ampleur de la production de têtes, d'arêtes, de viscères, de peaux et d'autres coproduits issus des industries de transformation du poisson est considérable (Love et al., 2022). Au-delà des déchets, ces produits sont d'excellentes matières premières pour la production de farines et d'huiles de poisson, assurant ainsi la pérennité du secteur.

IV.1. Historique de la farine de poisson

L'industrie de la farine de poisson a débuté vers 1850, période où le traitement des captures visait exclusivement l'extraction de l'huile, reléguant les matières solides au rang de déchets (Dekersmaecker, s.d). Initialement valorisés comme engrais azotés, ces résidus ont connu un changement de paradigme au début du XXe siècle pour devenir une composante essentielle de l'alimentation animale (Guerreiro & Retiere., 1992).

Ce passage de la fertilisation à la nutrition s'est accéléré après la Première Guerre mondiale, suite à la démonstration scientifique de la supériorité des protéines marines — contenant une « albumine complète » — sur les sources végétales (Dekersmaecker, s.d). Dès 1920, la structuration du marché international, notamment en Europe, a imposé les premières normes de qualité basées sur des essais zootechniques officiels (Wilgress, 1924) ; (*Considérations Sur L'emploi Des Farines De Poisson*, 1925). Aujourd'hui, la farine de poisson est passée du statut de sous-produit de récupération à celui de ressource stratégique pour l'aquaculture mondiale, s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire (Caruso et al., 2020) ; (Coppola et al., 2021).

IV.2. Définition et terminologie

La farine de poisson est un concentré protéique stable, se présentant sous forme de poudre ou de granulés, obtenu par un traitement industriel (cuisson, pressage, séchage et broyage) de la matière première halieutique. Ce processus vise à séparer les fractions solides, huileuses et aqueuses afin d'extraire la majeure partie de l'eau et des lipides (Guerreiro & Retiere, 1992). Elle constitue une source nutritionnelle dense, riche en acides aminés essentiels, en énergie métabolisable et en minéraux (Cho & Kim, 2011).

IV.3. Cadre réglementaire et normatif

Selon le **Codex Alimentarius** (classement CX/PR 23/54/6), la farine de poisson est répertoriée comme "un produit alimentaire secondaire d'origine animale" (Type 16). Cette classification désigne des denrées issues d'une transformation simple (séchage, broyage) qui ne modifie pas l'identité fondamentale du produit d'origine (Codex Alimentarius, 2023).

IV.4. Classifications et types de farines de poisson

La classification des farines de poisson repose principalement sur la nature de la matière première utilisée :

- **Farines de poissons entiers** : Elles sont produites à partir de poissons pélagiques de petite taille (comme l'anchois ou le hareng), capturés spécifiquement pour la réduction industrielle. Ces farines présentent généralement une stabilité nutritionnelle élevée (Cho & Kim, 2011); (Kandyliari et al., 2020).
- **Farines de coproduits (ou sous-produits)** : Issues de la valorisation des restes de l'industrie du filetage (têtes, arêtes, chutes). Bien que leur teneur en minéraux soit plus élevée, elles constituent une alternative durable et stratégique dans le cadre de l'économie circulaire (Caruso et al., 2020); (Coppola et al., 2021).

IV.5. Composition nutritionnelle des farines de coproduits

La valeur nutritionnelle des farines de coproduits dépend étroitement de la nature des tissus utilisés (têtes, viscères, arêtes), mais elle se caractérise généralement par les paramètres suivants :

- **Teneur en protéines** : Bien que variable, elle se situe souvent entre 58 % et 68 %. Ces protéines sont hautement digestibles et riches en acides aminés essentiels, notamment en lysine et méthionine (Cho & Kim, 2011); (Kandyliari et al., 2020).
- **Profil lipidique** : Ces farines sont une source majeure d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne, particulièrement les oméga-3 tels que l'EPA et le DHA, essentiels pour la santé cardiovasculaire et immunitaire des animaux (Coppola et al., 2021).
- **Richesse minérale** : Contrairement aux farines de poissons entiers, les farines de coproduits (notamment celles riches en arêtes) présentent des concentrations plus élevées en cendres, fournissant des apports substantiels en calcium, phosphore et magnésium (Guerreiro & Retiere, 1992) ; (Caruso et al., 2020).
- **Vitamines et oligo-éléments** : Elles contiennent des vitamines du groupe B et des minéraux traces comme le sélénium, l'iode et le zinc, dont la biodisponibilité est supérieure aux sources synthétiques (Cho & Kim, 2011).

Tableau 05. Profil nutritionnel et molécules bioactives des farines de coproduits de pêche.

Composants	Sous-catégories	Concentrations / Détails techniques	Références
Protéines	Protéines brutes	58 % - 68 % (selon le ratio têtes/arêtes).	(Kandyliari et al., 2020)
	Profil Acides Aminés	Richesse élevée en Lysine et Méthionine.	(Cho & Kim, 2011)
	Peptides bioactifs	Présence de peptides antioxydants et antihypertenseurs issus de l'hydrolyse.	(Caruso et al., 2020)
Lipides	Total Lipides	8 % - 12 % (variable selon l'espèce).	(Kandyliari et al., 2020)
	Oméga-3 (PUFA)	Teneur importante en EPA et DHA (essentiels pour l'immunité).	(Coppola et al., 2021)
Minéraux	Cendres totales	15 % - 25 % (plus élevé que dans les farines de poissons entiers).	(Kandyliari et al., 2020)
	Macro-éléments	Rapport Calcium/Phosphore optimal pour le squelette.	(Caruso et al., 2020)
	Oligo-éléments	Présence de Fer, Zinc, Sélénium et Iode.	(Kandyliari et al., 2020)
Composants Spécifiques	Collagène / Gélatine	Extraits principalement des peaux et des arêtes présentes dans les coproduits.	(Coppola et al., 2021)
	Chitine	Présente si les coproduits incluent des restes de crustacés.	(Caruso et al., 2020)

IV.6. Procédés de fabrication

La production de farine de poisson repose sur une succession d'étapes thermomécaniques visant à fractionner la matière première en trois phases distinctes : les solides (protéines/minéraux), les lipides (huiles) et l'eau (Dekersmaecker, s.d).

- **Cuisson** : Étape fondamentale permettant la coagulation des protéines et la libération de l'eau et de l'huile (Guerreiro & Retiere, 1992).
- **Pressage** : Action mécanique séparant le "gâteau de presse" (solides) du "liquide de presse" (eau et huile) (Dekersmaecker, s.d).
- **Séchage** : Élimination de l'humidité du gâteau de presse pour stabiliser le produit final et prévenir toute dégradation microbienne (Cho & Kim, 2011).
- **Broyage et Stockage** : Réduction du gâteau séché en une poudre homogène, souvent additionnée d'antioxydants pour stabiliser les graisses (Guerreiro & Retiere, 1992); (Cho & Kim, 2011).

V. Le Co-Compostage

V.1. Définition de Compostage

Le compostage est un processus biologique aérobie de conversion et de valorisation des matières organiques. Cette méthode favorise le recyclage des nutriments pour améliorer la structure et la fertilité du sol. Sur le plan environnemental, il permet de consolider les déchets destinés à l'enfouissement, de réduire le volume des résidus solides et de limiter la contamination des compartiments air, eau et sol. (Chadar et al., 2018)

V.2. Définition de Co-Compostage

Le co-compostage consiste en la combinaison de divers déchets organiques de natures différentes (ex : boues d'épuration, déchets verts, déchets de poisson, restes alimentaires). L'objectif est d'optimiser les caractéristiques physico-chimiques du mélange (notamment le rapport C/N) pour garantir un processus performant et un produit final riche en nutriments. (Mortula et al., 2020)

V.3. Méthode de Berkeley

V.3.1. Choix de la méthode

Le choix de la méthode de Berkeley repose sur trois arguments scientifiques majeurs adaptés à nos matrices :

- **Rapidité du processus** : Elle permet d'obtenir un compost en 14 à 18 jours grâce à des retournements fréquents, une cinétique indispensable face aux contraintes temporelles.

- **Hygiénisation thermique :** L'activité microbienne aérobie intense favorise une montée rapide en température (55 à 65°C), essentielle pour détruire les pathogènes.
- **Contrôle des odeurs :** L'aération continue par retournements limite l'anaérobiose et neutralise les nuisances olfactives.

V.3.2. Présentation de la technique

Formulée par l'Université de Californie à Berkeley, cette technique est un processus de décomposition thermophile accéléré. Elle se distingue par l'utilisation de températures élevées (55 à 65°C) et une aération systématique, permettant d'obtenir un compost mûr en seulement 18 à 21 jours (Zairinayati & Purnama, 2025).

V.3.3. Avantages du procédé

Les bénéfices de la méthode de Berkeley reposent sur l'optimisation des cinétiques de dégradation, offrant des avantages significatifs :

- **Célérité du processus :** Réduction drastique du temps de traitement (14 à 21 jours) par rapport aux méthodes passives.
- **Hygiénisation :** Destruction des pathogènes et des graines d'adventices par la phase thermophile.
- **Efficacité spatiale :** Gain de temps et d'espace grâce à une rotation rapide des stocks.
- **Qualité du produit :** Obtention d'un compost homogène et riche en nutriments. (FAO, s.d.)

V.3.4. Principe de la méthode de Berkeley

La méthode de Berkeley repose sur un processus de décomposition thermophile aérobie, dans lequel des communautés microbiennes actives dégradent la matière organique en conditions contrôlées. L'activité respiratoire intense de ces micro-organismes génère une chaleur interne qui élève la température du tas jusqu'à 55–71°C, créant ainsi une phase thermophile auto-entretenue. C'est précisément ce couplage entre l'activité biologique et la dynamique thermique qui distingue cette méthode des techniques de compostage passif et qui lui confère sa rapidité. L'aération régulière par retournement joue un rôle central : elle maintient les conditions aérobies indispensables au métabolisme microbien, tout en redistribuant la chaleur de manière homogène au sein du tas. (FAO, s.d.).

V.3.5. Conditions opératoires

L'efficacité de la méthode de Berkeley est conditionnée par le respect simultané de plusieurs paramètres opératoires interdépendants.

V.3.5.a. Granulométrie des substrats

La taille des matériaux conditionne directement la surface spécifique exposée à l'activité microbienne. Une fragmentation entre 1,25 et 3,75 cm est considérée comme optimale. Les matières ligneuses riches en carbone nécessitent un broyage préalable, tandis que les matières tendres ne requièrent pas de fragmentation poussée afin d'éviter un tassement défavorable à l'aération.

V.3.5.b. Équilibre nutritionnel (Rapport C/N)

Un rapport Carbone/Azote (C/N) cible de 30 est nécessaire pour maximiser le métabolisme des décomposeurs. Il est obtenu par la combinaison de :

- matières vertes riches en azote : boues de STEP, déchets maraîchers, tontes fraîches ;
- matières sèches riches en carbone : sciure de bois, paille, feuilles mortes.

Un rapport C/N inférieur à 30 entraîne des pertes d'azote sous forme ammoniacale, corrigées par l'ajout de matériaux carbonés supplémentaires.

V.3.5.c. Dynamique thermique et humidité

Le tas doit atteindre un volume minimal de 1 m³ pour assurer l'auto-entretien de la chaleur. La température optimale se situe autour de 71°C ; au-delà de ce seuil, la microflore risque d'être détruite, imposant un retournement immédiat. L'humidité est maintenue autour de 50% pour éviter à la fois l'inhibition microbienne par dessèchement et l'anaérobiose par excès d'eau.

V.3.5.d. Aération par retournement

L'apport en oxygène est assuré par des retournements réguliers déplaçant les matières de la périphérie vers le centre thermique du tas, selon deux rythmes possibles :

Tableau 06. Influence de la fréquence de retournement sur la durée du processus de compostage.

Fréquence de retournement	Durée du processus
Quotidien	14 jours
Tous les deux jours	21 jours

V.3.5.e. Critères de maturité

Le processus est considéré comme achevé lorsque les paramètres se stabilisent et que le compost présente les caractéristiques suivantes :

- **Stabilisation thermique** : La température chute naturellement et ne remonte plus après retournement.
- **Évolution physique** : Une réduction notable du volume initial et une coloration virant au brun foncé ou au noir.
- **Qualité organoleptique** : Le dégagement d'une odeur agréable d'humus forestier.
- **Criblage** : Un passage final sur un tamis de 2,5 cm permet d'extraire les éléments grossiers non décomposés, qui serviront d'activateurs pour le cycle suivant.

V.4. Potentiel de bioremédiation et stabilisation des métaux lourds

L'originalité de la valorisation des sous-produits halieutiques réside dans la capacité de la farine produite à agir comme un agent de stabilisation active lors du co-compostage avec les boues de STEP. Bien que les boues résiduaire puissent contenir des charges métalliques, l'incorporation de notre farine issue des déchets permet de neutraliser ce risque environnemental.

- **Rôle de l'hydroxyapatite et immobilisation du Plomb (Pb)** : La farine d'os et les écailles de poisson présentes dans les sous-produits sont particulièrement abondantes en hydroxyapatite, un biomatériau qui fait preuve d'une efficacité remarquable dans l'adsorption des métaux toxiques (Abu Amr et al., 2024). Au contact du plomb issu des boues ou du sol, l'apatite initie une réaction de précipitation formant de la pyromorphite (Hodson et al., 2000). Ce minéral cristallin est extrêmement stable et possède une solubilité si faible qu'il ne peut être absorbé ni par le système digestif, ni par les racines des végétaux (Freeman, 2012).

- **Réduction de la biodisponibilité et capture du Cadmium (Cd) :** L'ajout de ces amendements phosphatés riches en hydroxyapatite réduit drastiquement la fraction biodisponible des métaux lourds, notamment le plomb et le cadmium. Des études montrent que l'utilisation de dérivés de poisson peut faire chuter la concentration de plomb dans les lixiviats de 0,28 mg/L à seulement 0,00065 mg/L en quelques semaines (Sneddon et al., 2002) (Freeman, 2012).
- **Rôle protecteur du Chitine :** Les dérivés des carapaces et des écailles (chitine et chitosane) présents dans la farine, reconnus pour leur robuste capacité d'adsorption liée à leurs propriétés chimiques uniques, favorisent la croissance végétale tout en diminuant l'efficacité de la phytoextraction des métaux toxiques et des polluants organiques (Maleki-Roudposhti et al., 2023).
- **Limitation du transfert vers la plante :** L'application de cette farine réduit le facteur de translocation du Nickel (Ni) vers les parties aériennes de la plante, agissant comme une barrière chimique qui protège la chaîne alimentaire de toute contamination métallique (Maleki-Roudposhti et al., 2023).
- **Stabilisation multi-élémentaire (Zn, Cu, Cd) :** En plus du plomb, les propriétés de sorption, d'échange ionique et d'adsorption de la farine de poisson (portées par l'hydroxyapatite et le chitosane) permettent d'immobiliser le zinc (Zn), le cuivre (Cu) et le cadmium (Cd), augmentant ainsi la sécurité environnementale du co-compost produit et s'alignant parfaitement avec les principes de l'économie circulaire (Sneddon et al., 2002) (Hodson et al., 2000).

Chapitre II :

Matériel et Méthodes

Chapitre II : Matériels et Méthodes

L'étude s'articule autour d'une double problématique de valorisation organique : d'une part, les **boues déshydratées de la STEP de Beni Messous**, dont la caractérisation physico-chimique vise à évaluer le potentiel fertilisant et la sécurité sanitaire pour une intégration en **valorisation agricole**. D'autre part, la transformation des **déchets de la pêche** en farine constitue une voie de valorisation innovante, permettant de recycler des sous-produits riches en nutriments inorganiques. La synergie entre ces deux substrats permet d'envisager la création d'un amendement organique complet, transformant ces déchets urbains et industriels en ressources durables pour la restauration des sols.

I. Présentation de la station d'épuration

Mise en service en 2007 par la SEAAL, la station d'épuration (STEP) de Beni Messous assure le traitement biologique par boues activées des effluents provenant de cinq communes de l'ouest d'Alger via quatre sous-bassins versants (Aïn Benian, Oued Beni Messous, Staouéli et Ouled Fayet). Avec une capacité actuelle de 250 000 EH et un débit moyen de 33 100 m³/jour, l'installation atteint un rendement d'élimination de la pollution de 95 %. Le processus génère annuellement environ 8 800 tonnes de boues déshydratées présentant une siccité moyenne de 22,9 %, issues d'une filière de traitement complète incluant prétraitement, aération biologique, clarification et déshydratation mécanique.

II. Échantillonnage de Boues déshydratées

Le 25 février 2026, au cœur de la période hivernale, il a été procédé au prélèvement de 15 kg de boues déshydratées fraîches au niveau de la station d'épuration (STEP) de Beni Messous.

Afin que les échantillons soient stabilisés et que toute activité biologique susceptible de modifier leur composition soit stoppée, les boues ont été conditionnées dans des sachets hermétiques dûment étiquetés (avec précision de la date, de l'heure et du numéro de lot). Les échantillons ont ensuite été immédiatement congelés, ce qui a garanti une conservation optimale de leurs propriétés physico-chimiques jusqu'aux étapes d'analyse.

III. Échantillonnage et collecte de la biomasse de déchets halieutiques

La biomasse utilisée dans cette étude, constituée de déchets halieutiques divers, a été collectée de manière séquentielle auprès de plusieurs sources afin que la représentativité des rejets locaux soit assurée.

Les gisements comprenaient des poissonneries, des établissements de restauration, des zones portuaires ainsi que des rejets ménagers. Au total, une quantité brute d'environ 20 kg de déchets a été rassemblée. Ce stock était principalement composé d'un mélange de peaux, d'écaillés, de viscères et d'arêtes de différentes espèces.

Afin que toute dégradation biologique soit prévenue et que l'intégrité physico-chimique des échantillons soit préservée, un protocole de conservation rigoureux a été appliqué dès la collecte : les déchets ont été immédiatement nettoyés à l'eau courante, puis ont été conditionnés et stockés en congélation à -18°C jusqu'à l'étape de préparation et de traitement.

IV. Fabrication de la farine issue de déchets halieutiques

Le protocole suivi pour la transformation des déchets bruts en farine de poisson a été élaboré en s'appuyant sur les travaux de valorisation des coproduits marins de Merhoul et Nour (2022/2023). Les étapes chronologiques sont les suivantes :

A) Prétraitement

Cette phase initiale a consisté au nettoyage rigoureux à l'eau courante des déchets décongelés afin que les impuretés de surface et les débris non souhaités soient éliminés avant le début du cycle de transformation.

B) Cuisson

La biomasse a été soumise à une étape de cuisson. Ce traitement thermique est essentiel pour la coagulation des protéines et la dénaturation des complexes lipoprotéiques, ce qui a facilité la séparation ultérieure des phases liquide et solide.

C) Pressage

Après la cuisson, la matière a subi un pressage mécanique. Cette opération a permis l'extraction de la phase liquide (eau et huiles) afin que la fraction solide communément appelée « gâteau de presse » soit isolée.

D) Séchage

Le gâteau de presse a été placé dans une étuve régulée à une température de 50 °C pendant une durée de 6 jours. Ce séchage lent a assuré une réduction optimale du taux d'humidité (inférieur à 10 %) tout en garantissant la préservation des qualités biochimiques de la matière.

E) Broyage

Une fois séchée, la matière a été broyée de manière à ce qu'une texture granulaire sous forme de grumeaux (mouture non fine) soit obtenue, conformément aux objectifs spécifiques de l'étude.

F) Conditionnement

À l'issue de l'étape de broyage, la quantité finale de farine obtenue était d'environ 3,350 kg (pour une biomasse initiale de 20 kg). La majeure partie de la farine a été utilisée immédiatement après le broyage. Cependant, une fraction de 350 g a été conditionnée dans une boîte en verre hermétique, puis a été entreposée à température ambiante dans un dessiccateur pour servir de témoin lors des analyses physico-chimiques ultérieures.



Figure 04. Différentes étapes du procédé expérimental de préparation et de stabilisation de la farine issue de déchets halieutiques. (a : Prétraitement, b : Cuisson, c : Pressage, d : Séchage, e : Broyage, f : Conditionnement)

V. Caractérisation physico-chimique, valeur nutritionnelle et sécurité sanitaire des matrices d'étude**V.1. Propriétés physico-chimiques et valeurs nutritionnelle****V.1.1. Caractérisation de l'état hydrique et des constantes physiques**

Ce travail repose sur l'analyse comparative des paramètres fondamentaux de la boue de STEP et de la farine de poisson, tels que la siccité, le taux de cendres et la richesse en nutriments (azote et phosphore). Cette évaluation permet de valider le potentiel de valorisation des deux matrices. Un dosage spécifique des métaux lourds est toutefois ajouté pour les boues de STEP afin de garantir leur innocuité sanitaire avant le co-compostage.

V.1.1.a. Détermination de la teneur en eau (Humidité) et de la matière sèche (MS)

L'évaluation du taux d'humidité est une phase fondamentale pour vérifier la stabilité des boues après déshydratation et de la farine durant son stockage, afin de prévenir toute dégradation microbienne. Cette analyse permet de quantifier la matière sèche totale en application des directives de la norme **NF EN 12880** pour les boues et de la norme **ISO 6496:1983** pour la farine.

Principe :

La méthode a reposé sur la mesure de la perte de masse de l'échantillon après un séchage à l'étuve à une température de 103 ± 2 °C jusqu'à ce qu'un poids constant soit obtenu. La teneur en eau a ainsi été déduite de cette diminution pondérale, tandis que la matière sèche (MS) a correspondu au résidu solide restant, ce qui a représenté le complément à 100 % de la teneur en humidité.

Appareillage :

- Balance analytique (précision $\pm 0,001$ g).
- Creuset en porcelaine, muni d'un couvercle étanche.
- Étuve électrique ventilée, réglable à 103 ± 2 °C.
- Dessiccateur muni d'un desséchant actif (type gel de silice).

Mode opératoire :

La manipulation a été réalisée en trois essais indépendants (E' , E'' , E''' pour la boue et E_1 , E_2 , E_3 pour la farine) afin que la répétabilité des résultats soit garantie. Pour chaque essai, la procédure suivante a été appliquée :

1. **Préparation des creusets :** Les creusets et leurs couvercles ont été nettoyés rigoureusement. Ils ont été placés à l'étuve à 103 °C pendant 30 minutes, puis ont été laissés à refroidir dans le dessiccateur. L'ensemble a été pesé à vide et la masse a été notée (M_0 pour la boue et m_0 pour la farine).
2. **Prise d'essai :** Une prise d'essai d'environ 5 g de chaque matrice a été introduite séparément (boue et farine) dans leurs creusets respectifs. Chaque ensemble a été pesé pour l'obtention de la masse initiale humide, notée M_1 pour la boue et m_1 pour la farine.
3. **Séchage :** Les creusets ouverts et leurs couvercles ont été placés à l'étuve réglée à 103 ± 2 °C pendant une durée effective de 4 heures.
4. **Refroidissement :** Après le cycle de chauffage, les creusets ont été refermés immédiatement et ont été transférés dans le dessiccateur. Ils ont été laissés à refroidir pendant 30 à 45 minutes jusqu'à l'obtention de l'équilibre thermique (température ambiante).
5. **Pesée finale :** Une pesée rapide de chaque ensemble a été effectuée après le séchage pour la détermination de la masse constante, notée M_2 pour la boue et m_2 pour la farine.



Figure 05. Étapes de pesée et de préparation thermogravimétrique pour l'analyse de la siccité de la farine de poisson **(a)** et des boues de STEP **(b)**.

Expression des résultats :

Les calculs ont été effectués selon les formules ci-dessous, en utilisant les notations respectives pour chaque matrice (M_n pour la boue et m_n pour la farine) afin que la lecture des tableaux de résultats soit facilitée.

- Teneur en eau (humidité) sur produit brut :

$$H\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \times 100$$

- Teneur en matière sèche (MS) sur produit brut :

$$MS\% = 100 - H\%$$

Légende :

- M_0 / m_0 : Masse du creuset vide + couvercle (g).
- M_1 / m_1 : Masse du creuset + couvercle + échantillon avant séchage (g).
- M_2 / m_2 : Masse du creuset + couvercle + échantillon après séchage (g).

V.1.1.b. Détermination du pH

Le pH est un indicateur fondamental de stabilité chimique et de fraîcheur. Dans les boues, il conditionne la solubilité des polymères et la spéciation des métaux lourds, tandis que pour la farine, il influence la solubilité des protéines et les interactions électrostatiques lors de la biosorption. La mesure est effectuée selon les normes **FSSAI 06.026:2022 / ISO 11289:1993(E)** pour la farine et les protocoles standards pour les boues.

Principe :

La méthode repose sur la mesure potentiométrique de l'activité des ions hydrogène (H^+) au moyen d'une électrode de verre combinée, immergée dans une suspension de boue diluée au 1/5 (m/v).

Appareillage et Réactifs :

- **Appareillage** : pH-mètre de précision, béchers, agitateur et barreau magnétique.
- **Réactifs** : Solutions tampons standards (pH 4, 7 et 10), eau distillée et papier absorbant doux.

Mode opératoire :

La manipulation a été effectuée en trois essais indépendants pour que la fiabilité des résultats soit garantie :

1. **Étalonnage** : Avant toute série de mesures, le pH-mètre a été étalonné à l'aide de solutions tampons (pH 4, 7 et 10) afin que la linéarité de la réponse soit assurée.

2. **Préparation de la suspension :** Une masse de 10 g de boue a été pesée, puis a été introduite dans 50 mL d'eau distillée. La suspension a été agitée vigoureusement pour permettre une diffusion optimale des ions.

3. **Immersion et Lecture :**

- L'électrode combinée a été immergée dans la suspension maintenue à température ambiante.
- Trois mesures successives ont été effectuées après la stabilisation complète de l'affichage numérique.
- Entre chaque essai, l'électrode a été soigneusement rincée à l'eau distillée et a été essuyée avec du papier absorbant doux pour que toute contamination croisée soit évitée.



Figure 06. Dispositif expérimental et étapes de mesure du pH des solutions d'analyse à l'aide d'un pH-mètre de précision.

Expression des résultats :

Le résultat final a été calculé comme la moyenne arithmétique des trois lectures effectuées :

$$pH = \frac{pH_1 + pH_2 + pH_3}{3}$$

Légende :

- pH_1 : Première lecture.
- pH_2 : Deuxième lecture.
- pH_3 : Troisième lecture.

V.1.2. Caractérisation de la composition chimique (Minérale, Organique et Métallique)**V.1.2.a. Détermination de la matière organique et minérale (Perte au feu)**

L'analyse de la fraction minérale (cendres) vise à quantifier les sédiments inorganiques totaux après élimination des composés organiques. Elle est réalisée selon la norme **NF EN 13037** pour les boues et les normes **ISO 5984:2022 / ISO 5985:2002** pour la farine. Cette étape permet de déterminer par différence, le taux de matière organique, paramètre clé pour évaluer le potentiel de valorisation des deux matrices.

Principe :

La méthode a reposé sur une minéralisation par voie sèche. Une combustion complète de la matière organique de l'échantillon a été subie par ce dernier dans un four à moufle porté à 550 ± 25 °C. Le résidu obtenu après l'incinération a représenté la fraction minérale fixe (cendres).

Appareillage :

- Four à moufle réglable à 550 ± 25 °C.
- Balance analytique (précision $\pm 0,001$ g).
- Creuset à incinération (porcelaine).
- Dessiccateur avec dessiccant.

Mode opératoire :

La manipulation a été réalisée en trois essais indépendants (E' , E'' , E''' pour la boue et E_1 , E_2 , E_3 pour la farine) afin que la répétabilité des résultats soit garantie. Cette étape a été réalisée en utilisant les résidus secs issus de la détermination de l'humidité.

1. **Préparation :** Les creusets contenant la matière sèche obtenue précédemment ont été utilisés. (M_2 pour la boue et m_2 pour la farine).
2. **Incinération :** Les creusets ont été placés dans le four à moufle préchauffé à 550 ± 25 °C. La calcination a été maintenue pendant une durée minimale de 3 heures. Le processus a été finalisé lorsque les cendres ont présenté un aspect gris-blanc homogène, sans traces de particules noires (carbone résiduel).

3. **Refroidissement** : Après la calcination, les creusets ont été laissés à refroidir partiellement à l'air libre avant d'être transférés dans un dessiccateur pendant 30 à 45 minutes pour que l'équilibre thermique soit atteint.
4. **Pesée finale** : Chaque creuset a été pesé rapidement pour l'obtention de la masse finale, notée M_3 pour la boue et m_3 pour la farine.

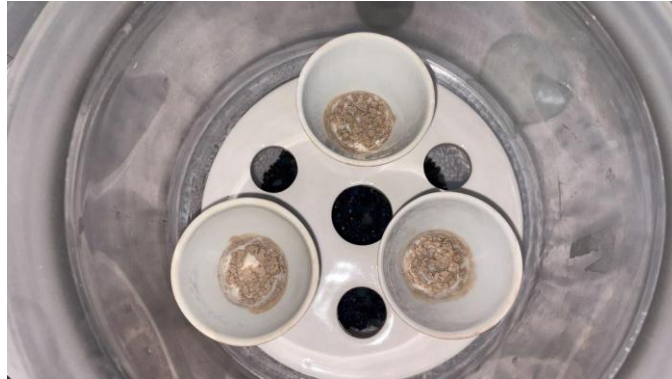


Figure 07. Étape finale de calcination et phase de stabilisation thermique des cendres au dessiccateur.

Expression des résultats :

Les calculs ont été effectués selon les formules ci-dessous :

- Teneur en matière minérale :

$$MM (\%) = \frac{M_3 - M_0}{M_2 - M_0} \times 100$$

- Teneur en matière organique :

$$MO (\%) = 100 - MM\%$$

Légende :

- MM : Teneur en matière minérale.
- MO : Teneur en matière organiques.
- M_0 / m_0 : Masse creuset vide (g).
- M_2 / m_2 : Masse du creuset + échantillon avant calcination (g).
- M_3 / m_3 : Masse du creuset + cendres après calcination (g).

V.1.2.b. Évaluation du carbone organique total :

La teneur en carbone organique total (COT) est un indicateur fondamental pour évaluer la qualité nutritionnelle des substrats et leur potentiel de biodégradabilité lors du co-compostage. Dans le cadre de cette étude pour la farine de poisson comme pour la boue de STEP, le carbone organique a été estimé indirectement à partir du taux de matière organique (MO), qui a été déterminé par la méthode de calcination (perte au feu).

Expression des résultats :

Le calcul repose sur la relation empirique de Van Bemmelen (Pansu & Gautheyrou, 2003, 994), couramment admise pour les matrices organiques :

$$MO (g/kg) = \frac{COT (g/kg)}{1,72}$$

Pour que la concentration massique en carbone soit obtenue, la formule suivante a été utilisée :

$$COT(g) = \frac{MO (g)}{1,72}$$

Légendes :

- *COT* : Carbone Organique Total.
- *MO* : matière organique.

V.1.2.c. Détermination ETMs :

La quantification des métaux lourds est une étape déterminante pour évaluer la charge polluante et la conformité environnementale des boues. Cette analyse est réalisée par Spectroscopie d'Absorption Atomique à four graphite selon les exigences de la norme NF EN ISO 11885, garantissant une mesure précise des éléments traces métalliques.

Principe :

L'échantillon minéralisé a été injecté dans un plasma d'argon à haute température pour que les atomes métalliques soient excités. Un rayonnement lumineux caractéristique a alors été émis par ces derniers.

L'intensité de cette lumière, mesurée par spectrométrie, a permis la quantification simultanée de la concentration de chaque métal présent.

Appareillage :

- Lyophilisateur
- Mortier et pilon en agate
- Balance analytique (précision $\pm 0,001$ g)
- Dessiccateur
- Godets en téflon

Mode opératoire :**A) Lyophilisation :**

1. Les échantillons ont été placés en tubes, puis ont été soumis à une congélation préalable durant 72 heures.
2. Les tubes congelés ont été transférés dans le lyophilisateur pour que l'eau soit extraite sous vide.

B) Broyage :

1. La boue lyophilisée a été introduite dans le mortier en agate.
2. Un broyage manuel a été effectué par des mouvements circulaires avec le pilon jusqu'à ce qu'une granulométrie fine et régulière soit obtenue.
3. La poudre obtenue a été transférée dans un tube sous vide, puis ce dernier a été stocké dans le dessiccateur jusqu'à l'étape suivante.



Figure 08. Échantillon lyophilisé Broyé

C) Minéralisation de l'échantillon :

1. Les godets en Téflon ont été rincés minutieusement à l'eau ultra-pure (type Milli-Q) sous une hotte aspirante.
2. Les godets vides ont été pesés.
3. Le tarage des godets vides a été effectué, puis une masse exacte de 0,5 g de poudre d'échantillon a été pesée.
4. Attaque acide (Opérations impérativement réalisées sous hotte) :
 - i. Un volume de 6 ml d'acide chlorhydrique (HCl 37 %) a été introduit sur l'échantillon.
 - ii. Un volume de 2 ml d'acide nitrique (HNO_3) a été ajouté.
5. Un témoin (échantillon blanc) contenant uniquement les acides, sans échantillon de boue, a été réalisé simultanément afin que d'éventuelles contaminations soient corrigées.
6. La réaction de minéralisation a été laissée à s'opérer à froid pendant 24 heures sous la hotte afin que la dissolution complète des éléments métalliques soit assurée.



Figure 09. Minéralisation à froid

7. Les godets ont été placés sur une plaque chauffante pendant 3 heures (à température de 120°C).
8. Après refroidissement, les parois internes et le couvercle des godets ont été rincés à l'eau ultra-pure pour qu'aucune trace métallique ne soit perdue.
9. Le liquide obtenu a été récupéré quantitativement dans des tubes à essai propres.
10. Les tubes ont été entreposés au réfrigérateur (environ 4 °C) pour que la stabilité de la solution soit maintenue.
11. Les solutions obtenues après minéralisation ont été analysées par SAA. Pour les métaux présentant des concentrations initiales élevées (Cd, Cu et Zn), une dilution au 1/10 a été réalisée au préalable afin que l'absorbance soit ajustée à la gamme de linéarité de l'appareil.
12. L'analyse finale a été procédée par spectrométrie d'absorption atomique au four de graphite (SAA-FG) pour que les éléments traces métalliques soient quantifiés.
13. Le calcul des teneurs finales en mg/kg MS a intégré systématiquement ce facteur de dilution ($F = 10$).

Expression des résultats :

Les calculs ont été effectués selon la formule ci-dessous :

$$C_{Cd} = \frac{C_{SAA} \times V_D \times F}{m_{MS}}$$

Légende :

- C_{Cd} : Concentration donnée par l'appareil (mg/L).
- V_D : Volume final de la solution après minéralisation (L).
- m_{MS} : Masse de l'échantillon de boue sèche utilisée (Kg).
- F : Facteur de dilution.

V.1.3. Caractérisation biochimique et nutritionnelle**V.1.3.a. Détermination de l'Azote Total (Méthode de Kjeldahl)**

Le dosage de l'azote total est indispensable pour évaluer la valeur agronomique des boues de STEP ainsi que la qualité nutritionnelle et la capacité de complexation de la farine de poisson. Cette analyse, réalisée selon la méthode de référence de **Kjeldahl**, permet de quantifier l'azote organique et ammoniacal. Pour les boues, cet indicateur est essentiel pour estimer le potentiel fertilisant, tandis que pour la farine, il permet de déterminer par extrapolation le taux de protéines brutes. La maîtrise de ce paramètre est cruciale pour équilibrer le rapport nutritionnel lors du processus de co-compostage.

Principe :

La méthode repose sur la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal par minéralisation à l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur. L'ammonium obtenu est libéré sous forme d'ammoniac (NH_3) par ajout de soude, puis entraîné par distillation dans une solution d'acide borique. Le dosage final est effectué par titrage avec une solution d'acide sulfurique de normalité connue (N/20), permettant de quantifier l'azote total initial.

Appareillage :

- Minéralisateur : Bloc chauffant ou rampe de chauffage (type Köttermann) sous hotte aspirante.
- Matras de Kjeldahl : Ballons en verre borosilicaté résistants aux hautes températures.
- Appareil de distillation : Unité de distillation à la vapeur (type Büchi).
- Burette de précision : Pour le titrage de retour.
- Bêchers et fioles jaugées.

Réactifs :

- 2g d'échantillon.
- 20 mL Acide sulfurique pur (H_2SO_4).
- 50 mL Hydroxyde de sodium (NaOH) ($d = 1,33$).
- 250 mL Eau distillée.
- 2g Catalyseur Kjeldahl composé de :
 - Sulfate de potassium (K_2SO_4), Sulfate de calcium (CaSO_4), Sélénium (Se).
- 2g d'acide borique (H_3BO_3).
- 20 mL Éthanol absolu.
- 1 mL Indicateur mixte :
 - Rouge de méthyle (0,2 % dans alcool 95°), Vert de bromocrésol (0,1 % dans alcool 95°).
- Solution titrante : acide sulfurique N/20.

Mode Opératoire :**A) Minéralisation :**

1. Une masse de 2 g d'échantillon (un échantillon lyophilisé a été utilisé pour la boue) a été prélevée dans un ballon de 250 ml.
2. Le mélange catalytique a été ajouté pour que le point d'ébullition soit augmenté et que la réaction soit accélérée.
3. Un volume de 20 ml H_2SO_4 concentré a été ajouté.
4. La solution a été chauffée jusqu'à l'obtention d'un liquide limpide (incolore à teinte verte stable).
5. Le milieu a été laissé à refroidir, puis a été dilué progressivement avec 200 ml d'eau distillée sous un refroidissement constant, avant que le volume final ne soit ajusté.

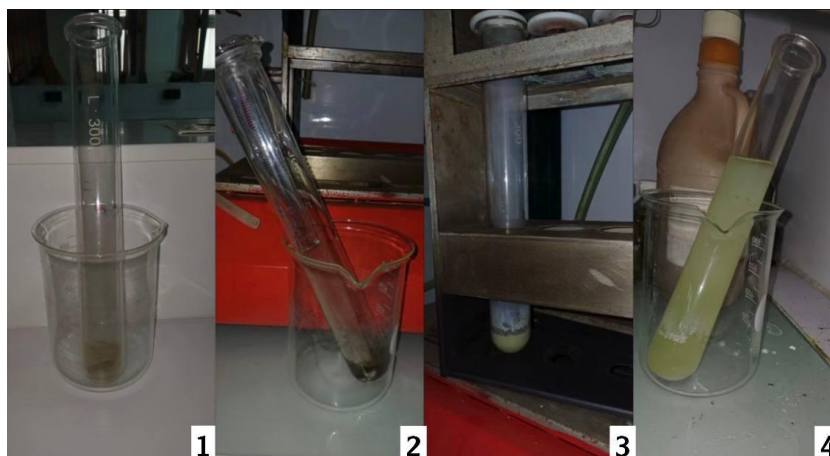


Figure 010. Différentes étapes de la phase de minéralisation acide par la méthode de Kjeldahl.

(1 : introduction de l'échantillon et du mélange catalytique, 2 : addition de H_2SO_4 concentré, 3 : chauffage de la solution sur rampe de minéralisation, 4 : obtention du minéralisat limpide après digestion complète).

B) Distillation :

L'azote ammoniacal est séparé par entraînement à la vapeur :

1. Une prise d'essai de 10 à 50 ml de la solution minéralisée a été introduite dans l'appareil de distillation.
2. Un volume de 50 ml de solution sodique (NaOH) concentrée ($d=1,33$) a été ajouté.
3. Le béccher de réception a été préparé avec 20 ml d'acide borique contenant l'indicateur coloré (mélange de rouge de méthyle et vert de bromocrésol).
4. La distillation a été lancée jusqu'à ce qu'au moins 100 ml de distillat soient recueillis.



Figure 11. Différentes étapes du procédé de distillation (Méthode de Kjeldahl).

(1 : transfert de l'échantillon minéralisé, 2 : alcalinisation par ajout de NaOH et virage de la solution, 3 : unité de distillation et collecte du distillat ammoniacal dans l'acide borique).

C) Titrage :

Le titrage permet de quantifier l'ammoniac piégé :

- i. Titrer la solution obtenue avec de l'acide sulfurique (N/20 ou N/50).
- ii. Le point final est atteint lorsque la solution retrouve sa couleur initiale (virage de l'indicateur).

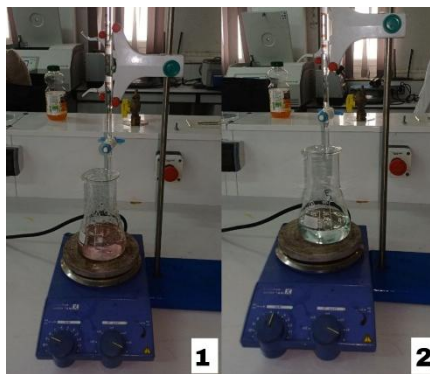


Figure 12. Virage coloré au point d'équivalence lors du titrage volumétrique de l'ammoniac distillé. (1 : avant virage ; 2 : point final du dosage)

Expression des résultats :

La teneur en azote a été calculée selon la relation suivante :

$$1 \text{ mL H}_2\text{SO}_4 \text{ 1N} = 0,014 \text{ g N}$$

$$1 \text{ mL H}_2\text{SO}_4 \text{ N/20} = 0,0007 \text{ g N}$$

- Teneur en azote totale sur produit brut :

$$N (\%) = V_1 \times 0,0007 \times \frac{100}{Y} \times \frac{250}{V_0}$$

Légende :

- V_1 : Volume versé (ml) : (Volume de l'acide sulfurique N /20).
- Y : Poids de l'échantillon de départ.
- V_0 : Volume de la prise d'essai.

V.1.3.b. Détermination de la teneur en protéines brutes (Méthode de Kjeldahl)

Pour la boue de STEP, les résultats ont été exprimés uniquement en Azote Total Kjeldahl (NTK), ce qui a reflété sa valeur fertilisante et sa charge organique.

Pour la farine de poisson, ce résultat a été converti en protéines brutes par l'utilisation d'un facteur de conversion conventionnel :

Ce coefficient (6,25) correspond à la teneur moyenne en azote des protéines animales.

Expression des résultats :

Les calculs ont été effectués selon les formules ci-dessous :

- Teneur en protéines brutes sur produit brut :

$$PB (\%) = N(\%) \times 6,25$$

- Teneur en protéines brutes par rapport à la matière sèche :

$$Teneur \text{ en } PB (\%MS) = \frac{PB(\%)}{MS\%} \times 100$$

V.1.3.c. Caractérisation du Phosphore : Du Soluble au Total

L'analyse du phosphore a été abordée sous deux angles complémentaires afin que la fraction immédiatement mobile soit distinguée de la charge minérale globale des boues.

3.1) Dosage du Phosphore Soluble

Principe :

En milieu acide, une réaction a été opérée entre les ions orthophosphates solubles PO_4^{-3} et le molybdate d'ammonium pour qu'un complexe phosphomolybdique soit formé. Une coloration bleue intense a été développée par ce dernier après sa réduction par l'acide ascorbique. L'intensité de la couleur, mesurée par spectrophotométrie à 720 nm, a été proportionnelle à la concentration en phosphore soluble (selon la fiche méthode de l'École Normale Supérieure de Lyon (ENS Lyon), plateforme Eduterre).

Appareillage :

- Spectrophotomètre UV-Visible (calé sur 720 nm).
- Balances de précision (sensibilité au mg).
- Verrerie jaugée de classe A : Fioles jaugées (1 L, 100 ml), pipettes jaugées (10 ml).
- Matériel de précision : Micropipettes réglables (pour la gamme étalon), burette graduée.
- Agitateur magnétique, barreaux aimantés et Tubes à essais et portoirs.
- Dispositif de filtration (entonnoir et papier filtre sans phosphate ou filtre membrane).

Mode Opératoire :

A) Préparation de la solution mère S_0 :

Pesée : Une masse de 0,439 g de KH_2PO_4 (phosphate monopotassique) a été dissoute dans une fiole de 1 L d'eau distillée.

Dilutions :

- Une première dilution au 1/10 a été effectuée (un volume de 10 mL de solution a été introduit dans un volume final de 100 mL d'eau).
- Une seconde dilution au 1/10 a été effectuée (un volume de 10 mL de la solution diluée a été introduit dans un volume final de 100 mL d'eau).

B) Préparation du réactif de coloration :

1. Solution sulfurique : Un volume de 148 mL d'acide sulfurique concentré a été dilué dans 1 L d'eau.
2. Molybdate : Une masse de 12 g de molybdate d'ammonium a été dissoute dans 250 mL d'eau.
3. Tartrate : Une masse de 0,291 g de tartrate double d'antimoine et de potassium a été dissoute dans 100 mL d'acide sulfurique 4N.
4. Mélange final : Les trois solutions ont été réunies dans une fiole de 2 L, puis le volume a été ajusté au trait de jauge.
5. Activation : Une masse de 1 g d'acide ascorbique a été dissoute dans 50 mL du mélange précédent.

C) Gamme étalon et courbe d'étalonnage :

Préparation des tubes : Un ensemble de 6 tubes (comprenant un Blanc et les étalons S_1 à S_5) a été préparé par le mélange du volume V_0 de solution mère et de V_{eau} selon le tableau :

Tableau 07. Préparation des solutions étalons pour l'établissement de la courbe d'étalonnage

Solution	Blanc	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
$C'(\text{mg P/L})$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$V_0 \text{ (mL)}$	0	0.5	1	1.5	2	2.5
$V_{\text{eau}} \text{ (mL)}$	5	4.5	4	3.5	3	2.5

1. Coloration : Un volume de 1,0 mL de réactif a été ajouté dans chaque tube, puis une agitation a été effectuée.
2. Attente : Un repos de 15 min a été respecté pour que la coloration bleue soit stabilisée.
3. Mesure : L'absorbance A a été lue à une longueur d'onde de 720 nm, puis la courbe $A = f(C)$ a été tracée.

D) Analyse de l'échantillon :

1. Extraction : Une masse de 0,5 g de boues lyophilisées a été mélangée dans un volume de 500 mL d'eau distillée.
2. Homogénéisation : Une agitation vigoureuse a été maintenue pendant plusieurs minutes.
3. Filtration : La suspension a été filtrée pour que le filtrat liquide soit obtenu.

4. Réaction : Un volume de 5,0 mL de filtrat a été prélevé, puis un volume de 1,0 mL de réactif a été ajouté.
5. Mesure et calcul : L'absorbance a été mesurée à 720 nm, puis la valeur a été reportée sur la courbe d'étalonnage pour que la concentration en phosphore soit obtenue.

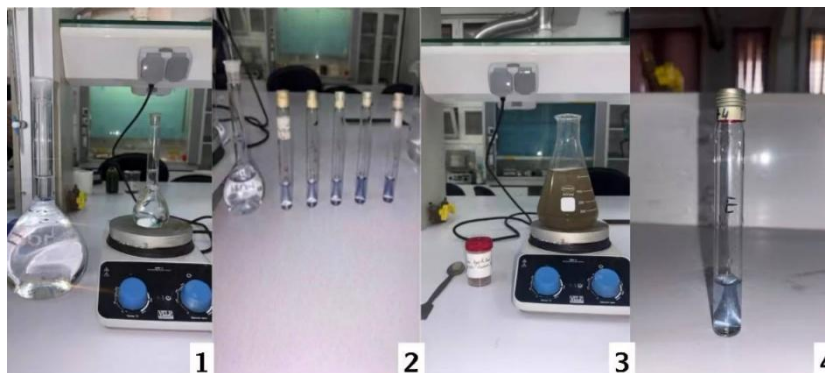


Figure 13. Étapes expérimentales de l'analyse de phosphore soluble (1 : Préparation de la solution mère ; 2 : Préparation de la gamme étalon ; 3 : Extraction de l'échantillon dans l'eau distillée ; 4 : Préparation de l'échantillon pour l'analyse)

3.2) Estimation du Phosphore Total

En l'absence de minéralisation acide, le phosphore total (P_{total}) a été estimé par extrapolation à partir de l'azote total dosé. Cette méthode a été appuyée sur la stabilité des ratios élémentaires de la boue déshydratée (Degrémont SA, 2005) (Tchobanoglous et al., 2013)

Ratio retenu :

$$\frac{N_{Total}}{P_{Total}} \simeq 2.5$$

V.1.3.d. Détermination de la teneur en matières grasses brutes (Extraction Soxhlet)

L'extraction des matières grasses est nécessaire pour caractériser la composition biochimique de la farine et comprendre l'impact des lipides sur la porosité de l'adsorbant. Cette analyse est conduite selon le principe de la norme **ISO 6492:1999 (Catégorie B)**.

Principe :

Extraction par solvant organique (hexane) après hydrolyse acide pour libérer les lipides liés.

Appareillage :

- Extracteur Soxhlet
- Ballon d'extraction
- Cartouche filtrante
- Étuve (80°C et 103°C)
- Evaporateur rotatif.
- Dessiccateur.
- Balance analytique.
- Agitateur et barreau magnétique.

Réactifs :

- 100 mL Acide chlorhydrique (HCl 3 mol/L)
- Eau distillée
- 400 mL Hexane (40–60 °C)

Mode opératoire :**A) Préparation et hydrolyse**

1. Une masse de 5 g d'échantillon m_4 a été pesée.
2. Un volume de 100 mL de HCl (3 mol/L) a été ajouté.
3. Le milieu a été porté à ébullition pendant 1 heure.
4. Une filtration a été réalisée sur un double papier filtre préalablement humidifié.
5. Le résidu a été lavé à l'eau froide jusqu'à l'obtention de la neutralité (absence d'acidité).

B) Séchage

1. Le filtre contenant le résidu a été placé dans une cartouche.
2. Un séchage a été effectué à 80°C pendant une nuit.

C) Extraction Soxhlet

1. Le ballon vide et sec (m_5) a été pesé.
2. La cartouche a été introduite dans l'extracteur.
3. L'hexane (40–60°C) a été ajouté.
4. L'extraction a été réalisée pendant 6 heures (≈ 10 cycles/heure).

D) Finition et pesée

1. Le solvant a été évaporé au rotavapor.
2. Le ballon a été séché à 103°C pendant 15–20 min.
3. Le milieu a été refroidi dans un dessiccateur, puis une pesée a été effectuée (m_6).

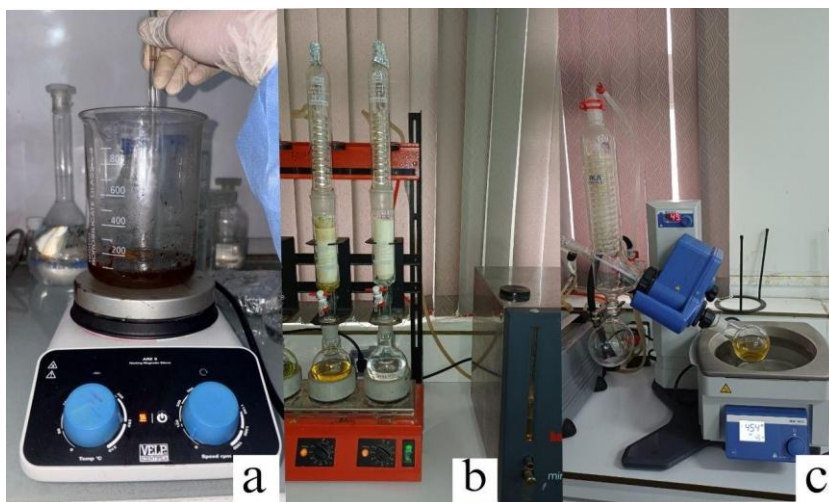


Figure 14. Étapes séquentielles du protocole de détermination de la teneur en matières grasses (Extraction Soxhlet) (**a** : hydrolyse, **b** : Extraction Soxhlet, **c** : concentration, séchage à poids constant et pesée finale).

Expression des résultats :

Les calculs ont été effectués selon les formules ci-dessous :

$$w (\%) = \frac{m_6 - m_5}{m_4} \times 100$$

$$\text{Teneur en MAT (MS \%)} = \frac{w \%}{MS\%}$$

Légende :

- w : Teneur en matière grasse de l'échantillon, en grammes par kilogramme (g).
- m_4 : Masse de la prise d'essai (g).
- m_5 : Masse du ballon vide (g).
- m_6 : Masse du ballon + lipides après extraction (g).

V.1.3.e. Détermination de l'Extractif Non Azoté (ENA)

La fraction carbonée, principalement constituée de glucides solubles, est estimée par calcul pour compléter le profil biochimique de la farine de poisson. Cette évaluation repose sur la méthode conventionnelle de calcul de la composition proximale (Weende modifiée).

Principe :

La teneur en Extractif Non Azoté (ENA) a été estimée par différence. Elle a représenté la fraction de la matière sèche (MS) qui n'a pas été constituée de protéines, lipides, cendres et, le cas échéant, de fibres brutes. Pour la farine de poisson, où la teneur en fibres a été négligeable, la formule a été simplifiée. L'ENA a correspondu principalement aux glucides disponibles (glycogène résiduel, oses simples) et à d'autres composés organiques solubles non azotés (acides organiques, certains pigments).

Ce calcul nécessite les résultats expérimentaux des analyses précédentes, exprimés **sur la même base** (de préférence sur matière sèche - MS) :

- $MS\%$: Matière Sèche.
- $PB\%$: Protéines Brutes.
- $MG\%$: Matières grasses / Lipides Bruts.
- $CB\%$: Cendres Brutes.

Expression des résultats :

$$ENA\% (sur MS) = 100 - \frac{PB\% + MG\% + CB\%}{MS\%}$$

V.2. Contrôle microbiologique et innocuité sanitaire

L'évaluation de la qualité microbiologique de la boue de STEP de Beni Messous et de la farine de déchets halieutiques est une étape fondamentale avant d'entamer le processus de co-compostage. Cette

caractérisation biologique permet non seulement de dresser un état des lieux de la charge microbienne initiale, mais aussi de garantir l'innocuité du mélange final destiné à une valorisation agricole.

L'objectif principal de ce contrôle est de s'assurer de l'absence de germes pathogènes et de quantifier les indicateurs de contamination fécale et d'hygiène générale.

V.2.1. Prétraitement et pasteurisation des échantillons avant co-compostage

Afin que la charge microbienne initiale ait été maîtrisée au laboratoire, un traitement thermique par autoclavage a été appliqué aux échantillons avant leur mélange. La farine de poisson (séchée et broyée) a ainsi été traitée à 80 °C pendant 15 minutes pour que tout pathogène d'origine soit éliminé. De même, les boues homogénéisées de la STEP de Beni Messous ont été pasteurisées. L'état sanitaire des deux matrices a été standardisé par ce prétraitement avant leur incorporation avec la sciure de bois et l'activateur.

V.2.2. Stérilisation de la verrerie et du matériel de laboratoire

La stérilisation du matériel est une étape critique pour éliminer toute contamination exogène qui pourrait fausser les résultats des dénombrements.

- Matériel et consommables : Les instruments en verre et en métal ont été stérilisés à l'autoclave (à 121 °C pendant 15 minutes). Les embouts de micropipettes ont été autoclavés à 121 °C pendant 20 minutes en boîtes hermétiques.
- Milieux et diluants : Les géloses (PCA, BCPL, BLBVB, Hektoen) et les solutions (eaux physiologique et peptonées) ont été stérilisées à l'autoclave à 121 °C pendant 15 à 20 minutes.
- Zone de travail : Les manipulations ont été réalisées en milieu stérile autour d'un bec Bunsen.

V.2.3. Contrôle Microbiologique

V.2.3.a. Préparation des Échantillons et Dilutions Décimales

Cette étape a constitué le préalable indispensable à toutes les analyses microbiologiques. Le passage d'une matrice solide (boue ou farine) à une suspension liquide homogène et manipulable a été rendu possible par cette procédure.

A) Préparation de la Solution Mère (Dilution 10^{-1})

La solution mère a été préparée dans des conditions d'asepsie strictes, à proximité de la flamme d'un bec Bunsen.

- Pesée : Une masse de 25 g de l'échantillon (soit la farine de poisson pasteurisée, soit la boue de la STEP de Beni Messous) a été prélevée.
- Broyage : L'échantillon a été broyé dans un mortier stérile pour que les micro-organismes piégés dans la matrice solide soient libérés.
- Mise en solution : Le broyat a été transféré dans un Erlenmeyer stérile de 500 mL, puis un volume de 225 mL de diluant (Eau Peptonée Tamponnée, EPT) a été ajouté.
- Homogénéisation : Le mélange a été agité vigoureusement pour que la suspension mère correspondant à la dilution 10^{-1} soit obtenue.

B) Série de Dilutions Décimales (10^{-2} à 10^{-6})

Afin que la charge microbienne ait été réduite pour qu'un dénombrement précis soit permis, une cascade de dilutions a été réalisée.

- Préparation des tubes : Une série de tubes à essai contenant exactement 9 mL d'eau physiologique stérile a été préparée.
- Transfert : À l'aide d'une micropipette munie d'embouts stérilisés, un volume de 1 mL de la solution mère (10^{-1}) a été prélevé, puis a été introduit dans le premier tube pour que la dilution 10^{-2} soit obtenue. L'opération a été répétée par le prélèvement de 1 mL de la dilution 10^{-2} pour son introduction dans le tube suivant 10^{-3} et ainsi de suite jusqu'à la dilution 10^{-6} .

V.2.3.b. Dénombrement de la Flore Aérobie Mésophile Totale (FAMT)

Le dénombrement de la flore aérobie mésophile totale a permis l'évaluation de la charge microbienne globale et de l'état général de décomposition de la matière organique dans les échantillons de boue et de farine, conformément à la norme NF EN ISO 4833-1.

1. Ensemencement : À l'aide de micropipettes munies d'embouts stérilisés, un volume de 1 mL de chaque dilution préparée (de 10^{-1} à 10^{-6}) a été prélevé.
2. Inoculation : L'inoculum a été introduit dans des boîtes de Pétri stériles vides.
3. Ajout du milieu de culture : Un volume d'environ 10 à 15 mL de gélose PCA, préalablement stérilisée à l'autoclave et maintenue en surfusion à une température comprise entre 44°C et 47°C, a été versé.

4. Mélange et solidification : Les boîtes ont été agitées délicatement par des mouvements circulaires pour que l'échantillon soit homogénéisé dans la gélose, puis une solidification a été réalisée sur une surface plane et froide.
5. Incubation : Une fois la gélose solidifiée les boîtes ont été retournées et placées à l'étuve à 30°C pendant 72 heures.
6. Lecture et comptage : Après incubation les colonies ont été dénombrées dans les boîtes qui ont contenu entre 30 et 300 colonies.

Expression des résultats :

Le nombre de micro-organismes par gramme ou par millilitre de produit (N) a été calculé selon la formule suivante :

$$N = \frac{\Sigma colonies}{V \times (n_1 + 0,1n_2) \times d}$$

Légendes :

- N = Nombre d'UFC par gramme ou par mL de produit initial.
- $\Sigma colonies$: Somme des colonies comptées sur toutes les boîtes retenues.
- V : Volume de l'inoculum appliqué (1 mL).
- n_1 : Nombre de boîtes retenues à la première dilution.
- n_2 : Nombre de boîtes retenues à la deuxième dilution.
- d : Facteur de la première dilution retenue.

V.2.3.c. Recherche et Dénombrement des Coliformes (Méthode NPP)

Le dénombrement des coliformes est un indicateur de pollution fécale et d'efficacité du processus d'hygiénisation lors du co-compostage des boues et de la farine, conformément à la norme **ISO 4831:2006**.

A) Test Présomptif (Milieu BCPL) :

La présence potentielle de coliformes a été détectée lors de cette étape grâce à leur capacité à fermenter le lactose.

1. Milieu de culture utilisé : Bouillon de Caséine-Peptide Lactosé au Bromocrésol Pourpre (BCPL) a été employé.

2. Ensemencement : Des micropipettes munies d'embouts stérilisés ont été utilisées pour l'inoculation des séries de tubes :
 - i. Un volume de 1 mL de la dilution 10^{-1} a été inoculé dans une première série de 3 tubes munis de cloches de Durham.
 - ii. Un volume de 1 mL de la dilution 10^{-2} a été inoculé dans une deuxième série de 3 tubes.
 - iii. Un volume de 1 mL de la dilution 10^{-3} a été inoculé dans une troisième série de 3 tubes.
3. Incubation : L'ensemble des tubes a été placé à l'étuve à 30 °C (ou 37 °C) pendant 24 h à 48 h.
4. Lecture : Un tube a été considéré comme positif lorsqu'un trouble microbien, un virage de l'indicateur au jaune (acidification) et une présence de gaz dans la cloche de Durham ont été observés simultanément.

B) Test de Confirmation (Milieu BLBVB) :

Chaque tube positif identifié lors du test présomptif a été soumis à une confirmation afin que les coliformes totaux soient distingués des coliformes thermotolérants.

1. Repiquage : Un repiquage a été effectué à l'aide d'une anse de platine stérile dans deux nouvelles séries de tubes contenant du Bouillon Lactosé Bilié au Vert Brillant (BLBVB).
2. Coliformes Totaux : La première série de tubes a été incubée à 30 °C pendant 24 h à 48 h..
3. Coliformes thermotolérants : La deuxième série a été incubée impérativement au bain-marie à $44 \pm 0,5$ °C pendant 24 h.
4. Interprétation : Le tube a été confirmé positif lorsqu'un trouble et un dégagement de gaz ont été constatés.

Expression des résultats :

$$N = \frac{NPP}{V_{ensemence}} \times Fd$$

$$\text{Concentration en UFC/g} = \frac{N(\text{germes/ml}) \times \text{Volume total de la solution en ml}}{\text{Masse de l'échantillon solide}}$$

Légendes :

- N = Nombre d'UFC par gramme ou par mL de produit initial.

- NPP = Le chiffre d'après la table de Mac Grady.
- Fd = Facteur de dilution.
- $V_{ensemence}$ = Volume ensemencé.

Lecture du résultat :

Le nombre de coliformes a été déterminé par la notation du nombre de tubes positifs pour chaque dilution. Ce code a ensuite été reporté dans la table de Mac Grady pour que le Nombre le Plus Probable (NPP) d'unités formant colonies par gramme d'échantillon initial soit obtenu.

V.2.3.d. Dénombrement des Staphylocoques

Cette analyse permet de détecter la présence de *Staphylococcus aureus*, principal indicateur d'une contamination d'origine humaine ou d'un défaut d'hygiène lors de la manipulation des échantillons de boue et de farine, conformément à la norme **ISO 6888-1:2021**.

1. Ensemencement :

- Milieu de culture utilisé : Gélose Chapman (milieu hypersalé sélectif) a été employée.
- Un volume de 0,1 mL de la suspension mère (10^{-1}) et de chaque dilution décimale a été prélevé avec une micropipette équipée d'embouts stérilisés.
- Un ensemencement en surface a été réalisé à l'aide d'un râteau en verre stérile jusqu'à l'absorption complète par la gélose.

2. Incubation :

- Les boîtes de Pétri ensemencées ont été placées à l'étuve en position inversée à 37 °C pendant 48 heures.

3. Lecture et Interprétation :

- Une observation de colonies jaune doré a été effectuée, ce qui a traduit la fermentation du Mannitol (caractère Mannitol +).

V.2.3.e. Dénombrement des Levures et Moisissures

Cette analyse a permis l'évaluation de la stabilité fongique de la boue de STEP et de la farine de poisson, ainsi que la détection d'éventuelles contaminations liées au stockage ou à l'humidité, conformément à la norme **ISO 21527-1:2008**.

1. Ensemencement :

- Milieux de culture : L'inoculum a été transféré sur des boîtes de gélose SDA (Sabouraud Dextrose Agar).
- Un volume de 0,1 mL de la suspension mère (10^{-1}) et de chaque dilution décimale a été prélevé avec une micropipette équipée d'embouts stérilisés.
- Un ensemencement en surface a été réalisé à l'aide d'un râteau en verre stérile jusqu'à l'absorption complète par la gélose.

2. Incubation :

- Les boîtes de Pétri ensemencées ont été placées à l'étuve en position inversée à 25 °C pendant 5 jours en aérobiose.

3. Lecture et Interprétation :

Le dénombrement a été effectué par la distinction des deux types de micro-organismes selon leur aspect morphologique :

- **Levures** : Un contour régulier avec une surface lisse et convexe a généralement été présenté par ces colonies.
- **Moisissures** : Un aspect filamenteux, duveteux ou plat, présentant souvent des pigments colorés, a caractérisé ces structures.
- **Confirmation** : En cas de doute, une observation à la loupe binoculaire ou au microscope a été réalisée pour que les colonies de levures soient distinguées des colonies bactériennes.

V.2.3.f. Recherche des Salmonelles (*Salmonella spp*)

La recherche des Salmonelles a été une analyse qualitative (présence ou absence dans 25 g) rendue obligatoire par le pouvoir pathogène élevé de ce germe. L'innocuité sanitaire de la boue et de la farine a été validée par cette procédure avant leur valorisation, conformément à la norme **ISO 6579-1:2017**.

1. Culture et Isolement :

Le protocole a été déroulé en plusieurs étapes successives pour que la reviviscence des bactéries stressées soit favorisée et que la flore interférente soit inhibée :

- Pré-enrichissement : La solution mère (25 g d'échantillon dans 225 mL de milieu SFB) a été incubée à 37 °C pendant 24 heures.
- Enrichissement sélectif : Un volume de 1 mL du pré-enrichissement a été transféré dans 10 mL de bouillon sélectif (type SFB) à l'aide d'une micropipette munie d'embouts stérilisés. Une incubation a été menée à 37 °C pendant 24 heures.
- Technique d'ensemencement : Un repiquage a été réalisé par la méthode des stries sur des géloses sélectives : la gélose Hektoen et la gélose S-S (Salmonella-Shigella).

2. Incubation :

- Les boîtes de Pétri ensemencées ont été placées à l'étuve en position inversée à 37 °C pendant 24 heures.

3. Lecture et Interprétation :

L'identification a reposé sur l'observation de colonies suspectes dont l'aspect a varié selon le milieu utilisé :

- **Sur Gélose Hektoen** : Les colonies de *Salmonella* sont apparues typiquement de couleur verte ou bleue, avec ou sans centre noir (ce qui a indiqué la production d'hydrogène sulfuré, H₂S).
- **Sur Gélose S-S** : Des colonies transparentes, avec ou sans centre noir, ont été observées.

4. Résultat :

L'absence totale de *Salmonella* dans 25 g de produit a été exigée par la norme pour que celui-ci soit considéré comme conforme à l'utilisation agricole.

V.2.3.g. Dénombrement des Spores de Bactéries Anaérobies Sulfito-Réductrices (ASR)

Le dénombrement des spores d'ASR, indicateurs de contamination fécale ancienne et de la résistance des micro-organismes aux traitements, a été réalisé sur gélose Viande-Foie (VF) selon la méthode d'incorporation en tubes profonds, conformément à la norme **NF T90-415**.

1. Préparation des dilutions décimales :

Après une homogénéisation minutieuse de l'échantillon initial, une série de huit dilutions décimales consécutives (de 10⁻¹ à 10⁻⁸) a été préparée. Ces manipulations ont été effectuées strictement sous

environnement aseptique (zone de protection d'un bec Bunsen ou hotte à flux laminaire) afin que toute contamination exogène soit évitée.

2. Traitement thermique (Sélection des spores) :

Afin que seules les formes sporulées soient dénombrées, les formes végétatives ont été éliminées par un choc thermique :

- Un volume de 1 mL de chaque dilution a été transféré dans des tubes stériles individuels.
- Un chauffage des tubes a été conduit à 80 °C pendant 8 à 10 minutes.
- Un refroidissement immédiat a été appliqué sous un jet d'eau froide pour que l'effet de la chaleur soit stoppé.

3. Ensemencement et conditionnement d'anaérobiose :

Le milieu de culture a été préparé pour que la croissance des germes anaérobies soit favorisée :

- **Incorporation** : Un volume d'environ 18 à 20 mL de gélose Viande-Foie (VF), préalablement fondue et maintenue en surfusion à $47 \pm 1^\circ\text{C}$, a été ajouté dans chaque tube. Le milieu a été enrichi en alun de fer et en sulfite de sodium (indicateurs de la sulfito-réduction).
- **Création de l'anaérobiose** : Une couche d'huile de paraffine stérile a été coulée à la surface de chaque tube pour que le milieu soit isolé de l'oxygène atmosphérique.

4. Incubation et lecture

- Les tubes ont été laissés sur la table de travail pendant environ 30 minutes pour que la solidification complète du milieu soit permise.
- L'incubation a été réalisée à 37 °C pendant 24 à 48 heures.
- Principe de lecture : Les colonies d'ASR ont été identifiées par l'apparition d'un halo noir (précipité de sulfure de fer), résultant de la réduction du sulfite en sulfure.

V.2.3.h. Recherche et dénombrement des œufs d'helminthes

La recherche des œufs d'helminthes a constitué une analyse sanitaire fondamentale pour l'évaluation de la qualité biologique des boues et de leur aptitude à une valorisation agricole sécurisée.

En raison de la complexité des protocoles d'extraction et de la précision requise pour l'identification microscopique des parasites, cette analyse a été intégralement effectuée au niveau du Laboratoire Central de l'Office National de l'Assainissement (ONA), unité de Baraki.

La fiabilité des résultats quantitatifs (nombre d'œufs par unité de masse) et qualitatifs (identification des différents genres de parasites présents) a été garantie par le recours à ce laboratoire de référence, conformément aux standards techniques et sanitaires en vigueur.

VI. Préparation de Co-Compost : Boues de STEP et Farine issue de déchets halieutiques

VI.1. Principe du co-compostage

Le procédé a reposé sur la méthode de Berkeley, une technique de compostage rapide et aérobie. Contrairement au compostage lent, le maintien d'une température élevée (entre 55 °C et 65 °C) a été visé par cette méthode grâce à une gestion rigoureuse du rapport C/N (fixé entre 25 et 30) et à des retournements fréquents. L'accélération de la décomposition microbienne a été ciblée pour qu'un compost stable et hygiénisé soit obtenu en un temps record (environ 18 à 21 jours), tandis que la destruction des pathogènes et des graines de mauvaises herbes a été assurée par la chaleur générée.

Appareillage :

Pour la mise en œuvre de ce procédé à l'échelle du laboratoire, les équipements suivants ont été utilisés :

- **Réacteurs de compostage :** Afin de mener une étude contrôlée, Les réacteurs utilisés sont de forme cylindro-conique, d'un volume de 15 litres, mesurant 30 cm de diamètre supérieur, 26 cm de diamètre inférieur et 32 cm de hauteur. Ces contenants sont surmontés d'une **grille à larges mailles** afin de maximiser la circulation de l'air et assurer les échanges gazeux indispensables (apport passif d'oxygène et évacuation du CO_2) tout en maintenant une aération maximale du milieu.
- (apport d'oxygène et évacuation du CO_2) tout en limitant les déperditions d'humidité.
- **Instrumentation de suivi :** Thermomètres à sonde (0-100 °C) pour le monitoring de la phase thermophile. pH-mètre et capteurs d'humidité.
- **Matières premières :** Boues déshydratées de la STEP de Beni Messous, farine/déchets de poissons, sciure de bois (agents structurants) et fientes de volaille (activateur).

Mode opératoire :

Afin qu'un démarrage thermique rapide ait été favorisé et qu'une répartition optimale des nutriments soit assurée, le remplissage des deux réacteurs expérimentaux (Essai 1 et Essai 2) a été effectué par une stratification successive des différents substrats.

Étape 1 : Formulation des mélanges

L'expérimentation a reposé sur le co-compostage de 5 kg de substrat, par la comparaison de deux formulations basées sur la variation du rapport C/N. Pour l'élaboration de ces mélanges, les valeurs de C/N spécifiques à chaque composant ont été déterminées sur la base de références bibliographiques et d'études antérieures.

Tableau 08. Composition des mélanges expérimentaux de co-compostage et justification des proportions utilisées.

Composants	Essai 1 (kg)	Essai 2 (kg)	Justification
Boues de STEP	3.60	3.60	Substrat principal riche en azote (C/N = 5–12) (Grimaud, 1996).
Farine de poisson	1.00	0.90	Activateur azoté (C/N = 1–4) pour abaisser le ratio global. (Afilal et al, 2014).
Sciure de bois	0.30	0.35	Apport carboné (C/N = 200–500) pour équilibrer l'azote et structurer le mélange. (Giroux & Audesse, 2004).
Fientes de volaille	0.10	0.15	Activateur biologique (C/N = 5–10) introduisant une flore microbienne active. (Afilal et al, 2014).
Total	5.00	5.00	—
Rapport C/N final	25.4	28.4	Optimum théorique pour l'activité microbienne.

Étape 2 : Pré-mélange des activateurs

Dans un premier temps, les boues déshydratées et la farine de poisson ont été mélangées intimement. La base azotée principale de notre compost a été constituée par ce pré-mélange (**Figure 15**).



Figure 16. Incorporation et pré-mélange mécanique de la farine de poisson et des boues d'épuration déshydratées.

Étape 3 : Remplissage par couches (Stratification)

Le remplissage des réacteurs a été réalisé par l'alternance des couches selon la séquence suivante, qui a été répétée jusqu'à épuisement des 5 kg de substrats :

1. Couche de base : Le pré-mélange (boues + farine de poisson) a été déposé.
2. Couche intermédiaire : Les fientes de volaille, agissant comme un activateur biologique riche en micro-organismes, ont été introduites.
3. Couche de couverture : La sciure de bois, servant d'agent structurant pour le maintien de la porosité et du carbone, a été étalée. Cette alternance a été répétée couche après couche afin qu'un « sandwich » organique soit créé, ce qui a favorisé les échanges gazeux.
4. Une fois la pile de couches constituée dans le réacteur, une vérification a été impérativement menée afin que l'obtention d'une humidité optimale, située entre 50% et 60%, soit assurée. Le déclenchement de la phase thermophile a été rendu dépendant de cette humidité critique.



Figure 17. Procédé de chargement du bioréacteur par stratification alternée des substrats.

Étape 4 : Cycle de retournements (À partir de J4) :

À partir du 4^{ème} jour, le compost a été retourné tous les 2 jours (J4, J6, J8, J10, J12, J14, J16, J18).

1. L'intégralité du réacteur a été vidée dans un grand bac propre.
2. La structure compacte du tas a été cassée, ce qui a permis la libération du dioxyde de carbone accumulé et l'entrée d'oxygène frais, indispensable aux bactéries thermophiles.
3. Une petite pelle ou une fourche a été utilisée pour que les agglomérats de boues et de sciure soient décompactés.
4. Lors du remplissage, la matière « périphérique » a été placée au centre du réacteur.
5. La matière qui a été déjà au centre (plus sombre et plus chaude) a été placée sur les côtés ou au-dessus.



Figure 18. Aspect des réacteurs au 4^{ème} jour du cycle de co-compostage (stade pré-retournement).



Figure 19. État macroscopique des substrats des Essais 1 et 2 après le premier retournement et l'aération mécanique initiale.

Étape 5 : Monitoring et suivi des paramètres physico-chimiques**Mesure de la Température (T°) :**

- La température a été relevée quotidiennement à l'aide d'un thermomètre à sonde numérique.
- La sonde a été insérée au cœur du réacteur (zone centrale) afin que la chaleur générée par l'activité microbienne thermophile soit captée.



Figure 20. Prise de mesure de la température centrale du substrat pour le contrôle de l'activité microbienne.

Mesure du pH :

- Le pH a été mesuré tous les deux jours à l'aide d'un pH-mètre électronique.
- Procédure : Un échantillon représentatif a été prélevé, a été dilué dans de l'eau distillée (ratio 1/10 p/v), puis a été agité avant la lecture afin que les ions en solution soient stabilisés.



Figure 21. Prélèvement d'échantillons représentatifs du compost pour le suivi cinétique du pH.

VII. Essai d'adsorption et lixiviation métallique

Principe

La capacité d'une farine de poisson dégraissée à fixer et stabiliser une pollution mixte en cuivre et zinc en solution aqueuse a été évaluée par ce protocole. Deux masses de biomatériau (1 g et 3 g) ont été mises en contact avec 100 mL de solution métallique sous une agitation contrôlée. Après filtration, les métaux résiduels dans les filtrats ont été dosés par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) à la suite d'une minéralisation acide.

Appareillage et réactifs essentiels

- Agitateur magnétique ou orbital thermostaté.
- Spectromètre d'Absorption Atomique (SAA).
- pH-mètre étalonné et papier filtre Whatman .
- Plaque chauffante et godets en Téflon pour la minéralisation.
- Sulfates de cuivre et de zinc pour la préparation des solutions métalliques.
- 100 ml d'Hexane pour le dégraissage de la farine.
- Acide nitrique HNO_3 et peroxyde d'hydrogène H_2O_2 pour la minéralisation.
- Eau distillée et eau ultrapure

Étapes du Mode Opératoire

Étape 1 : Dégraissage de la farine

- Une masse de 20 à 50 g de farine brute a été mélangée avec 100 mL d'hexane pendant 20 min.
- Une filtration a été réalisée sur papier Whatman (le filtrat contenant les lipides a été écarté).
- La poudre a été séchée sous hotte jusqu'à l'évaporation complète du solvant.

Étape 2 : Préparation de la solution multi-métallique (20 mg/L de Cu et Zn)

- Une masse de 0.079g de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ et 0,088g de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ont été pesées.
- Ces sels ont été dissous dans 80 mL d'eau distillée, la solution a été acidifiée avec 1 à 2 mL d' HNO_3 (5%) afin que le pH soit stabilisé à une valeur inférieure à 2, puis le volume a été ajusté à 100 mL.

Étape 3 : Adsorption et Filtration

- Le pH de la solution métallique a été impérativement ajusté entre 5,5 et 6 (afin que la précipitation soit évitée).
- Des masses de 1 g et 3 g de farine dégraissée ont été introduites séparément dans 100 mL de cette solution.
- Une agitation a été maintenue pendant 2 à 4 heures, puis une filtration a été effectuée sur papier Whatman et le filtrat liquide a été récupéré.

Étape 4 : Minéralisation et Analyse SAA

- Au sein d'un godet en Téflon, un volume de 2 mL d' HNO_3 (65%) et 1 mL d' H_2O_2 (30%) ont été ajoutés au filtrat.
- Un chauffage a été conduit sur plaque à 95 °C pendant 2 heures.
- Après refroidissement, le godet a été rincé, le liquide a été transféré dans un tube gradué et le volume a été complété à 25 mL avec de l'eau ultrapure avant le passage à la SAA.



Figure 22. Filtrats après Adsorption (1g et 3g de farine).

Expression des résultats :

Les performances de stabilisation et de rétention des métaux lourds (Cu et Zn) par la farine de poisson dégraissée sont déterminées à l'aide des trois équations suivantes :

- **Concentration finale du métal dans le filtrat (D)**

Les performances de stabilisation et de rétention des métaux lourds (Cu et Zn) par la farine de poisson dégraissée ont été déterminées à l'aide des trois équations suivantes :

$$D = \frac{(A - T) \times B}{C} \times F$$

Légendes :

- D : Concentration finale du métal dans l'échantillon de filtrat (mg/L).
- A : Concentration du métal dans la solution dosée, lue par la SAA (mg/L).
- T : Concentration du métal lue dans le témoin (blanc de réactifs ou correction automatique, (mg/L).
- B : Volume final de l'échantillon après l'étape de minéralisation (mL).
- C : Volume initial de filtrat prélevé pour l'analyse (mL).
- F : Facteur de dilution supplémentaire appliqué avant l'injection à la SAA.

- **Taux ou Pourcentage d'adsorption (%)**

Le rendement global de fixation du métal par la biomasse a été exprimé par le pourcentage d'adsorption, qui a été calculé comme suit :

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{(C_i - D)}{C_i} \times 100$$

Légendes :

- C_i : Concentration initiale de la solution métallique de départ (mg/L).
- D : Concentration finale du métal calculée dans le filtrat (mg/L).

- **Capacité d'adsorption à l'équilibre (q)**

La quantité de métal lourd fixée par unité de masse de farine de poisson dégraissée (capacité de charge spécifique) a été évaluée par l'équation suivante :

$$q = \frac{(C_i - D) \times V}{M}$$

Légendes :

- q : Capacité d'adsorption de la farine (mg de métal adsorbé par gramme de farine sèche, mg/g).
- C_i : Concentration initiale de la solution métallique (mg/L).
- D : Concentration finale du métal calculée dans le filtrat (mg/L).
- V : Volume total de la solution métallique mis en contact avec la farine, exprimé en Litres ($V = 0,1$ L pour un essai de 100 mL).
- M : Masse de la farine de poisson dégraissée introduite dans l'erlenmeyer, exprimée en grammes (1 g ou 3 g).

Chapitre III :

Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussions

I. Observations sur le processus de fabrication de la farine issue de déchets halieutiques

La préparation de la farine issue de déchets halieutiques a suivi les étapes classiques de cuisson et de pressage, mais la phase de stabilisation thermique (séchage) a présenté des difficultés techniques majeures qui méritent d'être analysées.

A. Contraintes lors du séchage à l'étuve

Initialement, la biomasse traitée a été placée en quantités importantes dans des bacs en aluminium alimentaires et introduite à l'étuve. Après un séjour de cinq jours, nous avons constaté un échec du processus de séchage : la matière est restée humide et une odeur fétide, suffocante, s'est dégagée de l'étuve.



Figure 23. Apparition d'un gradient d'humidité et d'un début de fermentation anaérobie lors du séchage des coproduits en couches épaisses.

L'accumulation de la matière en couches épaisses a empêché l'évacuation de l'humidité au cœur du produit, créant ainsi un milieu anaérobie. Cette situation, combinée à la chaleur, a favorisé un début de décomposition protéique et de fermentation, libérant des gaz volatils (composés ammoniaqués et soufrés).

B. Action corrective et observations finales

Pour corriger ce défaut, nous avons procédé à un étalement de déchets de poisson sur le papier de cuisson en couches très fines. Un séchage supplémentaire de cinq jours a été nécessaire pour obtenir une texture cassante, bien que l'odeur de dégradation ait persisté.

Lors de l'étape finale du broyage, nous avons observé que la farine présentait une texture huileuse et une tendance à s'agglomérer (mottage), rendant l'obtention d'une poudre fine difficile.



Figure 24. Optimisation cinétique du traitement thermique de la farine expérimentale : Comparaison de l'état macroscopique entre le début (1^{er}) et la fin (5^{ème} jour) du séchage.

Afin de caractériser précisément la valeur nutritionnelle et la qualité physico-chimique de notre produit fini, nous avons confronté l'ensemble de nos résultats analytiques aux données de référence de la FAO (2001). Ce bilan, portant sur la composition des ingrédients destinés à l'alimentation animale en République Centrafricaine (RCA), nous sert de base comparative pour évaluer la teneur en matière sèche, le taux de protéines, la charge minérale ainsi que le profil lipidique de notre farine.

Il convient toutefois de souligner que les valeurs rapportées par la FAO correspondent souvent à une farine de haute qualité, élaborée à partir de poissons entiers. Cette précision est essentielle pour interpréter les éventuels écarts avec nos propres résultats, issus de la valorisation de déchets halieutiques.

Par souci de rigueur analytique et pour permettre une comparaison directe avec les standards de référence, les teneurs en matière sèche et en humidité sont exprimées par rapport au produit brut, tandis que tous les autres composants nutritionnels sont calculés et rapportés en pourcentage de la matière sèche (% MS).

Tableau 09. Profil nutritionnel et physico-chimique de référence de la farine de poisson entier selon les standards de la FAO (2001).

	Matière sèche (%)	Humidité (%)	Matière protéique brute (%)	Matière Graisse (%)	Matière minérale (%)
Farine de poisson entier (FAO)	89.0	11.0	77.1	11.5	9.8

II. Évaluation de l'état hydrique et des constantes physiques

II.1. Analyse de l'humidité et taux d'hydratation

L'analyse de l'humidité (H%) et de la matière sèche (MS%) révèle des profils radicalement opposés entre la boue et la farine de poisson, conditionnant leurs voies de valorisation. Les résultats détaillés des essais sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 10. Résultats des pesées analytiques et taux d'humidité moyens (H%) de la boue de STEP et de farine expérimentale de déchets de poisson sur trois essais successifs.

Matrices	La boue				La farine			
Pesées (g)	M_0	M_1	M_2	H (%)	m_0	m_1	m_2	H (%)
E' / E_1	91.10	96.13	92.05	81.20	102.99	107.99	107.72	5.58
E'' / E_2	103.00	108.01	103.91	81.96	85.19	90.20	89.90	5.96
E''' / E_3	96.15	101.35	97.10	81.66	85.48	90.49	90.19	6.05
Moyenne	-	-	-	81.60	-	-	-	5.86

Les boues de la STEP affichent une humidité élevée de **81.60 %** (MS = 18.40 %). Selon *Amouche (2016)*, cette siccité classe la matrice parmi les "boues pâteuses", traduisant les limites de la déshydratation mécanique. À l'inverse, la farine de poisson présente une déshydratation optimale avec **5.86 %** d'humidité (MS = 94.14 %), surpassant la norme de la FAO (89 %).

L'eau excédentaire des boues sature les capacités de stockage, alourdit les coûts de transport et génère une activité de l'eau élevée propice aux fermentations incontrôlées et aux nuisances olfactives. À l'opposé, le séchage de la farine élimine cette fraction aqueuse inutile. Cette déshydratation drastique bloque non seulement la prolifération microbienne et les dégradations enzymatiques, mais permet également de concentrer et maximiser la valeur protéique et énergétique par unité de masse du produit fini.

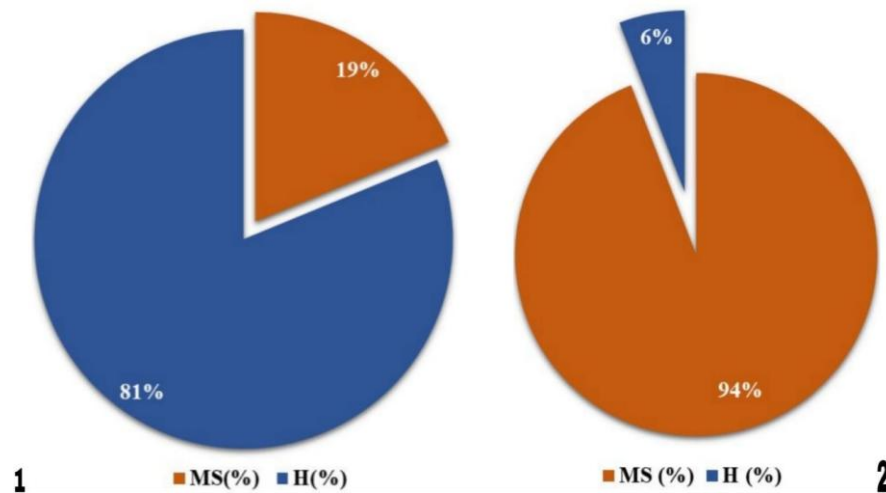


Figure 25. Répartition proportionnelle entre la teneur en humidité (H%) et la matière sèche (MS%) des deux matrices initiales d'étude. (1 : boues d'épuration de la STEP, 2 : farine expérimentale de déchets de poisson).

II.2. Mesure du pH et stabilité chimique

L'analyse du pH des deux matrices révèle des régimes acidobasiques distincts, chacun influençant la stabilité chimique, la réactivité biologique et les voies de valorisation. Les résultats détaillés des essais sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 11. Valeurs individuelles et moyennes du pH de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson sur trois essais successifs

Matrices	La boue				La farine			
Essais	E'	E''	E'''	Moyenne	E_1	E_2	E_3	Moyenne
pH	7.89	7.99	7.93	7.94	5.54	5.56	5.62	5.57

Les mesures de pH révèlent deux profils opposés : la boue présente un pH moyen de 7.94 (légèrement alcalin) et la farine une valeur de 5.57 (modérément acide). Ce pH proche de la neutralité maintient la boue biologiquement active, favorisant les fermentations et les nuisances olfactives lors du stockage. À l'inverse, l'acidité de la farine, issue de l'hydrolyse des lipides en acides gras libres, crée un facteur de conservation : couplée à la faible humidité (5.86 %), elle inhibe les germes d'altération. Si cette acidité peut induire une corrosion des équipements ou restreindre certaines formulations, elle offre à la farine une double barrière de stabilité, contrairement à la boue qui demeure chimiquement instable.

III. Évaluation de la richesse minérale, du potentiel organique et de l'innocuité environnementale

III.1. Évaluation de la richesse minérale et du potentiel organique

Les mesures de la fraction inerte (minérale) après calcination au four à moufle sont les suivantes :

Tableau 12. Résultats des pesées analytiques après calcination au four à moufle et teneurs moyennes en matières minérales (MM%) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.

Matrices	La boue				La farine			
Pesées (g)	M_0	M_2	M_3	MM (%)	m_0	m_2	m_3	MM (%)
E' / E_1	91.10	92.05	91.48	40.00	102.99	107.72	103.96	20.54
E'' / E_2	103.00	103.91	103.36	39.87	85.19	89.90	86.17	20.81
E''' / E_3	96.15	97.10	96.53	40.29	85.48	90.19	86.45	20.58
Moyenne	-	-	-	40.05	-	-	-	20.64

Les analyses de calcination mettent en évidence une inversion des fractions solides entre les deux matrices. Les boues de la STEP se caractérisent par une forte charge minérale de **40.05 %**, liée à l'accumulation de composés inertes (sables, argiles) lors de l'épuration, tandis que leur fraction organique de **59.95 %** (COT = 34.85 %) leur confère un caractère fortement fermentescible nécessitant une stabilisation.

À l'inverse, la farine de poisson présente une prédominance de matière organique noble avec un taux élevé de **79.36 %** (COT = 46.20 %), ce qui confirme sa haute densité en protéines et lipides malgré l'usage de sous-produits. Sa fraction minérale, bien qu'inférieure (**20.64 %**), surpasse largement la référence de la FAO (9.8 %) en raison de l'apport en calcium et phosphore issu des structures osseuses (têtes et arêtes).

Ainsi, le ratio MO/MM plus élevé de la farine (≈ 3.8) souligne son potentiel nutritionnel et énergétique, tandis que le profil des boues (≈ 1.5) oriente plutôt leur utilisation vers la valorisation énergétique ou leur efficacité comme support d'adsorption pour les polluants.

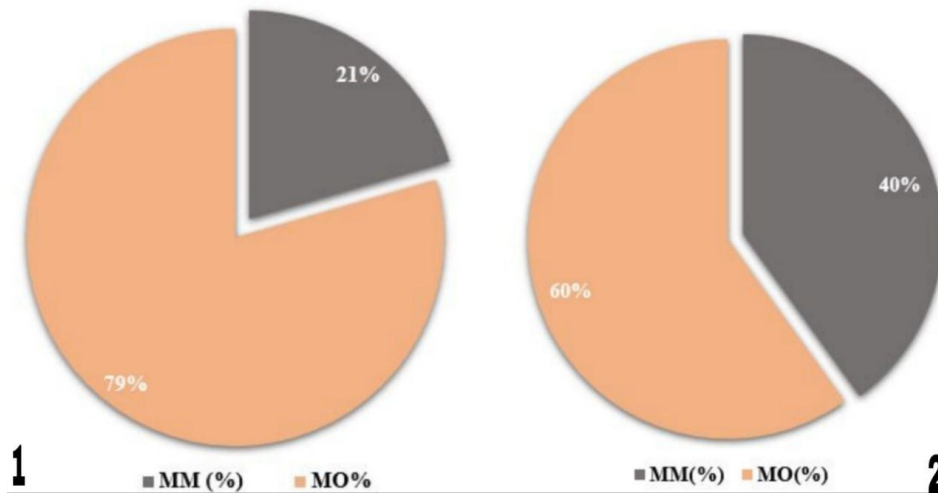


Figure 26. Répartition proportionnelle entre la teneur matières minérales (MM%) et la matières organique (MO%) des deux matrices initiales d'étude. (**1** : farine expérimentale de déchets de poisson, **2** : boues d'épuration de la STEP).

En outre, un rapport **MO/MM** compris entre 1.5 et 3 est souvent recherché pour un compost ou une boue destinée à l'agriculture (équilibre entre apport organique et stabilisation), il indique un amendement organique riche, favorable à la structure du sol, à la rétention d'eau et à la disponibilité des nutriments.

III.2. Évaluation de la charge métallique (Éléments Traces Métalliques)

L'analyse des métaux lourds (Cd, Cu, Zn et Pb) a été réalisée par **Spectrophotométrie d'Absorption Atomique (SAA)**. Cette étape est cruciale pour vérifier la conformité des boues vis-à-vis des normes de protection de l'environnement et de la santé humaine.

A. État de l'étalonnage (Exemple du Cadmium)

Pour chaque métal, une gamme étalon a été préparée. À titre d'exemple, la figure suivante présente la droite d'étalonnage obtenue pour le Cadmium (Cd), montrant une excellente linéarité entre l'absorbance et la concentration.

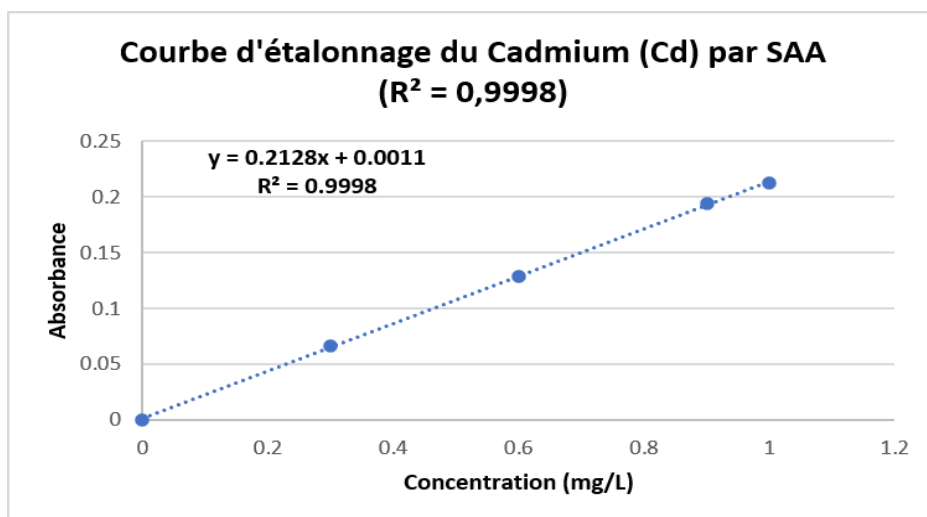


Figure 27. Courbe d'étalonnage spectrophotométrique du cadmium (Cd) par SAA et modélisation de sa régression linéaire.

Note : Les paramètres d'étalonnage des autres métaux (Zn, Pb, Cu), présentant des coefficients de corrélation similaires, sont reportés en Annexe.

L'expression de calcul : Pour exprimer le résultat en **mg/kg MS**, utilisez l'expression suivante :

$$C_{Cd} = 0.0601 \text{ mg/Kg MS}$$

B. Synthèse des résultats et conformité

Le tableau ci-dessous récapitule les teneurs moyennes calculées après minéralisation des échantillons, exprimées en mg/kg de Matière Sèche (MS), et les compare aux valeurs limites réglementaires de Norme algérienne **NA 17731**.

Tableau 13. Teneurs moyennes en métaux lourds et comparaison aux normes.

ETMs	Teneur calculée (mg/kg MS)	Valeurs Limites dans les boues (Norme algérienne NA 17731)	Valeurs Limites dans le compost (Norme française NF U 44-095)
Cadmium (Cd)	0.06	3	3
Plomb (Pb)	0.42	300	180
Zinc (Zn)	0.14	300	600
Cuivre (Cu)	0.4	140	300

L'évaluation de la charge métallique des boues de la STEP de Beni Messous révèle une innocuité chimique remarquable. En confrontant nos résultats aux exigences de la norme NA 17731 (pour l'usage agricole des boues) et de la norme NF U 44-095 (spécifique aux composts contenant des boues), nous observons une conformité totale et rigoureuse.

Les teneurs calculées pour les quatre métaux étudiés sont extrêmement basses par rapport aux limites algériennes. Le Cadmium (0.0601 mg/kg) et le Plomb (0.4166 mg/kg) représentent respectivement moins de 2 % et 0.2 % des seuils autorisés. Cette pureté initiale est un atout majeur, car elle garantit que la matière première ne dépasse pas la capacité d'absorption des sols récepteurs.

L'introduction de la norme française NF U 44-095 dans cette discussion permet de projeter la qualité du futur compost. Bien que cette norme soit plus restrictive pour certains éléments comme le Plomb (limite à 180 mg/kg contre 300 mg/kg pour la boue brute), nos résultats restent très largement en deçà de ces exigences. Pour le Zinc et le Cuivre, les limites du compost (600 et 300 mg/kg) sont plus souples que celles de la boue brute, ce qui offre une marge de sécurité supplémentaire lors du mélange avec d'autres co-substrats, tels que les déchets de poisson ou les broyats végétaux.

IV. Évaluation des nutriments (Azote total et Phosphore total)

IV.1. La teneur en Azote total

Les teneurs en azote total, déterminées après dosage des matrices, sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 14. Données expérimentales du dosage de Kjeldahl et teneurs moyennes en azote total (N%) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.

Matrices	La boue				La farine			
	$V_0(\text{mL})$	$V_1(\text{mL})$	$Y(\text{g})$	$N(\%)$	$V_0(\text{mL})$	$V_1(\text{mL})$	$Y(\text{g})$	$N(\%)$
E' / E_1	20	13	2	5.69	20	11	2	4.81
E'' / E_2	20	13	2	5.69	20	11.5	2	5.03
E''' / E_3	20	13	2	5.69	20	11	2	4.81
Moyenne	-	-	-	5.69	-	-	-	4.89

Les dosages de l'azote total révèlent des richesses d'origines distinctes pour les deux matrices. Les boues de la STEP affichent une teneur moyenne remarquable de **5.69 %**, se situant dans la fourchette

supérieure des références de l'ANRED (1 à 8 %). Cette concentration témoigne d'une biomasse bactérienne particulièrement riche en nutriments, confirmant la haute valeur fertilisante du substrat et son efficacité comme amendement agricole. Ainsi, l'azote des boues **valide** leur efficacité comme amendement agricole. À l'inverse, la farine de poisson présente un taux d'azote plus faible de **4.89 %**, ce qui s'explique par l'utilisation exclusive de co-produits (têtes et arêtes) structurellement moins denses en tissus musculaires que des poissons entiers.

IV.2. La teneur en phosphore total

Le phosphore a été étudié sous deux formes : le phosphore total (P_{Total}), représentant le potentiel fertilisant global, et les phosphates solubles ($P-PO_4^{-3}$), indicateurs de la fraction immédiatement biodisponible.

A. Etalonnage et dosage des phosphates solubles

Le dosage des phosphates solubles a été réalisé par colorimétrie. La fiabilité des mesures est confirmée par la droite d'étalonnage obtenue (Figure 27), présentant un coefficient de détermination $R^2 = 0.9518$.

Tableau 15. Données de calibration spectrophotométrique : paramètres de constitution et absorbances de la gamme étalon du phosphore.

Solution	Blanc	S1	S2	S3	S4	S5	E
C'(mg P/L)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	-
V_0 (mL)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	5
V_{eau} (mL)	5	4.5	4	3.5	3	2.5	0
Absorbance	0.15	0.22	0.42	0.62	1.00	1.03	1.02

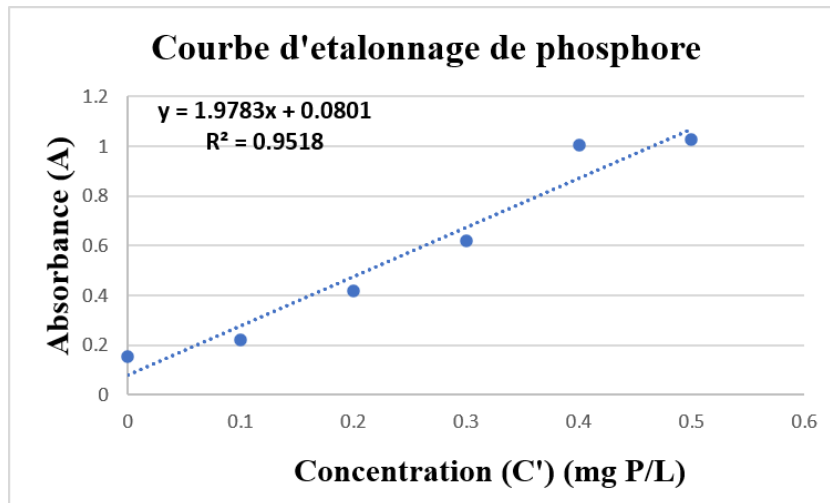


Figure 28. Courbe d'étalonnage de phosphore.

Calcul de phosphates solubles dans l'échantillon d'après l'équation de la courbe d'étalonnage :

$$C_{Echantillon} = \frac{Y - 0.0801}{1.9783}$$

$$C_{Echantillon} = 0.474 \text{ mg P/L}$$

B. Estimation du phosphore total par approche stœchiométrique

En l'absence de minéralisation acide, le phosphore total (P_{Total}) a été estimé par extrapolation à partir de l'azote total dosé. Cette méthode s'appuie sur la stabilité des ratios élémentaires de la boue déshydratée.

Le ratio massique retenu est :

$$\frac{N_{Total}}{P_{Total}} \approx 2.5 \Rightarrow P_{Total} \approx \frac{N_{Total}}{2.5}$$

$$P_{Total} \approx \frac{5,687}{2.5}$$

$$\approx 2.274\%$$

L'échantillon de boue présente un bon potentiel agronomique grâce à sa richesse en phosphore : la fraction soluble (0.474 mg P/L) assure un apport rapidement disponible pour les cultures, tandis que le phosphore total (2.274 mg/L) constitue une réserve à libération lente. Le ratio N/P de 2.5, conforme

aux références de Degremont et de Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, indique un équilibre nutritif favorable à une fertilisation durable. De plus, selon l'ANRED, les boues valorisables en agriculture présentent généralement une teneur en phosphore total comprise entre 2 % et 7 %, ce qui confirme l'intérêt agronomique de cette boue.

IV.3. Détermination et évaluation du Rapport C/N

Le rapport Carbone/Azote (C/N) constitue un paramètre fondamental pour juger de la biodégradabilité d'une matière organique et de son aptitude au compostage. Il permet de vérifier l'équilibre entre la source d'énergie (Carbone) et l'élément bâtisseur des cellules microbiennes (Azote).

Le calcul a été effectué à partir des teneurs en Carbone Organique Total (COT) et en Azote Total (N) déterminées précédemment pour les deux matrices :

Pour la farine :

- COT = 46.20 %
- N = 4.812 %

Pour la boue :

- COT = 34.852 %
- N = 5.687

$$\begin{aligned} \text{Rapport } C/N_{\text{farine}} &= \frac{COT(\%)}{N(\%)} = \frac{46.20}{4.812} \\ &= 9.60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rapport } C/N_{\text{boues}} &= \frac{COT(\%)}{N(\%)} = \frac{34.852}{5.687} \\ &= 6.128 \end{aligned}$$

Les calculs du rapport C/N confirment le caractère hyper-azoté des deux matrices, avec une valeur de 6.13 pour les boues de la STEP et de 9.60 pour la farine de poisson. Nettement inférieur au seuil de stabilité du compostage (25 à 30), le rapport de la boue est une valeur typique des boues (C/N souvent entre 5 et 10) et indique une minéralisation très rapide qui nécessite l'apport d'un co-substrat carboné pour éviter les pertes d'azote (déchets verts, paille, etc.) pour remonter le C/N vers 20-30.

De son côté, le rapport de la farine (9.60) confirme sa nature de matière hautement azotée à minéralisation rapide, offrant une source d'énergie immédiatement disponible pour l'activité microbienne. Bien qu'une décomposition isolée de ces substrats provoquerait des nuisances olfactives et des dégagements d'ammoniac (NH_3), leur association en co-compostage s'avère synergique : la

farine et la boue agissent mutuellement comme des activateurs biologiques pour dynamiser le processus, à condition d'y incorporer un agent structurant carboné extérieur.

V. Évaluation du profil biochimique et potentiel nutritionnel

V.1. Évaluation de la teneur en protéines brutes

L'évaluation des protéines brutes caractérise spécifiquement la valeur nutritionnelle de la farine de poisson, un paramètre non applicable aux boues de la STEP.

Calcul détaillé pour la teneur en protéines brutes sur produit brut :

$$\begin{aligned} PB(\%) &= N(\%) \times 6.25 = 4.89 \times 6.25 \\ &= 30.53 \% \end{aligned}$$

Calcul détaillé pour la teneur en protéines brutes par rapport à la matière sèche :

$$\begin{aligned} \text{Teneur en PB (\%MS)} &= \frac{PB(\%)}{MS\%} \times 100 = \frac{30.53}{94.14} \times 100 \\ &= 32.43 \% \end{aligned}$$

Le dosage de la farine de poisson met en évidence une teneur en azote de **4.89 %**, ce qui équivaut à un taux de protéines brutes de **32.43 % sur MS**. Bien que cette valeur soit inférieure au standard de premier choix de la *FAO* (77.1 % sur MS), cet écart se justifie par l'utilisation exclusive de co-produits (têtes et arêtes), structurellement plus riches en minéraux et moins denses en tissus musculaires. De plus, un possible cinétique de séchage prolongée a pu favoriser une activité protéolytique, volatilisent une fraction de l'azote sous forme d'ammoniac résiduel. La concentration protéique de la farine confirme sa viabilité nutritionnelle pour la formulation d'aliments.

V.2. Évaluation de la teneur en matières grasses brutes (fraction lipidique)

L'analyse de la fraction lipidique met en évidence le potentiel énergétique de la farine de poisson, un paramètre non quantifié pour les boues de la STEP.

Les résultats de l'analyse de la teneur en lipides bruts sont consignés dans le tableau ci-dessous. Les analyses révèlent une teneur moyenne en lipides de **32.30 %** par rapport au produit brut, soit **34.31 %** par rapport à la matière sèche (% MS).

Tableau 16. Résultats des pesées analytiques pour la détermination du taux de lipides de la farine expérimentale de poisson.

Échantillon	m_4	m_5	m_6	MG (%)
Ballon échantillon	5	157.40	159.02	32.30

Calcul détaillé pour la teneur en lipide brutes sur produit brut :

$$MG_{\text{échantillon}} (\%) = \frac{m_6 - m_5}{m_4} \times 100$$

$$= 32.30 \%$$

Calcul détaillé pour la teneur en lipide brutes par rapport à la matière sèche :

$$Teneur \text{ en } MG (\%MS) = \frac{MG (\%)}{MS\%} \times 100$$

$$= 34.31 \%$$

Les résultats montrent une teneur en lipides de 32.30 % (soit 34.31 % sur MS). Cette valeur est très largement supérieure à la référence de la FAO (2001), qui est de 9.3 % sur MS. Notre farine présente donc une concentration en matières grasses près de quatre fois supérieure aux standards habituels.

Ce taux exceptionnel s'explique d'abord par la nature des co-produits utilisés. Les têtes de poisson sont des zones de stockage privilégiées pour les graisses. Bien que nous ayons effectué un pressage, celui-ci était manuel. La force humaine n'est pas suffisante pour extraire toute l'huile emprisonnée dans les os et les tissus des têtes, contrairement aux machines industrielles qui pressent beaucoup plus fort.

Enfin, la durée prolongée du séchage a pu jouer un rôle. Comme le séchage a été lent, des micro-organismes ont pu consommer une petite partie des protéines. Cela réduit la masse du reste de la farine et, par conséquent, fait monter mécaniquement le pourcentage de gras restant.

V.4. Estimation de l'Extractif Non Azoté (ENA)

L'Extractif Non Azoté (ENA) correspond à la fraction de la farine composée principalement de glucides. Il est obtenu par calcul en soustrayant de la matière sèche la somme des protéines brutes, des lipides (matières grasses) et des matières minérales. Les résultats de ce calcul sont présentés ci-dessous :

$$\begin{aligned} ENA\% (sur MS) &= 100 - \frac{PB\% + MG\% + MM\%}{MS\%} \\ &= 12.72 \% \end{aligned}$$

On remarque que notre taux d'ENA (12.72 %) est nettement supérieur à la valeur de référence de la FAO (2001) qui est de 1.46 %.

Cet écart s'explique par la nature de notre matière première. Les déchets halieutiques (têtes et restes de viscères) peuvent contenir des résidus de glycogène ou d'autres composés organiques que l'on ne retrouve pas dans les filets de poisson pur utilisés pour les standards de la FAO.

Comme nous l'avons vu pour les protéines et les lipides, la durée prolongée du séchage et les transformations biochimiques durant le traitement manuel ont pu modifier la répartition des composants. La réduction de la part protéique au profit d'autres fractions organiques explique mathématiquement cette augmentation de l'ENA dans le résultat final.

Malgré cet écart, ce taux reste modéré et confirme que notre farine est essentiellement composée de protéines et de lipides, ce qui reste l'objectif principal pour une farine de poisson.

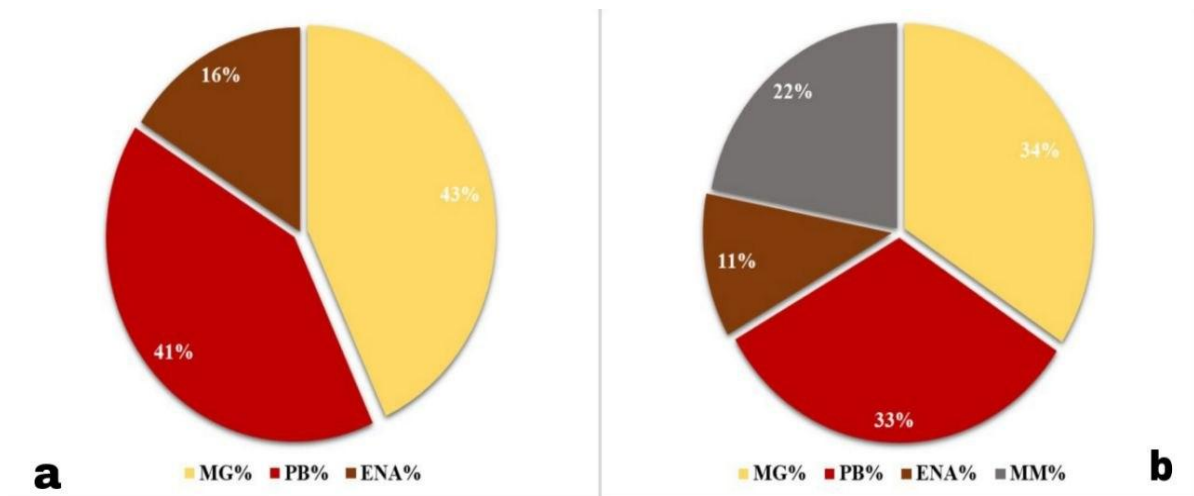


Figure 29. Répartition de la composition centésimale de la farine expérimentale de déchets de poisson sur matière sèche. (**a** : profil organique, **b** : profil global).

VI. Contrôle microbiologique

Afin d'évaluer la charge microbienne et de statuer sur la sécurité sanitaire des deux matrices, des analyses bactériologiques quantitatives et qualitatives ont été réalisées. Le ciblage des différents germes indicateurs de contamination ou d'altération permet de mesurer l'efficacité des processus de traitement (épuration pour les boues et séchage thermique pour la farine). Les résultats des dénombrements microbiologiques obtenus à différentes dilutions (10^{-1} à 10^{-6}) pour les boues de la STEP de Beni Messous et pour la farine issue de déchets halieutiques sont regroupés dans la **figure 30** et **Tableau 16**.

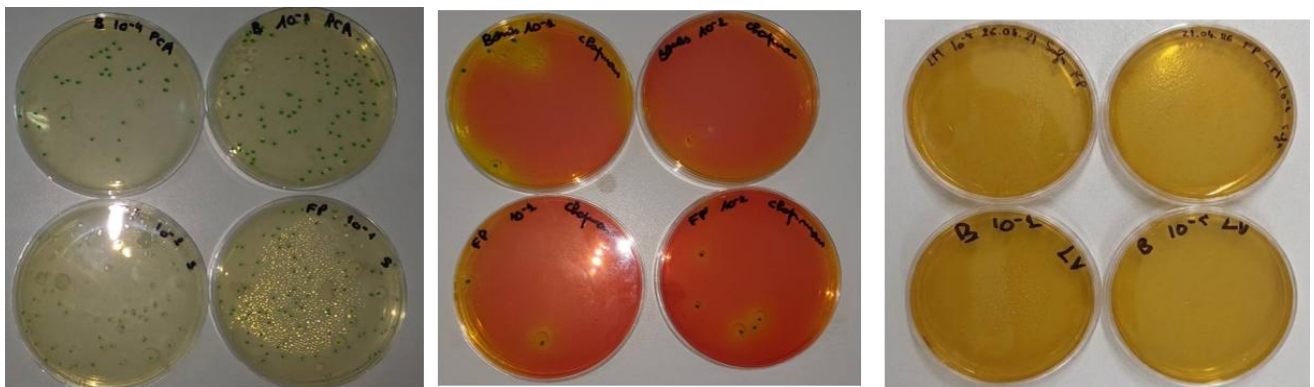


Figure 30. Aspect macroscopique des cultures microbiologiques sur milieux sélectifs de la boue de STEP (B) et de la farine de poisson (FP)

Tableau 17. Résultats des dénombrements microbiologiques sur différentes gélose sélectives et profils de dilutions sérielles des deux matrices initiales.

	Matrices	Les boues de la STEP de Beni						La farine issue de déchets					
		Messous						halieutiques					
Analyse	Gélose	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Coliformes totaux et fécaux	BCPL	+++	++	++-	/	/	/	---	---	---	/	/	/
	BLBVB	---	---	---	/	/	/	---	---	---	/	/	/
<i>E.coli</i>	Réactif de Kovacs	---	---	---	/	/	/	---	---	---	/	/	/
FAMT	PCA	Ind	Ind	89	34	-	-	112	69	-	-	-	-
<i>Staphylococcus aureus</i>	Chapman	4	2	-	-	-	-	2	6	-	-	-	-
Levure et Moisissure	SDA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ASR	VF	Ind	23	16	/	/	/	-	-	-	/	/	/
<i>Salmonella spp</i>	Hektoen / S-S	-	-	/	/	/	/	-	-	/	/	/	/

Afin de dresser une cartographie claire de la qualité sanitaire et de faciliter l'analyse comparative, les résultats des dénombrements microbiologiques ont été convertis en concentrations absolues, exprimées en Unités Formant Colonie par gramme de matière sèche (UFC/g). Cette approche synthétique permet de confronter directement la charge bactérienne résiduelle des boues d'épuration à celle de la farine de poisson stabilisée, mettant ainsi en lumière l'impact des traitements respectifs sur la réduction des populations microbiennes. L'ensemble de ces concentrations globales est récapitulé dans le **tableau 18**.

Tableau 18. Dénombrement microbien global et charges sanitaires absolues (UFC/g de MS) de la boue de STEP et de la farine expérimentale de déchets de poisson.

	Les boues de la STEP de Beni Messous (UFC/g)	La farine issue de déchets halieutiques (UFC/g)
Coliformes totaux et fécaux	1080	Absences
<i>E.coli</i>	Absences	Absences
FAMT	1.12×10^5	1.66×10^3
<i>Staphylococcus aureus</i>	5.51×10^1	7.3×10^1
Levure et Moisissure	Absences	Absences
ASR	3.56×10^3	Absences
<i>Salmonella spp</i>	Absences / 25g	Absences / 25g

➤ Œufs d'helminthes

L'analyse parasitologique, menée exclusivement sur les boues, a révélé une absence totale d'œufs d'helminthes. Ce résultat confirme la conformité sanitaire des boues face au risque parasitaire et valide l'innocuité du produit en vue de sa valorisation.

VII. Synthèse Globale du Profil des Matières Premières et Conformité à l'Usage Agricole

L'évaluation croisée des propriétés physico-chimiques et microbiologiques de la farine de poisson et des boues de la STEP de Beni Messous permet de valider scientifiquement leur potentiel agronomique ainsi que leur sécurité sanitaire avant toute valorisation.

VII.1. Comparaison des Boues avec les Normes (INERIS, NA 17731, NF U 44-095)

L'évaluation approfondie de la composition des boues de la STEP de Beni Messous, mise en perspective avec les standards de la littérature (Degrémont, Metcalf & Eddy) et les exigences réglementaires, permet de dresser un profil décisionnel précis quant à leur potentiel de valorisation circulaire.

Consistance physique et équilibre minéro-organique : Avec une siccité de 18.40 % (soit 81.60 % d'humidité), ces boues se classent dans la catégorie des boues pâteuses. Bien que cette teneur en eau

implique une logistique adaptée pour le transport, elle témoigne d'une déshydratation mécanique conforme aux attentes et offre une structure plastique malléable idéale pour le mélange. Le ratio MO/MM d'environ 1.5, soutenu par une matrice organique prédominante de 59.95 % (COT de 34.85 %), souligne le caractère fortement fermentescible et biodégradable du substrat, qualifiant ces boues d'amendement organique performant.

Stabilité, potentiel fertilisant et dynamique C/N : La mesure du pH révèle une valeur de 7.94, indiquant un milieu légèrement alcalin favorable qui limite naturellement la mobilité de certains métaux lourds tout en stimulant l'activité microbienne. Sur le plan nutritionnel, la richesse en azote total (5.69 %) et en phosphore total (2.27 %) positionne la matrice dans la fourchette haute des ressources organiques valorisables. Le ratio N/P de 2.5 confirme une biomasse bactérienne dense, capable de fournir un apport nutritionnel durable. Toutefois, le rapport C/N de 6.13 identifie ces boues comme un substrat hyper-azoté à minéralisation très rapide ; s'il agit comme un excellent activateur biologique, il nécessitera l'apport d'un co-substrat carboné extérieur pour structurer le compostage et limiter les pertes d'azote.

Innocuité chimique et pureté métallique : L'un des points forts de cette matrice réside dans sa remarquable pureté métallique. Les concentrations calculées en Cadmium (0.60 mg/kg MS) et en Plomb (0.42 mg/kg MS) s'avèrent infimes. Elles représentent respectivement à peine 2 % et 0.14 % des seuils maximaux autorisés par la norme algérienne NA 17731 (3 mg/kg pour le Cd et 300 mg/kg pour le Pb). Cette conformité stricte se maintient face aux exigences restrictives de la norme NF U 44-095 (limites fixées à 3 mg/kg pour le Cd et 180 mg/kg pour le Pb), garantissant une utilisation sécurisée et exempte de risques d'accumulation métallique dans les sols agricoles.

Évaluation sanitaire et limites microbiologiques : Sur le plan sanitaire, l'analyse quantitative révèle une charge globale en FMTA de 1.12×10^5 UFC/g et des coliformes totaux à 1.08×10^3 UFC/g, deux valeurs conformes car inférieures à la limite de 10^6 UFC/g recommandée par l'INERIS. L'innocuité microbiologique immédiate est appuyée par l'absence stricte de coliformes fécaux, de *Salmonella* spp., d'œufs d'helminthes, ainsi que de levures et moisissures. Le dénombrement de *Staphylococcus aureus* se stabilise à 5.51×10^1 UFC/g, soit la moitié du critère INERIS (100 UFC/g). Toutefois, l'analyse met en évidence une unique non-conformité critique : la charge en spores d'ASR (*Clostridium perfringens*) s'élève à 3.55×10^3 UFC/g, dépassant la borne supérieure de la norme NF U 44-095 (10^2 à 10^3 UFC/g).

En somme, les boues de la STEP de Beni Messous se définissent comme une ressource organo-minérale saine, alcaline et riche en nutriments. L'équilibre entre sa charge organique réactive et sa pureté métallique en fait une matière première de choix pour la formulation de biofertilisants, à condition de maîtriser la fraction d'ASR par un traitement stabilisant adapté.

VII.2. Comparaison de la Farine de Poisson avec les Normes (J.O.R.A. N° 39)

L'évaluation physico-chimique et microbiologique de la farine de poisson, mise en perspective avec les standards de la FAO (2001) et le Journal Officiel de la République Algérienne (J.O.R.A.N°39), permet de caractériser précisément ce coproduit organo-minéral et d'en valider la sécurité sanitaire.

Stabilité et profil macro-élémentaire : Avec un taux de matière sèche de 94.14 % (soit 5.86 % d'humidité), la farine affiche une stabilité de conservation optimale, supérieure aux recommandations de la FAO (11 %), ce qui la prémunit contre les altérations microbiennes. Le diagramme de répartition globale met en évidence un équilibre entre la fraction organique (79.46 %) et minérale (20.54 %). Cette teneur en cendres, plus du double de la référence de la FAO (9.8 %), s'explique par la nature de la matière première (têtes et arêtes). Bien que cet enrichissement minéral (calcium et phosphore) dilue mécaniquement la concentration en protéines brutes (32.43 % sur MS), le produit fini demeure une source d'azote substantielle pour de la valorisation de coproduits.

Potentiel énergétique et limites techniques : La caractéristique majeure de la farine réside dans sa teneur exceptionnelle en lipides (34.31 % sur MS, soit 43 % de la matière organique), valeur près de quatre fois supérieure au standard habituel (115 %). Ce profil hyper-énergétique est directement corrélé à l'usage des têtes de poisson (zones de stockage privilégiées des graisses) combiné à l'efficacité limitée du pressage manuel qui a retenu les huiles au sein de la matrice osseuse.

Innocuité microbiologique et aptitude biologique : Sur le plan sanitaire, la farine démontre une pureté biologique remarquable. Les coliformes totaux et fécaux, les spores d'anaérobies sulfite-réducteurs (ASR), les levures, moisissures et *Salmonella spp.* y sont totalement absents. Seule la flore mésophile totale aérobie (FMTA), dénombrée à 1.645×10^3 UFC/g (seuil critique : 10^6 à 10^7 UFC/g), et la charge en *Staphylococcus aureus*, mesurée à 7.3×10^1 UFC/g (seuil maximal : 5×10^2 UFC/g), ont été détectées. Ces concentrations, très largement inférieures aux limites maximales tolérées par le J.O.R.A. N° 39, confirment la parfaite innocuité du produit.

En somme, dotée d'un rapport C/N de 9.60 favorable à une minéralisation rapide, cette farine hautement énergétique et sécurisée se positionne à la fois comme un excellent ingrédient de

complémentation et comme un « activateur » biologique performant pour le co-compostage avec les boues de la STEP.

VIII. Évaluation du co-compostage

La cinétique thermique des deux formulations, suivie quotidiennement tout au long de l'expérimentation, est illustrée par l'histogramme ci-dessous :

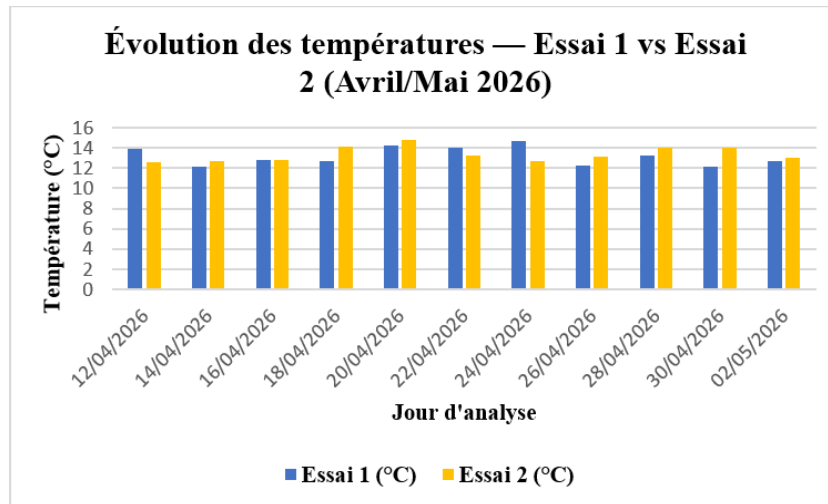


Figure 31. Evolution des températures : Essai 1 vs Essai 2 (Avril/Mai 2026).

Le suivi cinétique des paramètres physiques met en évidence des résultats aberrants par rapport aux exigences théoriques du procédé. L'échouage thermique du co-compostage après 20 jours, marqué par une stagnation chronique de la température entre 12 et 15 °C (comme le montre l'histogramme), s'explique par une synergie défavorable entre des facteurs intrinsèques et des conditions climatiques extrêmes.

D'une part, un défaut de masse critique (effet d'échelle) a constitué un frein majeur : la masse expérimentale de 5 kg en mini-réacteur de 20 litres a généré un rapport surface/volume trop élevé, dissipant la chaleur métabolique plus vite qu'elle n'était produite, contrairement à l'exigence minimale d'un volume de 1 m³ requise par la méthode de Berkeley. D'autre part, cette vulnérabilité thermique a été considérablement aggravée par l'environnement extérieur ; l'ensemble de la période expérimentale a été marquée par un climat rigoureux, caractérisé par des températures très basses et de fortes précipitations répétées.

En l'absence d'isolation thermique du mini-réacteur, ce lessivage et ce refroidissement périphériques constants ont bloqué la cinétique microbienne. Bien que la flore mésophile totale initiale — apportée

par les boues de la STEP (1.12×10^5 UFC/g) et les fientes de volaille — fût active, elle n'a pas pu accumuler les calories nécessaires pour franchir le seuil critique et amorcer la transition indispensable vers la phase thermophile (55 °C à 65 °C).

Cet avortement thermique a directement empêché l'hygiénisation du mélange et l'effet barrière attendue. Cela justifie scientifiquement la persistance et la non-conformité finale des spores de *Clostridium perfringens* (3.55×10^3 UFC/g), dont la structure hautement résistante n'intervient qu'en phase thermophile prolongée. Ce phénomène a probablement été accentué par une asphyxie locale due au tassement des boues, ainsi que par des retournements trop fréquents qui sous ce climat froid et humide, ont paradoxalement refroidi le cœur du sédiment au lieu de l'oxygéner efficacement.

IX. Essai de capacité d'adsorption du Cu et du Zn par la farine de poisson

Les performances de fixation du cuivre (Cu) et du zinc (Zn) sur la farine issue de déchets halieutiques dégraissée sont évaluées à travers le suivi des concentrations résiduelles dans la phase liquide après séparation solide/liquide.

L'expression de calcul pour le cas de Cuivre à faible dose 1g sachant que le cuivre a eu une dilution de 10 :

La concentration finale dans le filtrat (D)

$$D = \frac{(A - T) \times B}{C} \times F$$

$$D = 6,475 \text{ mg/L}$$

Calcul du taux d'adsorption (%)

$$\% \text{ Adsorption} = \frac{(C_i - D)}{C_i} \times 100$$

$$\% \text{ Adsorption} = 67,625\%$$

Calcul de la capacité d'adsorption (q)

$$q = \frac{(C_i - D) \times V}{M}$$

$$q = 1,352 \text{ mg/g}$$

Tableau 19. Tableau récapitulatif de l'adsorption du Cuivre et du Zinc.

Métal	M (g)	Ci (mg/L)	D (mg/L)	Taux d'Adsorption (%)	Capacité d'Adsorption q (mg/g)
Cuivre (Cu)	Faible (1g)	20	6.48	67.63	1.35
	Forte (3g)	20	8.75	56.25	0.38
Zinc (Zn)	Faible (1g)	20	0.00	100.00	2.00
	Forte (3g)	20	0.00	100.00	0.68

Les résultats mettent en évidence une excellente capacité de la farine issue de déchets halieutiques à stabiliser les métaux lourds en milieu aqueux.

Il convient toutefois de préciser un ajustement méthodologique crucial : suite à une contrainte technique lors de la phase de séchage initial, la farine brute présentait une texture pâteuse inadéquate pour une dispersion optimale. Afin de surmonter cet obstacle structurel, une étape corrective de dégraissage à l'hexane a été introduite. Ce prétraitement s'est révélé déterminant puisqu'il a permis de débloquent la texture, d'éliminer la fraction lipidique interférente et d'augmenter de manière significative l'accessibilité des sites actifs (groupements fonctionnels amines et carboxyliques).

À la lumière de ce prétraitement, nous observons une différence nette de comportement entre les deux analytes testés :

Nous observons une différence nette de comportement entre les deux analytes :

- **Pour le Zinc (Zn) :**

L'adsorption est totale (100%) pour les deux doses testées (1g et 3g), la SAA n'ayant détecté aucune trace de métal résiduel dans le filtrat (0 mg/L). Cela traduit une affinité physico-chimique extrêmement forte entre les sites actifs de la farine et les ions. Cette observation est en parfaite cohérence avec les travaux de (Othman et al., 2016), qui, dans leur étude sur les écailles de poisson, ont également mis en évidence la capacité élevée de cette biomasse halieutique à fixer les ions métalliques en solution.

- **Pour le Cuivre (Cu) :**

À faible dose (1g) et à pH = 6, le taux d'adsorption atteint 67.63% avec une capacité spécifique maximale de 1.353 mg/g. (Rezk et al., 2018) rapportent, dans des conditions similaires, un taux d'élimination du cuivre de 72.4% avec des os de poisson — valeur légèrement supérieure à la nôtre, ce qui confirme néanmoins que les deux biosorbants halieutiques présentent une capacité de fixation du cuivre comparable.

À forte dose (3g), le rendement chute à 56.25% et la capacité d'adsorption tombe à 0.38 mg/g. Cette diminution de l'efficacité par unité de masse lors de l'augmentation de la dose est un phénomène classique, expliqué par l'insaturation des sites actifs et l'agrégation des particules sous agitation. (Rezk et al., 2018) observent exactement la même tendance, avec une chute de la capacité spécifique de 0.96 mg/g à 0.31 mg/g lors du doublement de la dose d'adsorbant — évolution très proche de celle enregistrée dans notre étude (de 1.35 à 0.38 mg/g), ce qui confirme que les deux biosorbants répondent de façon similaire à l'effet de dose.

- **Comparaison de la sélectivité Zn^{2+} / Cu^{2+} :**

Une nette différence d'affinité est observée entre les deux métaux : le zinc présente une adsorption totale (100%), tandis que le cuivre plafonne entre 56,25% et 67,63%. Cette sélectivité s'explique par les propriétés ioniques intrinsèques de chaque métal : le rayon hydraté plus faible du Zn^{2+} favorise sa diffusion vers les sites actifs, tandis que le Cu^{2+} fait face à des contraintes stériques plus élevées, laissant une fraction d'ions libres dans le filtrat. Ces résultats obtenus en milieu compétitif sont cohérents avec (Shaheen et al., 2013), qui confirment que la capacité d'adsorption est conditionnée par la stabilité des complexes formés entre les ions et les groupements fonctionnels (amines, carboxyles, hydroxyles) de la biomasse — validant ainsi que la compétition entre Zn^{2+} et Cu^{2+} pour les sites actifs de notre farine dégraissée est régie par leurs propriétés de coordination respectives.

X. La validation de l'hypothèse de recherche

En introduction de ce travail, il a été postulé qu'une farine de poisson issue exclusivement de coproduits halieutiques (têtes, écailles et arêtes) présenterait des propriétés de stabilisation des métaux lourds similaires à celles documentées dans la littérature pour la chitine ou le chitosane purifiés. À la lumière des résultats expérimentaux obtenus, cette hypothèse peut être discutée en deux temps :

X.1. Validation de l'efficacité intrinsèque de la farine en milieu aqueux

À la lumière des résultats expérimentaux obtenus, cette hypothèse est pleinement validée en milieu aqueux. Les essais menés en solution aqueuse synthétique confirment de manière indiscutable le potentiel fixateur de la biomasse développée. Avec un taux d'adsorption atteignant 100 % pour le Zinc (Zn^{2+}) et oscillant entre 56.25 % et 67.63 % pour le Cuivre (Cu^{2+}), la farine de poisson démontre une excellente capacité de rétention et une sélectivité marquée, validant ainsi le mécanisme chimique de l'hypothèse en milieu liquide.

Conclusion

CONCLUSION

Au terme de cette étude, la question centrale posée en ouverture trouve une réponse nuancée mais globalement encourageante. Les analyses ont établi que les boues de la STEP de Beni Messous et la farine issue de déchets halieutiques locaux ne sont pas de simples déchets à gérer, mais des matrices biologiquement actives dont les profils se complètent avec cohérence : là où les boues apportent l'azote, le phosphore et la charge microbienne, la farine contribue la densité organique, les structures minérales et les biopolymères fonctionnels.

Le co-compostage n'a pas tenu ses promesses à l'échelle du laboratoire, non pas par inadéquation des substrats, mais par inadaptation du dispositif aux exigences thermiques de la méthode de Berkeley. Cette distinction est fondamentale : l'échec observé est un échec de conditions, pas un échec de concept. Il enseigne que la thermogenèse du compostage est indissociable d'une masse critique suffisante et d'un environnement thermiquement maîtrisé.

À l'inverse, la capacité de la farine de poisson à immobiliser les métaux lourds a été démontrée avec robustesse. Portée par les structures biopolymériques naturelles de la biomasse halieutique, cette propriété ouvre un champ applicatif prometteur : la farine devient un agent de biorestauration capable d'intercepter les contaminants métalliques. Cette transformation d'un coproduit en outil de dépollution constitue l'apport le plus original de ce travail. La suite logique et applicative de cette hypothèse réside désormais dans la capacité de cette farine à stabiliser ces mêmes contaminants au sein d'une matrice réelle, complexe et dense : les boues déshydratées de stations d'épuration (STEP).

Ces résultats invitent à reconsidérer la manière dont l'Algérie appréhende ses déchets organiques. Relier les flux des stations d'épuration et de la filière halieutique dans une logique circulaire est une trajectoire réaliste, à condition de doter les expérimentations des volumes et des conditions qu'elles exigent. Ce travail, par la rigueur de ses protocoles et la franchise de ses résultats, pose des fondations solides pour des études à plus grande échelle, au service d'une agriculture nationale moins dépendante des intrants chimiques et plus attentive à ses propres ressources.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- Aboudamia, F., El Amerany, F., & Jaouad, A. (2024). Strategies to Reduce/Manage Fish Waste.
- Abu Amr, S., Balida, D. R., Mahfud, R., & Alazaiza, M. D. (2024). Harnessing seafood waste for sustainabale wastewater treatment: a comprehensive reviewof innovative application.
- Afilal, M. E., Elasri, O., & Merzak, Z. (2014). Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel biogaz. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5, 1160–1169.
- Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., & Revel, J.-C. (2005, Mai). Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge. *Chemosphere*, 59, p.801-810.
- Amouche, M. (2016, Juin 18). Caractérisation des boues de la STEP de Réghaïa. École Nationale Polytechnique (ENP).
- Arvanitoyannis, I., & Kassaveti, A. (2008). Fish industry waste: treatments, environmental impacts, current and potential uses. *International Journal of Food Science & Technology*, Vol. 43, n°4, 726-745.
- Astals, S., Venegas, C., Peces, M., Jofre, J., Lucena, F., & Mata-Alvarez, J. (2012, Decembre). Balancing hygienization and anaerobic digestion of raw sewage sludge. *Water Research*, 46, p.6218-6227.
- Banuelos, G. S., & Ajwa, H. A. (1999). Trace elements in soils and plants: an overview. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 34, 951–974.
- Bechtel, P. (2003). Properties of different fish processing by-products from pollock, cod and salmon. *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 27, n°2, 101-116.
- Begum, Y. A., Kumari, S., Sunaina, & Garg, M. C. (2024). Heavy metal contamination in fish: sources, mechanisms and consequences. *Aquatic Sciences*, Vol. 86, n°4, 112-128.
- Bondarczuk, K., Marowicz, A., & Piotrowska-Seget, Z. (2016). The urgent need for ris assessment on the antibiotic resistance spread via sewage sludge land application. *Environmental International*, 87, 49-55.
- BOUAISSA. (2015). Traitement des boues de la station d'épuration d'Alhoceima. Faculté des sciences et technologies. mohamed premier oujda.

- Bougrier, C. (2005). Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique : application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées. p. 12. Université de Montpellier 2.
- BOULAHBAL, O. (2011). contribution à l'étude de l'évolution de la matière organique des boues dans le sol. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.
- Bracewell, J. M., Robertson, G. W., & Welch, D. I. (1980, Novembre). Polycarboxylic acids as the origin of some pyrolysis products characteristics of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2, p. 239-248.
- Caruso, G. (2016). Fishery wastes and by-products: a resource to be valorised. *Journal of Fisheriessciences.com*, Vol. 10, n°1, 12-15.
- Caruso, G., Floris, R., Serangeli, C., & Di Paola, L. (2020). Fishery wastes as a yet undiscovered treasure from the sea: Biomolecules sources, extraction methods and valorization. *Marine Drugs MDPI*, 18, n°12, 622.
- Chadar, S. N., Chadar, K., & Singh, M. (2018). Composting as an eco-friendly method to recycle organic waste. *Progress in Petrochemical Science*, pp. 1-3.
- Cho, J. H., & Kim, I. H. (2011). Fish meal - nutritive value. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, Vol. 95, n°6, 685-692.
- Codex Alimentarius. (2023). Classement CX/PR 23/54/6 : Produits alimentaires secondaires d'origine animale (Type 16). Codex Alimentarius.
- Collard, M. (2015). Étude de la matière organique de boues de station d'épuration. Influence de différents procédés de traitement des boues. École Doctorale Sciences pour l'environnement Gay Lussac, France.
- Collection OTV, n° 2. (1997). Dans *Traiter et valoriser les boues* (p. 457). O.T.V (Omnium de Traitement et de Valorisation).
- Considérations sur l'emploi des farines de poisson. (1925). *Tome I, n°1*, 173. Revue des Travaux de l'Office des Pêches Maritimes.
- Cooney, R., de Sousa, D., Fernández-Ríos, A., Mellett, S., Neil Rowan, Morse, A., . . . Eugene Clifford. (2023). A circular economy framework for seafood waste valorisation to meet

- challenges and opportunities for intensive production and sustainability. *Journal of Cleaner Production Elsevier*, Vol. 392, Article 136283.
- Coppola, D., Lauritano, C., Palma Esposito, F., Riccio, G., Rizzo, C., & de Pascale, D. (2021). Fish Waste: From Problem to Valuable Resource. *Marine Drugs*, 19, n°2, Article 116.
- Dash, S., Shyamalini, S., & Dash, P. (2022). Evaluation of various possibilities of underutilized fish processing biomass as a value-added product: A waste-to-wealth approach. Elsevier.
- Degrémont SA. (2005). *Mémento technique de l'eau* (éd. 10^e édition, Vol. Tome 2 (ouvrage en 2 volumes)). Degrémont-Suez.
- Dekersmaecker, M. (s.d). La fabrication industrielle de la farine de poisson. Direction de la S.A. Pescator, Ostende.
- DEROUICHE, F. (2012). Contribution à l'étude des boues résiduelles comme amendement organiques pour les cultures maraichères. université Oran.
- Dhar, M., Jasrotia, R., & Langer, S. (2024). Using Fish Waste and By-Products for Manufacturing Organic Fertilizers and Manures. Dans *Using Fish Waste and By-Products for Manufacturing Organic Fertilizers and Manures* (p. 339 353).
- Djafari, D., Zentar, R., Adda, H. M., Mustapha, A., & Amar, B. B. (2024). Green cement production using sludge from wastewater treatment plants. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5, e8200.
- Essabiri, H., Damrani, R., Boumalkha, O., Hachi, T., Laiboud, C., & Abba, E. (2022). Fish waste: Valorisation methods on a local scale. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1090, n°1.
- Ezquerra-Brauer, J., & Aubourg, S. (2019). Recent trends for the employment of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) by-products as a source of bioactive compounds with nutritional, functional and preservative applications: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, Vol. 54, n°4, 987-998.
- FAO. (2019). *Fishery and Aquaculture Country Profiles: Algeria*. Consulté le Mars 2026, sur FAO Fisheries and Aquaculture: <https://www.fao.org/fishery/en/facp/DZA/lang=en>

- FAO. (2024). *La Situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2024. La transformation bleue en action*. Consulté le 2026, sur [10.4060/cd0683fr](https://www.fao.org/4/y5104f/y5104f06.htm#TopOfPage) ; FAO
- FAO. (s.d.). *Chapitre 2. Compostage à petite échelle*. Consulté le Avril 25, 2026, sur Food Ans Agriculture organisation: <https://www.fao.org/4/y5104f/y5104f06.htm#TopOfPage>
- Fijalkowski, K., Rosikon, K., Grobelak, A., Hutchnison, D., & Kacprzak, M. J. (2018). Modification of properties of energ crops under polish condition as an effect of sewage sludge application onto degraded soil. *Journal of Environmental Management*, 217, 509-519.
- Food and Agriculture Organization. (2018). he state of world fisheries and aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals. 1-227. FAO.
- Freeman, K. (2012). Remediating Soil Lead with Fish Bones (La décontamination du plomb dans le sol avec des arêtes de poisson). *Environmental Health Perspectives*, p. A20 à A21.
- Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review. *Renewable and Sustainble Energy Reviews*, 12, 116-140.
- Ghaly, A., Ramakrishnan, V., Brooks, M., Budge, S., & Dave, D. (2013). Fish processing wastes as a potential source of proteins, amino acids and oils: A critical review. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, Vol. 5, n°4, 107-129.
- Girmaud, L. (1996). *LA VALEUR AZOTEE DES BOUES D'EPURATION*. Consulté le Mars 2026, sur [u-picardie.fr/beauchamp/duce/grimaud.htm](https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duce/grimaud.htm): <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duce/grimaud.htm>
- Giroux, M., & Audesse, P. (2004, Décembre). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15.
- Giroux, M., & Audesse, P. (2004). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol (souvent écrit Agrosols)*. *C'est une revue scientifique francophone spécialisée en agronomie et en science des sols, publiée au Québec.*, 15, p.107 à 110.
- Grimaud, L. (1996). La valorisation des boues de station d'épuration en agriculture. 44 pages. Université de Picardie.

- Guerfi, X. (2012). Impact de l'utilisation des boues résiduelles sur les propriétés physico-chimiques des sols de la haute vallée de la Medjerda, wilaya de Souk Ahras. p. 97. Université Badji-Mokhtar Annaba.
- Guerreiro, M., & Retiere, L. (1992). Analyse de la variation de la composition de la farine élaborée à l'usine de transformation du poisson, Interpêche. IFREMER / Interpêche.
- Hodson, M. E., Valsami-Jones, E., & Cotter-Howells, J. D. (2000). Bonemeal additions as a remediation treatment for metal contaminated soil (L'ajout de poudre d'os comme traitement de décontamination pour les sols contaminés par des métaux). *Environmental Science & Technology*, p. 3501 à 3507.
- Hsu, J.-H., & Lo, S.-L. (2001, Août). Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. *Environmental Pollution*, 114, p.119-127.
- Hussain, S., Rahman, A., Borah, P., Sen, A., Bharalee, R., Chabukdhara, M., . . . Verma, A. (2025). Eco-friendly Advancements through Fish Waste: A Review of Therapeutic and Industrial Innovations. *Combinatorial Chemistry*.
- Irianto, H., Dewi, A., & Giyatmi. (2014). Prospective utilization of fishery by-products in Indonesia. Dans *Seafood Processing By-Products: Trends and Applications* (éd. Dans S.K. Kim (éd.), *Seafood Processing By-Products: Trends and Applications*, Vol. Vol. 35, pp. 21-34). Springer.
- Jaies, I., Qayoom, I., Saba, F., & Khan, S. (2024). Fish Wastes as Source of Fertilizers and Manures.
- Jouraiphy, A. (2007). Compostage des boues activées-déchets verts : analyses physicochimiques, microbiologiques, toxicologiques, bilan humique et valorisation agronomique.
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., . . . Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39-46.
- Kandyliari, A., Mallouchos, A., Papandroulakis, N., Golla, J., Lam, T., Sakellari, A., . . . Kapsokefalou, M. (2020). Nutrient Composition and Fatty Acid and Protein Profiles of Selected Fish By-Products. *Foods Journal MDPI*, Vol. 9, n°2, Article 190.
- Lead, J. R. (2005). Trace Metal Speciation. Dans *Water Encyclopedia* (pp. 202-205).

- LeCompost.com. (s.d.). *Hot Composting (Méthode Berkeley) : Le Guide du Compostage Ultra-Rapide*. Consulté le mars 25, 2026, sur LeCompost.com: <https://www.lecompost.com/problemes-compost/hot-composting-berkeley.html>
- Lian, S., & Ruan, S. (2024). *Recycling of incineration sewage sludge ash into cement clinker*. Elsevier BV.
- Linder, M., Fanni, J., & Parmentier, M. (2006). Fractions lipidiques obtenues à partir des co-produits de la filière halieutique. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 13, n°1.
- Linder, M., Fanni, J., & Parmentier, M. (2006). Fractions lipidiques obtenues à partir des co-produits de la filière halieutique. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, Vol. 13, n°1.
- Love, D., Frank Asche, Jill Fry, Lan Nguyen, Jessica Gephart, Garlock, T., . . . Stefano Viglia. (2022). Aquatic food loss and waste from production to consumption: United States case study. Norway, United States, and Vietnam: Dans *Fisheries and aquaculture by-products: Case studies in Norway, United States, and Vietnam*. Consulté le Mars 2026
- Love, D., Fry, J., Milli, M., & Neff, R. (2015). Wasted seafood in the United States: Quantifying loss from production to consumption and moving toward solutions. *Global Environmental Change*, Vol. 35, 116-124.
- Maia Junior, W., & de Oliveira Sales, R. (2013). Propriedades Funcionais da Obtenção da Silagem Ácida e Biológica de Resíduos de Pescado: Uma Revisão. *Vol. 7, n°2*, 126-156.
- Malcorps, W., Newton, R., Sprague, M., Glencross, B., & Little, D. (2021). Nutritional characterisation of European aquaculture processing by-products to facilitate strategic utilisation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 378.
- Maleki-Roudposhti, S., Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., & Baghernejad, M. (2023). Application of fish scale derivatives in ameliorating the phytotoxicity effects of multi-metal contaminated soil on paddy rice (Application de dérivés d'écailles de poisson pour améliorer les effets de phytotoxicité d'un sol contaminé par plusieurs métaux). *Soil & Environment*, 42, 13 à 23.
- Martínez-Montaña, E., Osuna-Ruiz, I., Benítez-García, o., & Pacheco-Aguilar, R. (2021). Biochemical and antioxidant properties of recovered solids with pH shift from fishery effluents (sardine stickwater and tuna cooking water). *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 12, n°4, 1901-1913.

- McBride, M. B. (2003, Octobre). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks? *Advances in Environmental Research*, 8, p.5-19.
- Mgbechidinma, C., Zheng, G., Buyagao Baguya, E., Zhou, H., Ukpong Okon, S., & Zhang, C. (2022). Fatty acid composition and nutritional analysis of waste crude fish oil obtained by optimized milder extraction methods. *Environmental Engineering Research*, Vol. 28, n°2.
- M'Hamed, H. (2025, Janvier 2). Traitement des eaux usées : La feuille de route mise en place. *El Watan*.
- Mohanty, B. (2020). Fishery By-products: A Current and Optimistic Technique of Commerce. *Research Today*, 27, pp. 531-534.
- Moletta, R., & Cansell, F. (2003, février). Méthanisation des déchets organiques : étude bibliographique. 104. RECORD (Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets).
- Montoya, R., & Sanchez, A. (2022). *Fish meal and fish oil: global production, consumption and sustainable management*. Elsevier Academic Press.
- Mortula, M., Ahmed, A., Fattah, K. P., Zennerni, G. M., Shah, S. A., & Sharabay, A. M. (2020). Sustainable management of organic wastes in Sharjah, UAE through co-composting. *Modelling*, p. 76.
- Murugan, G., Ahilan, K., Arul Prakasam, V., Malreddy, J., Benjakul, S., & Nagarajan, M. (2024). Fish Waste Composition and Classification. Ouvrage collectif non précisé.
- Nikoo, M., Benjakul, S., Yasemi, M., Gavligi, H., & Xiaoyun Xu. (2019). Hydrolysates from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) processing by-product with different pretreatments: Antioxidant activity and their effect on lipid and protein oxidation of raw fish emulsion. *LWT - Food Science and Technology*, 108, 120-128.
- Nikoo, M., Regenstein, J., & Yasemi, M. (2023). Protein hydrolysates from fishery processing by-products: Production, characteristics, food applications, and challenges. *MDPI*, Vol. 12, n°24, Article 4470.
- Othman, A., Abd-Kadir, A., & Zayadi, N. (2016). Waste fish scale as cost effective adsorbent in removing zinc and ferum ion in wastewater. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, n°3, 1584-1592.

- Pacchiano, R. A., Sohn, W., Chlanda, V. L., & Stark, R. E. (1993, Janvier). Isolation and spectral characterization of plant-cuticle polyesters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41, p. 78 83.
- Pal, D., & Maiti, S. K. (2020). An approach to counter sediment toxicity by immobilization of heavy metals using waste fish scale derived biosorbent. *Ecotoxicology and Environmental Safety Elsevier*, Vol. 187, Article 109833.
- Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2003). *L'analyse du sol : minéralogique, organique et minérale*. Springer.
- Patrascu, L., & Aprodu, I. (2017). Processing of Low-Value Fish, Coproducts, and By-Catch. CRC Press.
- Rahman, A., Haque, M., Ghosh, S., Shinu, P., Attimarad, M., & Kobayashi, G. (2023). Modified Shrimp-Based Chitosan as an Emerging Adsorbent Removing Heavy Metals (Chromium, Nickel, Arsenic, and Cobalt) from Polluted Water. *Sustainability Journal*, Vol. 15, Article 2431.
- Redman, B. (2022). Fish Wastes: Present Status of Utilization and Scope of Valorization. Apple Academic Press eBooks.
- Rezk, R. A., Galmed, A. H., Abdelkreem, M., Abdel Ghany, N. A., & Harith, M. A. (2018). Detachment of Cu (II) and Co (II) ions from synthetic wastewater via adsorption on Lates niloticus fish bones using LIBS and XRF. *Journal of Advanced Research*, 14, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.002>
- Robbins, L. J., Mänd, K., Planavsky, N. J., Alessi, D. S., & Konhauser, K. O. (2020). Trace Metals. Dans *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer.
- Rong-yan, S. (2006). *The Advances in Municipal Sewage Sludge and Assessment for Its Land Application*.
Récupéré sur
<https://www.semanticscholar.org/paper/5fe7a54500fc4a7b49f5be87f973aa08f930f1ec>
- Roy, V., Getachew, A., Yong Je Cho, Jae Seong Park, & Byung Soo Chun. (2021). Extraction of astaxanthin using ultrasound-assisted natural deep eutectic solvents from shrimp wastes and its application in bioactive films. *Elsevier*, Vol. 284, Article 125417.

- Roy, V., Park, J., Thi Cam Ho, & Soo Chun, B. (2022). Lipid indexes and quality evaluation of omega-3 rich oil from the waste of Japanese Spanish mackerel extracted by supercritical CO₂. *Marine Drugs MDPI, Vol. 20, n°1*, Article 70.
- Rustad, T., Storror, I., & Slizyte, R. (2011). Possibilities for the utilisation of marine by-products. *International Journal of Food Science & Technology, Vol. 46, n°10*, 2001-2014.
- Sachindra, N., Bhaskar, N., & Mahendrakar, N. (2006). Recovery of carotenoids from shrimp waste in organic solvents. *Waste Management, Vol. 26, n°10*, 1092-1098.
- Saleh, N., Wassef, E., & bdel-Mohsen, H. (2022). Sustainable Fish and Seafood Production and Processing. Academic Press.
- Senesil, G. S., Baldassarre, G., Senesi, N., & Radina, B. (1999). Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere, 39*, 343–377.
- Shahidi, F., Varatharajan, V., Hongpeng Peng, & Rasika Senadheera. (2019). Utilization of marine by-products for the recovery of value-added products. *Journal of Food Bioactives, Vol. 6*, pp. 10-61.
- Shin, H. S., & Moon, H. (1996, April 01). An “average” Structure Proposed For Soil Fulvic Acid Aided By Dept/quat 13c Nmr Pulse Techniques. *Lippincott Williams & Wilkins, 161*, p. 250-256.
- Silva, T., Mesquita-Guimarães, J., Henriques, B., Silva, F., & Clara Fredel, M. (2019). The potential use of oyster shell waste in new value-added by-product. *Resources, Vol. 8, n°1*, Article 13.
- Sneddon, R., Valsami-Jones, E., & Hodson, M. E. (2002, April 11). An Investigation into Remediation of Heavy Metals by Bonemeal Amendments to Contaminated Soil (Une enquête sur la décontamination des métaux lourds par des amendements de poudre d'os dans les sols contaminés). *CL:AIRE Annual Conference*. Récupéré sur <https://claire.co.uk/phoca-download/1-publications-library/11-research-bulletins.html?download=69%3Aclaire-rb5-supplement>
- Stenmarck, Å., Jensen, C., Quested, T., Moates, G., Buksti, M., Cseh, B., . . . Scherhauser, S. (2016). Estimates of European food waste levels. 1-80. IVL Swedish Environmental Research Institute.

- Stevens, J., Newton, R., Tlusty, M., & Little, D. (2018). The rise of aquaculture by-products: Increasing food production, value, and sustainability through strategic utilisation. *Marine Policy Elsevier, Vol. 90*, 115-124.
- Stevens, M. G., & Batlokwa, B. S. (2017). Environmentally Friendly and Cheap Removal of Lead (II) and Zinc (II) from Wastewater with Fish Scales Waste Remains. *International Journal of Chemistry, Vol. 9, n°4*, 22-33.
- Su, D. C., Wong, J., & Jagadeesan, H. (2004, Septembre). Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil. *Chemosphere, 56*, p.957-965.
- Sultana, S., Maliat, N., Khan, F., Paul, A., Tasnim, R., & Jahan, N. (2025). Utilization of Catla catla Fish Scale for Eliminating Cr (III) and Co (II) Heavy Metals From Wastewater. *Nano Select*, 1-15.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., Tsuchihashi, R., Stensel, H., & Inc, M. (2013). *Wastewater EngineerinTreatment and Resource Recovery* (éd. 5^e édition (illustrée)). McGraw-Hill Education.
- Valcarcel, J., Sanz, N., & Vázquez, J. (2020). Optimization of the enzymatic protein hydrolysis of by-products from seabream (*Sparus aurata*) and seabass (*Dicentrarchus labrax*), chemical and functional characterization. *Foods Journal, 9, n°10*, 1503.
- Vázquez, J., Pedreira, A., Durán, S., Cabanelas, D., Souto-Montero, P., Martínez, P., . . . Valcarcel, J. (2022). Biorefinery for tuna head wastes: Production of protein hydrolysates, high-quality oils, minerals and bacterial peptides. *Journal of Cleaner Production Elsevier, Vol. 357*, Article 131909.
- Viglia, S., Brown, M., Love, D., Fry, J., Scroggins, R., & Neff, R. (2022). Analysis of energy and water use in USA farmed catfish: toward a more resilient and sustainable production system. *Elsevier, 379*, 134796.
- Warman, P. R., & Termeer, W. C. (2005, Juin). Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn and B content of crops and soils. *Bioresource Technology, 96*.
- Whitley, M., & Salem, W. (2006, Juillet 24). *Blue Ridge Environmental Defense League*. Récupéré sur <http://bredl.org/pdf/060724ltr-wsro-sag.pdf>

- Wilgress, L. D. (1924, juin 21). Demand for fish meal in Germany. *Commercial Intelligence Journal*, pp. 702-704.
- Wolejko, E., Wydro, U., Jablonska-Trypuc, A., Butarewicz, A., & Loboda, T. (2018). The effect of sewage sludge fertilization on the concentration of PAHs in urban soils. *Environmental Pollution*, 232, 347-357.
- Younos, T. M. (1987). *Land application of wastewater sludge*. American Society of Civil Engineers. Récupéré sur <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0055155>
- Zairinayati, Z., & Purnama, R. (2025). The influence of various types of local microorganisms on compost quality using the Berkeley method on kitchen waste. *Gema Kesehatan Lingkungan*, pp. 60-66.
- Zayadi, N., & Othman, N. (2013). Characterization and Optimization of Heavy Metals Biosorption by Fish Scales. *Advanced Materials Research*, Vol. 795, 260-265.
- Zebarth, B. J., McDougall, R., Neilsen, G., & Neilsen, D. (2000, Juillet 01). Availability of nitrogen from municipal biosolids for dryland forage grass. *Canadian Journal of Plant Science*, 80, p. 575.

Annexes

Annexes

Les boues ne doivent pas être épandues sur les sols dont les teneurs en un ou plusieurs éléments traces métalliques excèdent les valeurs suivantes en milligramme par kilogramme de matière sèche

Cadmium.....	3
Chrome.....	150
Cuivre.....	140
Mercure.....	1,5
Nickel.....	75
Plomb.....	300
Zinc.....	300

Les teneurs en éléments traces dans les sols doivent être déterminées avant le premier épandage des boues, puis au minimum tous les 10 ans.

Figure 32. Valeurs limites de concentration en métaux lourds autorisées dans les sols récepteurs de boues d'épuration (Norme NA 17731).

	Elément ou composé	Valeur limite (mg/kg de MS)
Eléments traces métalliques	As	18
	Cd	3
	Cr	120
	Cu	300
	Hg	2
	Ni	60
	Pb	180
	Se	12
	Zn	600

Figure 33. Teneurs limites en éléments traces métalliques (ETMs) fixées par la norme française NF U 44-095 « Amendements organiques — Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux ».

Tableau 20.caractérisation physico-chimique des boues de step (beni messous, alger)

Paramètre	Valeur
Humidité (% produit brut)	81,60
Matière Sèche — MS (% produit brut)	18,40
pH	7,94
Matière Organique — MO (% MS)	59,95
Matière Minérale — MM (% MS)	40,05
Carbone Organique Total — COT (% MS)	34,85
Azote Total Kjeldahl — NTK (% MS)	5,69
Phosphore Total — P (% MS)	2,27
Phosphore Soluble (mg P/L)	0,474
Rapport C/N	6,13
Rapport N/P	2,50
Cadmium — Cd (mg/Kg MS)	0,0601
Plomb — Pb (mg/Kg MS)	0,4166
Cuivre — Cu (mg/Kg MS)	0,4
Zinc— Zn (mg/Kg MS)	0,14

Tableau 21.Composition physico-chimique de la farine de poisson (déchets halieutiques locaux).

Paramètre	Valeur
Humidité (% produit brut)	5,86 %
Matière Sèche — MS (% produit brut)	94,14 %
pH	5,57
Matière Organique — MO (% MS)	79,36 %
Matière Minérale / Cendres — MM (% MS)	20,64 %
Carbone Organique Total — COT (% MS)	46,20 %
Azote Total (N — % MS)	4,89 %
Protéines Brutes (PB — % MS)	32,43 %
Lipides / Matières Grasses (MG — % MS)	34,31 %
Extractif Non Azoté — ENA (% MS)	12,72 %
Rapport C/N	9,60

5- Produits de la pêche et de l'aquaculture (suite)

Catégories des denrées alimentaires	Micro-organismes/ métabolites	Plan d'échantillonnage		Limites microbiologiques (ufc/g ou ufc/ml)	
		n	c	m	M
Poissons et autres produits de la pêche et de l'aquaculture fumés, salés, marinés...	Germes aérobies à 30 °C	5	2	10 ⁶	10 ⁷
	Coliformes thermotolérants	5	2	10	10 ²
	Staphylocoques à coagulase +	5	2	10 ²	10 ³
	<i>Salmonella</i>	5	0	Absence dans 25 g	
	<i>Listeria monocytogenes</i>	5	0	100	
Préparations de poisson et autres produits de la pêche et de l'aquaculture crus à consommer cuits	Coliformes thermotolérants	5	2	5.10 ³	5.10 ⁴
	Staphylocoques à coagulase +	5	2	50	5.10 ²
	<i>Salmonella</i>	5	0	Absence dans 25 g	
Préparations de poisson et autres produits de la pêche et de l'aquaculture crus pouvant être consommés en l'état	Coliformes thermotolérants	5	2	10 ³	10 ⁴
	Staphylocoques à coagulase +	5	2	50	5.10 ²
	<i>Bacillus cereus</i> ⁽⁶⁾	5	2	10 ²	10 ³
	<i>Salmonella</i>	5	0	Absence dans 25 g	
	<i>Listeria monocytogenes</i>	5	0	100	
Charcuteries à base de produits de la pêche et de l'aquaculture cuites à consommer en l'état	Germes aérobies à 30 °C	5	2	10 ⁶	10 ⁷
	Coliformes thermotolérants	5	2	10	10 ²
	Staphylocoques à coagulase +	5	2	10 ²	10 ³
	<i>Bacillus cereus</i> ⁽⁶⁾	5	2	10 ²	10 ³
	<i>Salmonella</i>	5	0	Absence dans 25 g	

Figure 34. Critères microbiologiques applicables aux produits de la pêche (Journal Officiel de la République Algérienne n° 39, 2017) – Référence pour la valorisation des sous-produits halieutiques.

Nombre de tubes positifs au niveau des 3 taux de dilution retenus	NPP	Nombre de tubes positifs au niveau des 3 taux de dilution retenus	NPP
000	< 0,3	230	2,9
001	0,3	300	2,3
010	0,3	301	4
020	0,6	302	6
100	0,4	310	4
101	0,7	311	7
110	0,7	322	12
111	1,1	320	9
120	1,1	321	15
121	1,5	322	21
200	0,9	323	29
201	1,4	330	20
210	1,5	331	50
211	2,0	332	110
220	2,1	333	>110
221	2,8		

Figure 35. Table de Mac Grady pour la détermination du Nombre le Plus Probable (NPP) de micro-organismes par gramme ou millilitre d'échantillon.