



Food and Agriculture
Organization of the
United Nations

Bureau Sous-Régional de la FAO pour l'Afrique du Nord

Valorisation agricole des boues d'épuration dans les pays du
Maghreb : potentialités et défis

Gestion et valorisation agricole des boues d'épuration au Maroc

Rapport national – Maroc

Préparé par : *Soudi Brahim et El Khoumsi Wafae*

Octobre 2024

Table des matières

1.	Contexte et motivation.....	8
2.	Bref aperçu sur le secteur d'assainissement liquide au Maroc	9
1.1.	Parc des STEPs réalisées et en cours.....	9
1.2.	Volume des eaux usées traitées et taux d'épuration.....	11
1.3.	Les dispositifs d'épuration	13
1.4.	Les opérateurs de gestion du parc des STEPs.....	15
3.	Les gisements de boues produits : caractérisation quantitative et qualitative	17
3.2.	Hypothèses d'estimation	17
3.3.	Évolution des gisements des boues : gisements actuels et projection à l'horizon 2030.	18
3.4.	Caractérisation qualitative des boues	19
3.5.	Valeur fertilisante des boues	29
4.	Situation actuelle de la gestion des boues.....	35
4.1.	Destinations actuelles et initiatives entreprises en matière de traitement et de valorisation des boues ..	35
4.2.	Problématiques liées aux boues mal gérées	42
5.	Filières de traitement-valorisation des boues d'épuration	44
5.2.	Benchmark international.....	44
5.3.	Filières recommandées pour le Maroc	46
5.3.1.	Système intensif à boues activées dans les grandes agglomérations.....	46
6.	Réglementations et directives pour l'application des boues aux sols agricoles : benchmark international et déductions pour le Maroc	48
6.2.	Vue d'ensemble des directives définissant les prescriptions et conditions de valorisation agricole des boues.....	48
6.3.	Normes des éléments traces métalliques	55
6.3.1.	Normes absolues et normes relatives (tenant compte des propriétés du sol)	55
6.3.1.	Tentatives d'adaptation des normes au Maroc et aux pays de MENA	62
6.4.	Normes des Composés Traces Organiques (CTO).....	63
6.5.	Normes des agents pathogènes.....	64
7.	Cadre réglementaire et institutionnel au Maroc : analyse de situation et recommandations d'amélioration	68
7.2.	Cadre réglementaire	68
7.3.	Cadre institutionnel.....	73
8.	Intégration des boues d'épuration en agriculture : bénéfices et gestion des risques.....	76
8.2.	Bénéfices d'application des boues comme produits d'amendement des sols au Maroc	76
8.2.1.	Effets des boues appliquées au sol sur les propriétés du sol	76
8.2.1.	Études de cas	78
8.2.	Risques liés à la valorisation agricole des boues et mesures de leur gestion	80
8.2.1.	Mesures et recommandations de gestion des risques.....	83
9.	Note conceptuelle pour la promotion de la valorisation agricole des boues au Maroc.....	84
9.2.	Construction d'une Théorie de Changement.....	84
9.3.	Hypothèses et risques conditionnant la réalisation des outcomes et l'atteinte des impacts.....	93
10.	Élaboration d'un plan d'action prioritaire 2030.....	95
10.1.	Ébauche du plan d'action prioritaire - 2030.....	95
10.2.	Suivi et rapportage des progrès de mise en œuvre du Plan d'Action Prioritaire – 2030 avec anticipation pour le Plan – Directeur 2035	100
10.2.1.	Mécanismes de suivi à l'échelle nationale et régionale.....	100
10.2.2.	Indicateurs de performance (KPIs)	101
10.2.3.	Modalités de rapportage.....	104
11.	Élaboration des Termes de références pour l'élaboration du Schéma ou Plan Directeur de gestion des boues.....	104
11.2.	Contexte et Objectifs	104
11.3.	Organisation des Missions.....	104
11.4.	Détails des Missions	105
11.4.1.	Mission 1 : État des lieux de la production et gestion des boues	105

<i>11.4.2.Mission 2 : Évaluation du potentiel de valorisation agricole des boues</i>	<i>105</i>
<i>11.4.3.Mission 3 : Classification des projets de valorisation et plan d'action décennal.....</i>	<i>106</i>

Liste des tableaux

Tableau 1: Evolution du taux de raccordement et de dépollution au Maroc	11
Tableau 2: Type de boues et leur composition	20
Tableau 3: Caractéristiques des STEPs concernées par les analyses de boues	21
Tableau 4: Concentration en éléments traces métalliques des boues au Maroc (mg/kg)	23
Tableau 5: La teneur des boues en composés traces organiques (µg/Kg MS)	25
Tableau 6 : Le nombre des œufs d'helminthes dans les boues résiduaires de neuf STEP	26
Tableau 7: teneurs en éléments fertilisants dans les boues selon le procédé d'épuration.	27
Tableau 8: La distribution des teneurs des boues en éléments fertilisants	28
Tableau 9: Teneur des boues en matière organique (en % de Matière sèche) dans les boues des STEPs au Maroc	29
Tableau 10: Concentrations moyennes en éléments majeurs (N, P2O5 et K2O) dans les boues résiduaires (valeurs moyennes d'après plusieurs références)	30
Tableau 11 : Taux de minéralisation de l'azote durant la première année d'épandage	30
Tableau 12 : Fraction estimée (en %) d'azote susceptible d'être disponible pour la culture après différents temps d'application et pour différents types de boues	31
Tableau 13: Textes réglementaires concernant l'utilisation des boues en agriculture dans les pays d'Europe	49
Tableau 14 : Textes réglementaires concernant l'utilisation des boues d'épuration en agriculture, au Canada	52
Tableau 15: Valeurs seuils des éléments traces métalliques dans les boues au niveau de quelques pays	56
Tableau 16 : Teneurs limites en éléments -traces métalliques dans les sols agricoles (mg/kg sol sec), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse. D'après, OTV (1997)	58
Tableau 17 : Concentrations maximales permises des Éléments Potentiellement Toxiques (EPT) dans le sol après application des boues résiduaires et taux annuel maximum d'addition (Département de l'Environnement, Royaume Uni, 1989)	60
Tableau 18: Valeurs cumulatives limites pour les principaux métaux lourds applicables aux sols cultivés en fonction de la CEC*(d'après US. EPA, 1977)	61
Tableau 19: Quantités maximales (en kg/ha) pouvant être accumulées dans les sols ((Baker et al., 1984)	61
Tableau 20: Teneurs limites cumulatives des principaux éléments traces dans les sols recevant les boues séchées et/ou compostées (propositions pour les pays du proche orient et d'Afrique du nord)	63
Tableau 21 : Normes tunisiennes d'éléments traces métalliques	63
Tableau 22 : Valeurs limites des CTO dans les boues en France	64
Tableau 23: Les valeurs limites des CTO dans les boues en Allemagne	64
Tableau 24: Concentrations maximales admissibles dans les boues d'épuration utilisées en agriculture en Espagne, article 10 de l'arrêté du 28 mai 1998 sur les engrais.	65
Tableau 25 : Concentrations des agents pathogènes admissibles dans les boues en France	65
Tableau 26: Concentrations maximales des agents pathogènes admissibles dans le compost des boues selon la norme française NF U44-095 (2002)	65
Tableau 27: Seuils de référence pour les teneurs en micro-organismes dans les boues (Directives françaises selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles)	66
Tableau 28 : Durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante (Doran et al. 1976)	67
Tableau 29: Statuts des boues selon les pays	72
Tableau 30: Mesures et recommandations de gestion des risques associés à l'épandage des boues (US-EPA, 1995 ; Mininni et al., 2014 ; OMS, 2006)	83
Tableau 31: Théorie de Changement « développement et déploiement de la valorisation agricole des boues au Maroc	90
Tableau 32: Hypothèses et risques conditionnant la logique de transformation incarnée par la TdC	93
Tableau 33. Plan d'action prioritaire - Valorisation des boues au Maroc – Horizon 2030	97

Liste des figures

Figure 1: Evolution du nombre des STEPs entre 1995 et 2024	10
Figure 2: Répartitions du parc des STEPs par régions	10
Figure 3 : Evolution de la capacité du traitement des STEPs en m ³ /j	12
Figure 4: Evolution de capacité de traitement de la pollution organique des STEPs en Kg DBO5/j	12
Figure 5: Répartition de la capacité de traitement du parc des STEPs en Mm ³ par région	13
Figure 6: Répartition des STEPs par procédés (en nombre)	14
Figure 7: part de chaque procédé dans la capacité de traitement organique	14
Figure 8 : part de chaque procédé dans la capacité hydraulique de traitement	14
Figure 9 : Contribution de chaque opérateur à la gestion du parc des STEPs	16
Figure 10 : Répartition des procédés d'épuration pour chaque opérateur	16
Figure 11: Capacité de traitement hydraulique de chaque opérateur avec un focus sur les stations boues activés	17
Figure 12: Evolution du gisement potentiel annuel des boues produite par le parc des STEPs réalisées et en cours	18
Figure 13 : Contribution de chaque opérateur à la production des boues.	19
Figure 14 : Production des boues selon les différents opérateurs de gestion (2024)	19
Figure 15 Tonnages en éléments fertilisants majeurs potentiellement apportés par les boues à l'horizon 2030.	33
Figure 16 : Destination des boues d'épuration dans quelques pays européens source SYPREA	46
Figure 17: Filières de gestion des boues recommandées pour les systèmes intensifs	47
Figure 18: Filières de traitement et de valorisation recommandées pour le milieu rural Erreur ! Signet non défini.	
Figure 19 : Arborescence de l'indice d'acceptabilité des sols à l'épandage ou IAE	51
Figure 20: Evolution de l'humidité des boues et du nombre d'œufs d'Ascaris	66
Figure 21 : Effets de la matière organique du sol (les fléchées signifient l'amélioration)	77
Figure 22: Logique de transformation adoptée pour la construction de la TdC « développement et déploiement des projets de valorisation agricoles des boues au Maroc »	84
Figure 23: Coût de transport et de séchage des boues humides et séchées	88

Liste des acronymes

ABH	Agence De Bassin Hydraulique
ADEME	Agence De l'Environnement Et De La Maîtrise De l'Énergie
ANEF	Agence Nationale Des Eaux Et Forêts
AOX	Adsorbable Organic Halogen
AUEA	Association Des Usagers De l'Eau Agricole
BNQ	Bureau De Normalisation Du Québec
BPA	Bisphénol A
CEC	Capacité D'échange Cationique
CEE	Conformité Européenne Des Équipements
CMA	Concentration Totale Maximale Admissible
CMD	Catalogue Marocain Des Déchets
CRS	Comités Régionaux De Suivi
CTO	Composés Traces Organiques
CTP	Comité Technique Permanent
DBO	Demande Biologique En Oxygène
DDD	Département Du Développement Durable
DELM	Direction De l'Épidémiologie Et De Lutte Contre Les Maladies
DGCT	Direction Générale Des Collectivités Territoriales
DGH	Direction Générale De l'Hydraulique
DIAEA	Direction De l'Irrigation Et De l'Aménagement De l'Espace Agricole
DPA	Directions Provinciales De l'Agriculture
DRPE	Direction De La Recherche Et De La Planification De l'Eau
EIE	Etudes D'impact Environnemental
EPA	Environmental Protection Agency
EPI	D'équipements De Protection Individuelle
EPT	Éléments Potentiellement Toxiques
ETM	Eléments Traces Métalliques
EU	Eau Usée
EUT	Eau Usée Traitée
FAO	Food And Agriculture Organization
FDA	Fonds De Développement Agricole
FMC	Flux Maximum Cumulé
GES	Gaz A Effet De Serre
GIZ	Société Allemande De Coopération Internationale
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
IAE	Indice D'acceptabilité Des Sols A L'épandage
IAV	Institut Agronomique Et Vétérinaire Hassan II
IMANOR	Institut Marocain De Normalisation
INNPI	Institut National De Normalisation Et De Propriété Industrielle
INRA	Institut National De La Recherche Agronomique
ISO	International Organization For Standardization
MENA	Middle East And North Africa
MO	Matière Organique
MS	Matière Sèche
NM	Norme Marocaine
NT	Normes Tunisiennes
OCP	Office Chérifien Des Phosphates
OMS	Organisation Mondiale De La Santé
ONCA	Office National Du Conseil Agricole
ONEE	Office National De l'Eau Et De l'Électricité
ONSSA	Office National De Sécurité Sanitaire Des Produits Alimentaires
OTV	Ouvrages De Traitement Des Eaux Et De Valorisation
PAP	Plan D'action Prioritaire

PCB	Polychlorobiphényles
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieure
PDAIRE	Plan Directeur de l'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
PDV	Plan De Valorisation
PFOA	Acide Perfluorooctanoïque
PFOS	Sulfone Perfluorooctane
PFT	Produits Fluorés de Traitement
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PNA	Programme National d'Assainissement
PNAM	Programme National d'Assainissement Mutualisé
PNAR	Programmes National d'Assainissement Rural
RAMSA	Régie Autonome Multi-services d'Agadir
SAU	Superficie Agricole Utile
SBR	Réacteur Séquentiel Discontinu
SGG	Secrétariat Général du Gouvernement
STEP	Station de traitement des eaux polluées
SYPREA	Syndicat Professionnel des Exploitants de Stations d'Épuration et de Traitement des Eaux.
TLC	Teneur Limite Cumulative
UE	Union Européenne
UK	United Kingdom
US	United States
USA	United States of America

1. Contexte et motivation

Le secteur de l'assainissement liquide au Maroc joue un rôle crucial dans la préservation de la santé publique et la protection de l'environnement, en répondant aux exigences croissantes de dépollution. Au-delà de ces objectifs primaires, le traitement et la réutilisation des eaux usées épurées apparaissent comme des solutions incontournables dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources en eau, exacerbée par des sécheresses récurrentes et l'augmentation des demandes sectorielles en eau.

Depuis le lancement de la stratégie nationale d'assainissement liquide intégrée en 2019, avec l'avènement du Programme National d'Assainissement Mutualisé (PNAM), des progrès significatifs ont été réalisés dans la gestion des eaux usées à travers le pays. À ce jour, quelque 187 stations de traitement des eaux usées ont été construites, permettant de faire passer le taux d'épuration de 7% en 2006 à plus de 57,5 en 2024. Le Maroc s'est fixé pour objectif d'atteindre un taux d'épuration d'au moins de 80% d'ici 2050, dans le cadre d'une stratégie visant à renforcer la durabilité de ses ressources en eau.

En parallèle, de nombreux projets ont été programmés pour la réutilisation des eaux usées traitées, avec un budget de 450 millions de dirhams alloué en 2022 pour des initiatives régionales. Ces projets s'inscrivent dans le cadre du programme national d'approvisionnement en eau potable et d'irrigation 2020-2027, qui vise entre autres à intégrer la réutilisation des eaux usées dans l'ensemble des secteurs d'activité. L'objectif est de réutiliser environ 100 millions de m³ d'eaux usées traitées chaque année à partir de 2027, avec une ambition de 340 millions de m³ d'ici 2050.

Cependant, la montée en puissance du traitement des eaux usées entraîne une production accrue de boues d'épuration, dont la gestion constitue désormais un défi majeur. Si les eaux usées épurées peuvent être valorisées dans divers secteurs, les boues d'épuration, qui en résultent inévitablement, doivent également être gérées de manière durable. À mesure que le taux d'épuration augmente, le gisement de boues augmente proportionnellement, nécessitant des solutions innovantes pour leur traitement et leur valorisation.

Dans le cadre de la politique nationale de l'eau, la réutilisation des eaux usées épurées et la valorisation des boues sont devenues des priorités stratégiques. La valorisation verte des boues d'épuration, notamment en tant qu'amendement organique pour la fertilisation des sols agricoles et la réhabilitation des terres dégradées, présente un potentiel considérable pour renforcer la résilience des écosystèmes et contribuer à la durabilité de l'agriculture au Maroc. Cette approche permet non seulement d'améliorer la productivité agricole, mais aussi de contribuer à la séquestration du carbone, à la réduction de l'érosion des sols et à la restauration des écosystèmes dégradés.

Dans ce cadre, le Bureau Sous-Régional de la FAO pour l'Afrique du Nord propose d'évaluer les potentiels et les défis associés à la réutilisation des boues résiduelles pour l'agriculture dans les pays du Maghreb, avec un focus particulier sur le Maroc. Ce travail s'inscrit dans le cadre du soutien technique normatif de la FAO aux pays membres, visant à mieux comprendre et promouvoir les bonnes pratiques et normes pour le développement d'une agriculture durable, adaptée aux défis actuels.

Cette étude permettra de diagnostiquer la production et la réutilisation des boues d'épuration traitées sous divers aspects, y compris la santé publique, l'environnement, les aspects socio-économiques, la législation, les politiques et les cadres institutionnels. Elle proposera également, sur base de l'existant, des lignes directrices nationales pour la valorisation sûre et durable des boues, tout en évaluant les besoins en renforcement des capacités des institutions et entités concernées ainsi que des communautés agricoles impliquées.

Enfin, les initiatives existantes au Maroc, bien qu'encore peu nombreuses, montrent le potentiel de la valorisation des boues d'épuration dans le cadre d'une économie circulaire. Elles illustrent l'importance d'une approche intégrée et durable pour transformer ces déchets en ressources précieuses pour l'agriculture et l'environnement.

2. Bref aperçu sur le secteur d'assainissement liquide au Maroc

1.1. Parc des STEP's réalisées et en cours

Le secteur de l'assainissement liquide au Maroc joue un rôle essentiel dans la dépollution, l'amélioration des conditions sanitaires et la protection de l'environnement. Il s'inscrit dans une stratégie nationale globale visant à développer les infrastructures et à répondre aux besoins croissants liés à la gestion des eaux usées.

Le Maroc a ainsi lancé plusieurs projets ambitieux, notamment le Programme National d'Assainissement (PNA) en 2006, dont l'objectif principal est d'augmenter le taux de raccordement des ménages aux réseaux d'assainissement et de traiter les eaux usées avant leur rejet dans l'environnement. À ce jour, ce programme a bénéficié à un total de 261 villes et centres urbains ainsi qu'à 201 centres ruraux. En complément du PNA¹, le Programme national d'assainissement mutualisé (PNAM) a été mis en place en 2019 pour consolider l'assainissement liquide et promouvoir la réutilisation des eaux épurées². Grâce à ces efforts, le taux de raccordement au réseau d'assainissement atteint désormais 83,5 %, tandis que le taux de traitement des eaux usées s'est élevé à 57,5 % contre 7% en 2006.

¹ <https://www.environnement.gov.ma/fr/eau?id=207>

² Déclaration du Ministre de l'Intérieur le 27 Mai 2024 <https://www.lavieeco.com/au-royaume/reutilisation-des-eaux-usees-187-stations-depuration-realisees/>

Le Maroc a réalisé des progrès significatifs dans le développement de son parc de stations d'épuration des eaux usées, répondant ainsi à des besoins croissants en matière de gestion des eaux usées urbaines et rurales. Depuis le lancement du Plan National d'Assainissement Liquide (PNA) en 2006, plusieurs STEP ont été construites à travers le pays comptant un total de 187 STEPs jusqu'à maintenant (Figure 1). En effet, la situation actuelle dénombre un total de 209 stations d'épuration, dont 187 sont déjà opérationnelles, tandis que 22 sont en cours de réalisation.^{3,4,5}

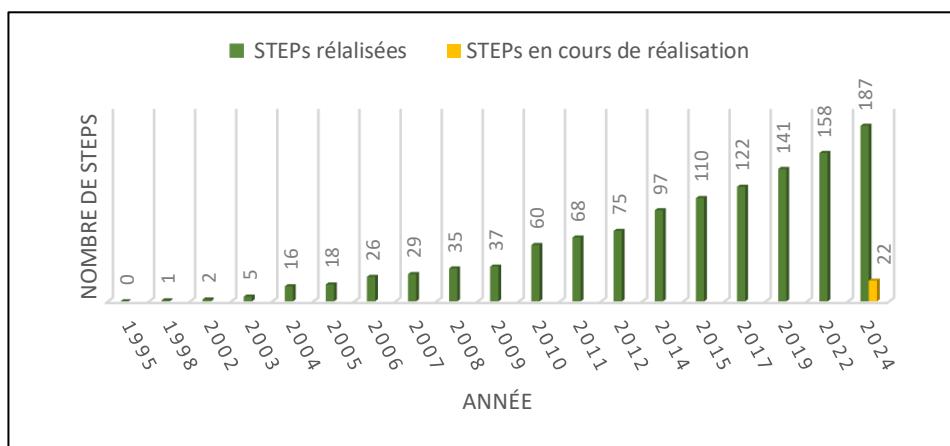


Figure 1: Evolution du nombre des STEPs entre 1995 et 2024

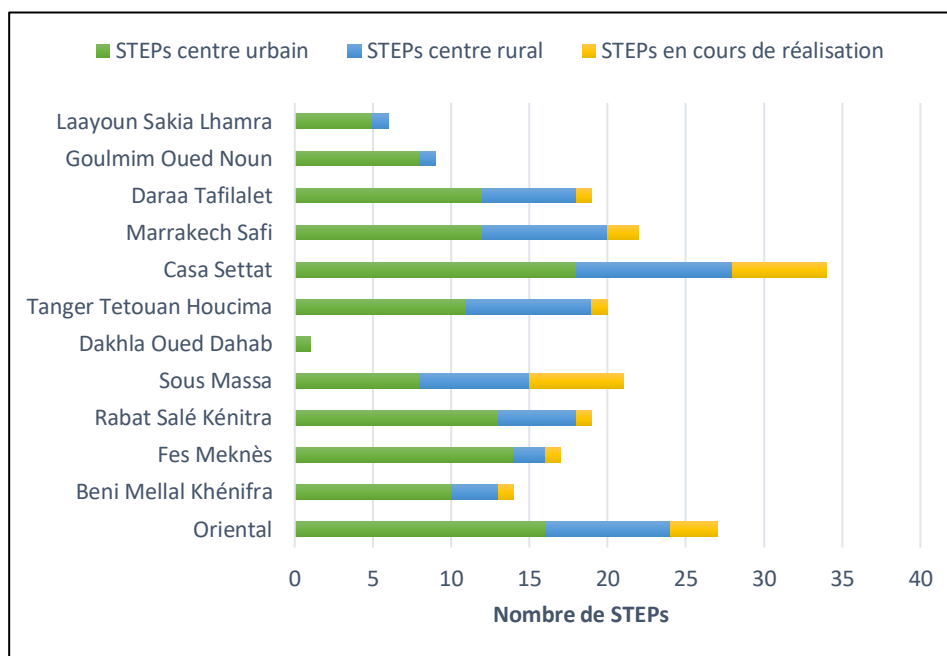


Figure 2: Répartitions du parc des STEPs par régions

³ Mutualisation des programmes nationaux d'assainissement liquide (PNA et PNAR) et de Réutilisation des Eaux Usées. (Ministère de l'intérieur)

⁴Etat des lieux du secteur de l'eau au Maroc, projet CREM

⁵ Tableau de bord des STEPs.

Les stations d'épuration sont réparties inégalement sur toutes les régions du Maroc, avec 128 STEPs dans le milieu urbain et 59 dans le milieu rural. La plupart sont concentrées principalement dans les régions de Casa-Settat, l'Oriental, Marrakech Safi et Souss Massa, capitalisant un total de 50% du parc des STEPs (Figure 2).

1.2. Volume des eaux usées traitées et taux d'épuration

Au Maroc, la situation actuelle du secteur de l'assainissement liquide, en termes de réalisations, a enregistré une évolution remarquable. Le Tableau 1 illustre une nette progression dans la gestion des eaux usées entre 2006 et 2024, avec des augmentations notables du taux de raccordement, du volume traité, et du taux de dépollution. Cette amélioration résulte des investissements soutenus dans l'infrastructure d'assainissement, notamment avec la mise en service de grandes stations d'épuration dans des villes clés comme Fès et Marrakech. Le taux de raccordement a progressé de 70% à 83,5%, tandis que le volume des eaux usées traitées a augmenté significativement, atteignant 443 Mm³ annuellement en 2024 (Sans émissaire). Le taux de dépollution a aussi augmenté, passant de 7% en 2006 à 57,5% en 2024, ce qui démontre une capacité améliorée à traiter et réduire la pollution organique, mais souligne également la nécessité de poursuivre les efforts pour atteindre les objectifs de développement durable du pays.⁶

Tableau 1: Evolution du taux de raccordement et de dépollution au Maroc

Année	Taux de raccordement (%)	Volume des EU traitées (Mm ³ /an)	Taux de dépollution %
2006	70	–	7
2011	72	150	25
2016	75	313,42	43
2020	82	394,6	48
2024	83,5	443	58

Le parc de STEPs dispose aujourd'hui de stations d'épuration capable de traiter environ 3,38 millions de m³ par jour. Cela représente une augmentation significative par rapport à la capacité cumulée de seulement 1 million de m³ par jour avant 2006, date de lancement du Programme National d'Assainissement (PNA).

En termes de dépollution, notamment la capacité de traitement organique, les stations d'épuration au Maroc ont vu leur performance augmenter de manière spectaculaire. Elles sont désormais capables de traiter près de 600 000 kg de DBO par jour, contre moins de

⁶ Rapport sur les comptes spéciaux du Trésor (CST) 2023

Brahim Soudi et Khaoula Zahraoui. Rapport Chantier COSTEA_ réutilisation des eaux usées au Maroc 2022.

80 000 kg de DBO₅/jour avant la mise en place du Programme National d'Assainissement (PNA) en 2006.

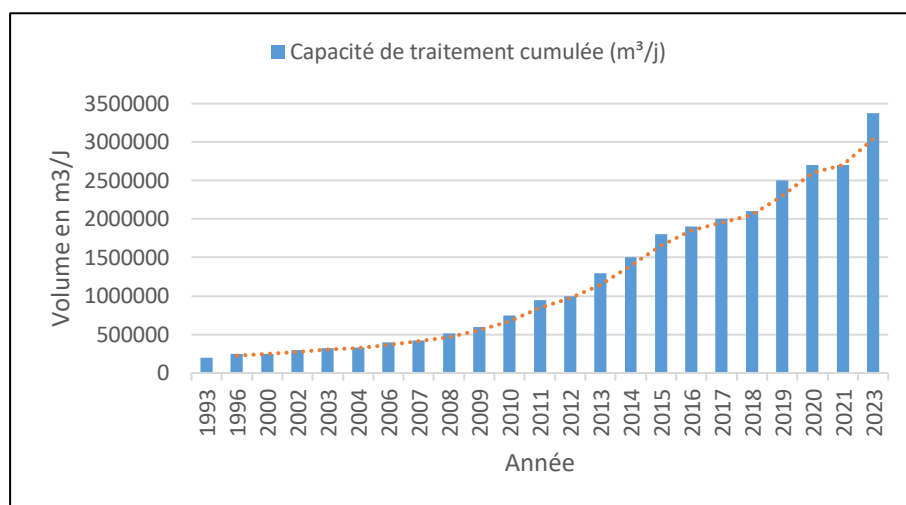


Figure 3 : Evolution de la capacité du traitement des STEP en m³/j

L'analyse des figure 3 et figure 4 révèle une progression notable des débits traités par les stations d'épuration ainsi que des quantités de pollution organique éliminées chaque jour. Des augmentations marquantes ont été observées aux années 2010, 2014 et 2021, qui coïncident avec la mise en service de grandes stations comme les STEP de Fès et Marrakech. Ces infrastructures ont contribué de manière significative à la capacité nationale de traitement et à l'amélioration de la qualité des eaux usées traitées.⁷

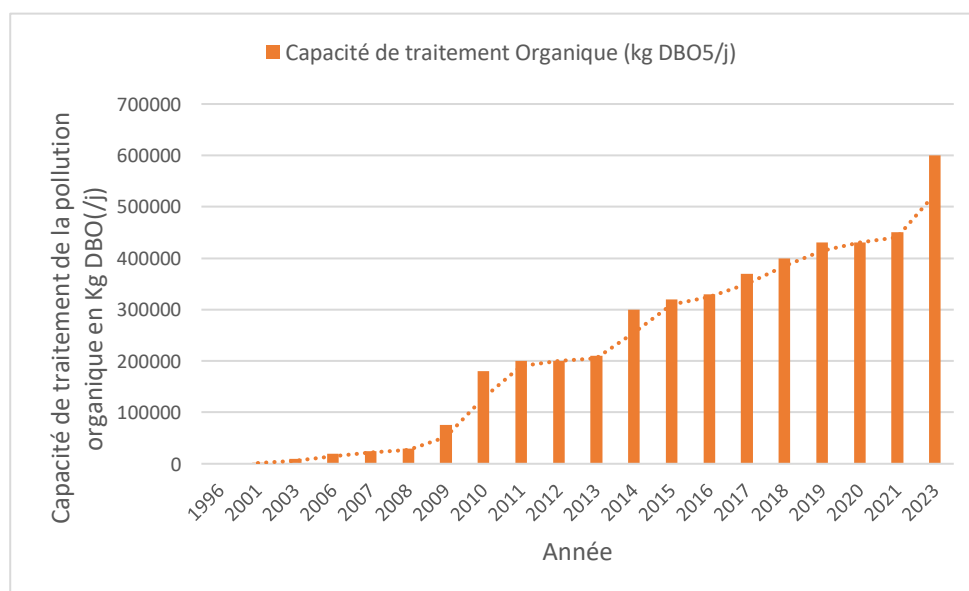


Figure 4: Evolution de capacité de traitement de la pollution organique des STEP en Kg DBO5/j

⁷ DRPL, DEA 2022/ Assistance technique pour l'évaluation des performances des stations d'épuration des eaux usées et des systèmes de réutilisation des eaux usées traitées au Maroc ; Groupement des sociétés SEM/ENTECH/EMM/SCP

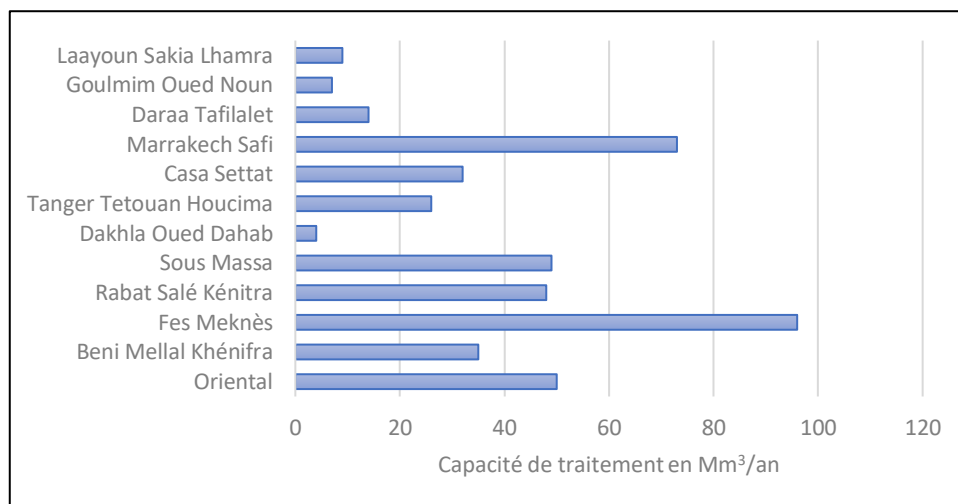


Figure 5: Répartition de la capacité de traitement du parc des STEP en Mm³ par région

Le volume d'eau traité par le parc des stations d'épuration, estimé à environ 443 Mm³/an, (sans émissaire) , est réparti de manière inégale entre les régions du Maroc (Figure 5). Cette répartition ne correspond pas nécessairement au nombre de stations, mais dépend plutôt de la capacité de traitement des stations existantes. Par exemple, la région de Fès-Meknès, qui se classe cinquième en nombre de stations, traite le plus grand volume d'eau avec 96 Mm³/an, suivie de la région de Marrakech-Safi avec 73 Mm³/an. Cela s'explique par la présence, dans ces deux régions, de stations de très grande capacité, notamment celle de Fès, qui traite 40 Mm³/an, et celle de Marrakech, avec un volume d'environ 50 Mm³/an.

1.3. Les dispositifs d'épuration

Le parc des stations d'épuration (STEP) au Maroc se caractérise par une grande diversité de procédés, classés en procédés intensifs et procédés extensifs. Parmi les 187 stations d'épuration recensées dans le pays, les procédés extensifs les plus courants sont principalement le lagunage avec 127 STEP, qui se décline en deux variantes : le lagunage naturel et le lagunage aéré, ainsi que les filtres plantés.

En ce qui concerne les procédés intensifs, les systèmes les plus répandus sont les boues activées avec 28 stations et les lits bactériens. On trouve également des stations qui se limitent à un prétraitement avec un émissaire en mer.

D'autres procédés existent, mais leur nombre reste très limité, tels que la filtration-percolation, les filtres imbriqués, l'UASB (réacteur anaérobie à flux ascendant) et le SBR (réacteur séquentiel discontinu).

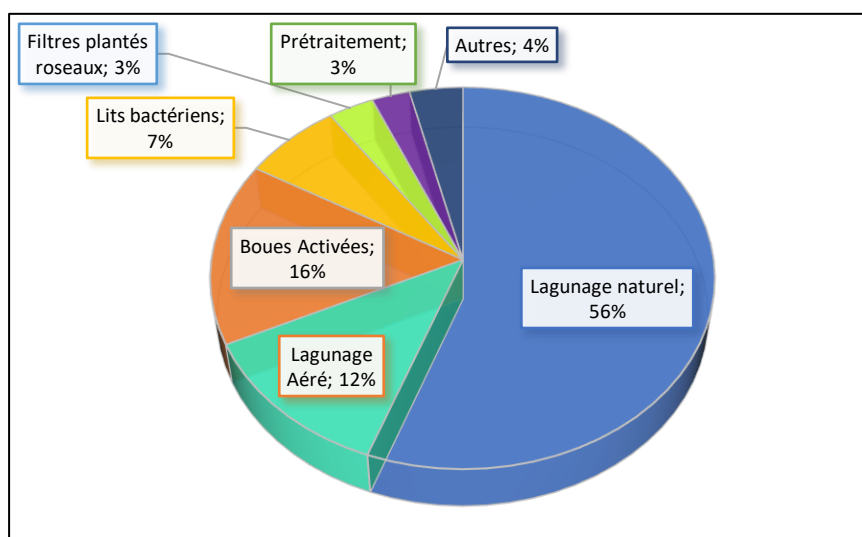


Figure 6: Répartition des STEP's par procédés (en nombre)

Comme montré dans la Figure 6, le Maroc dispose d'un grand nombre de systèmes de traitement extensifs, avec une dominance du lagunage naturel représentant environ 56% des stations d'épuration. Cependant, on observe l'émergence de systèmes intensifs dans le parc national, tel que les boues activées qui représente 16% du parc des STEP's, visant à améliorer la conformité aux normes et à atteindre les objectifs de réutilisation des eaux traitées. Le Maroc dispose désormais de plus de 28 stations exploitant le procédé boues activées, marquant une progression notable par rapport aux 18 stations enregistrées en 2020 et aux 8 réalisées en 2014.

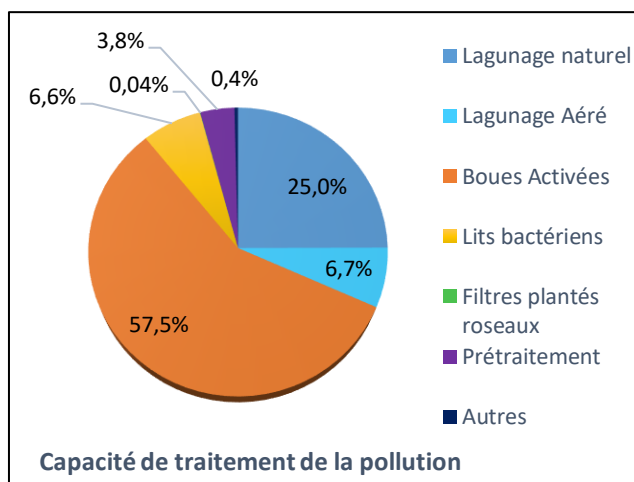


Figure 7: part de chaque procédé dans la capacité de traitement organique

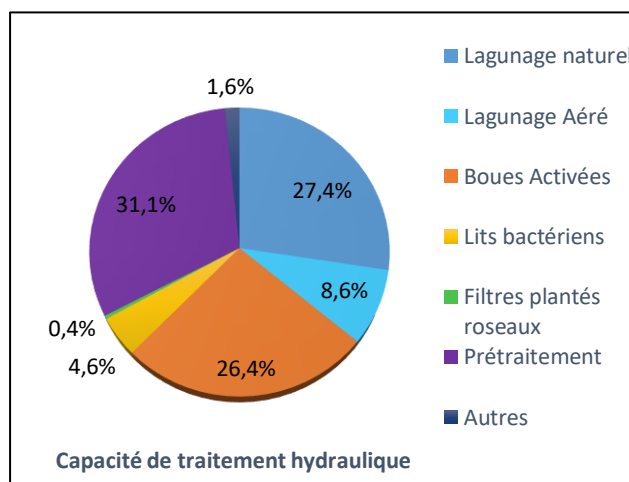


Figure 8 : part de chaque procédé dans la capacité hydraulique de traitement

Les figures 7 et figure 8 illustrent que, bien que le lagunage naturel soit prédominant en termes de nombre de stations, sa contribution à la capacité de traitement hydraulique est secondaire (27,4) par rapport aux prétraitements suivis des émissaires marins, qui représentent 31,1% de la capacité totale. Le procédé de traitement par boues activées est également très important, contribuant à 26,4% de la capacité hydraulique.

En matière de dépollution, les 28 stations utilisant le procédé boues activées représentent à elles seules 57.5% de la capacité de traitement organique, suivies par le système de lagunage naturel, qui en constitue 25% avec ses 104 stations.

Ainsi, on peut conclure que les procédés intensifs, tels que les boues activées et les lits bactériens, dominent le traitement organique avec une part de 64,1%, comparé aux procédés extensifs qui représentent 35,9%. Cela se traduit par une production plus importante de boues dans les procédés intensifs, en particulier dans le traitement par boues activées.

1.4. Les opérateurs de gestion du parc des STEP

Au Maroc, la gestion du parc STEP est assurée par divers opérateurs publics et privés. Les principaux acteurs sont :

Opérateurs Publics :

- L'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable (ONEE)
- Les Régies Autonomes
- Les communes

Opérateurs Privés :

- Lydec, Rédal, Amendis
- OCP

Autres

- Associations
- Promoteurs immobiliers (Al Omran)

En outre, dans le cadre de contrat de délégation, des entreprises spécialisées dans la gestion des STEP sont souvent sollicitées pour leur expertise technique et leur expérience en exploitation et maintenance, optimisant ainsi les performances des installations à travers une sous-délégation.

La figure 9 montre que l'ONEE joue un rôle central dans la gestion des infrastructures d'eau et d'assainissement à l'échelle nationale. En effet, 70% du parc des STEP est géré par l'ONEE, soit un total de 149 STEP. En second lieu, on trouve les régies et les communes. Les entités privées et l'OCP ne gèrent que 8% du parc. D'autres acteurs, tels que

des associations et des promoteurs immobiliers, participent également à la gestion des STEPs, bien que leur nombre soit restreint et ne dépasse pas les 1%.⁸

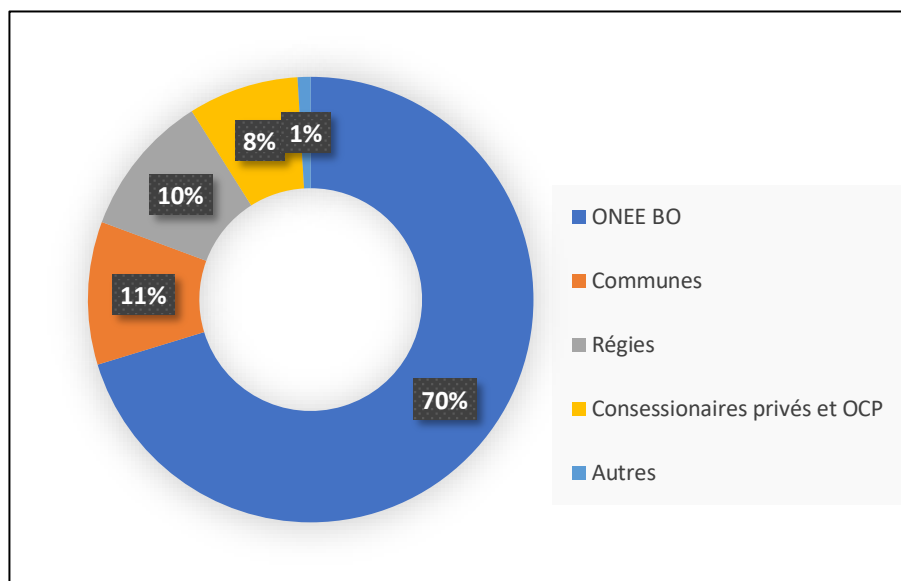


Figure 10 : Contribution de chaque opérateur à la gestion du parc des STEPs

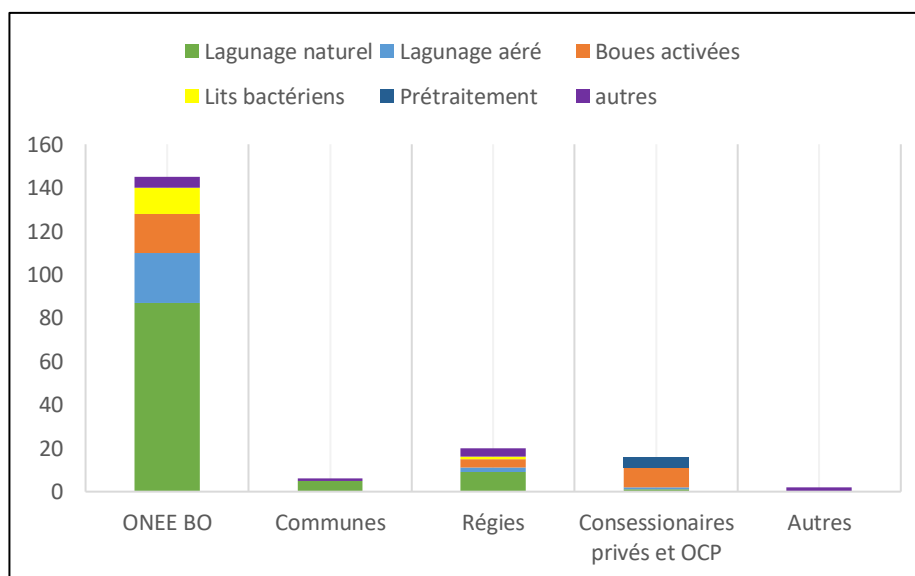


Figure 9 : Répartition des procédés d'épuration pour chaque opérateur

En termes de nombre, la majorité des procédés intensifs, connus pour générer d'importantes quantités de boues, sont principalement gérés par l'ONEE, (figure 10). Cependant, en termes de capacité, l'analyse croisée de la figure Figure 11 révèle qu'en dépit du grand nombre des STEPs de boues activées gérées par l'ONEE, il s'agit majoritairement de petites et moyennes installations. En réalité, ce sont les régions qui prennent en charge la gestion des grandes STEPs à boue activée, avec une capacité totale

⁸ Tableau de bord parc des STEPs nationales. DRPL/MI 2023 et Tableau des STEPs gérées par l'ONEE juin 2024

de 323 720 m³/j. Par conséquent, c'est à ce niveau que se pose le principal problème de gestion des boues d'épuration.

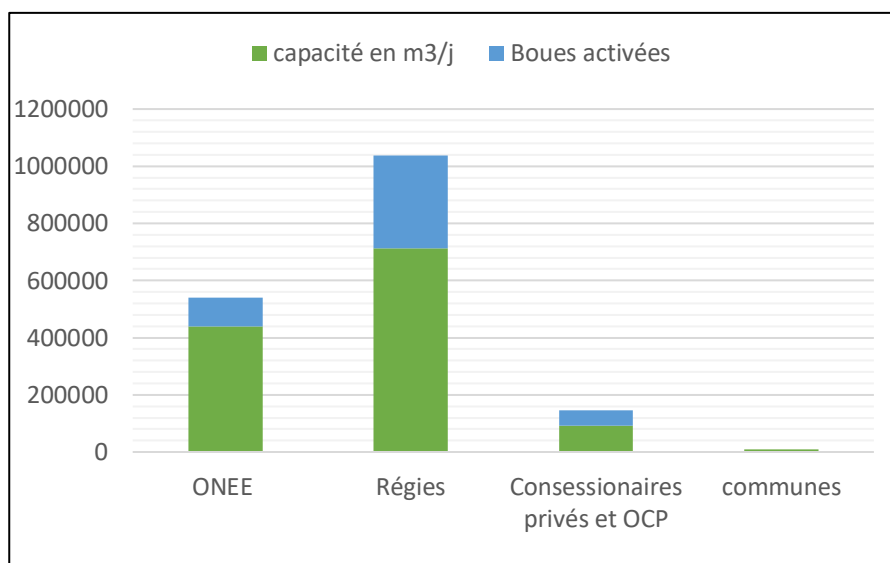


Figure 11: Capacité de traitement hydraulique de chaque opérateur avec un focus sur les stations boues activées

3. Les gisements de boues produits : caractérisation quantitative et qualitative

3.2. Hypothèses d'estimation

L'estimation du gisement des boues d'épuration repose sur des hypothèses clés qui permettent de déterminer la quantité de boues générée par les stations d'épuration. Les hypothèses principales sont :

- **Population connectée au réseau d'assainissement** : L'estimation est basée sur le nombre d'habitants desservis par les stations d'épuration. On considère souvent le taux de raccordement. Les taux prévus pour la période 2024-2030 sont de l'ordre de 83,5% et 90% respectivement⁹.
- **Taux de croissance démographique** : Il est nécessaire de prendre en compte les évolutions prévues de la population à moyen et long terme. Pour le calcul des gisements projetés à l'horizon 2030, le taux d'accroissement annuel est de 0,98%. Pour la période 2014-2030.¹⁰
- **Production d'eaux usées par habitant** : la production d'eaux usées est directement liée à la consommation d'eau potable, qui varie entre 80 et 120 l/hab/j

⁹ Mutualisation des programmes nationaux d'assainissement liquide (PNA et PNAR) et de réutilisation des eaux usées. DGCL/DEA 2018

¹⁰ Projections de la population des régions et des provinces 2014-2030. HCP

en moyenne ¹¹. Avec un taux de restitution à l'égout de 80 %, il est estimé que chaque habitant produit entre 64 et 96 litres d'eaux usées par jour.

- **Taux de production de boues par habitant :** Une estimation standard de la quantité de boues produite par habitant est effectuée en fonction du type de traitement utilisé dans la station d'épuration. Pour une station d'épuration utilisant un procédé intensif, la production de boues est généralement comprise entre 15 et 30 kg de matière sèche de boues par habitant et par an. En termes quotidiens, cela représente environ 40 à 80 gr MS/hab./j.

Dans le cas des procédés extensifs, le taux de production de boues par habitant est estimé entre 5 et 10 kg de matière sèche par habitant et par an. Cela correspond à environ 14 à 28 grammes de matière sèche par habitant et par jour.

Pour le Maroc, les ratios spécifiques de génération des boues sont de 60g MS/hab./j et 20g MS/hab./j respectivement pour le système intensif et le système extensif ^{12,13}.

3.3. Évolution des gisements des boues : gisements actuels et projection à l'horizon 2030.

En se basant sur les hypothèses de base mentionnées précédemment, une estimation de l'évolution du gisement des boues générées par l'ensemble des stations d'épuration (existantes et en cours de réalisation) a été établie pour la période 2024-2030.

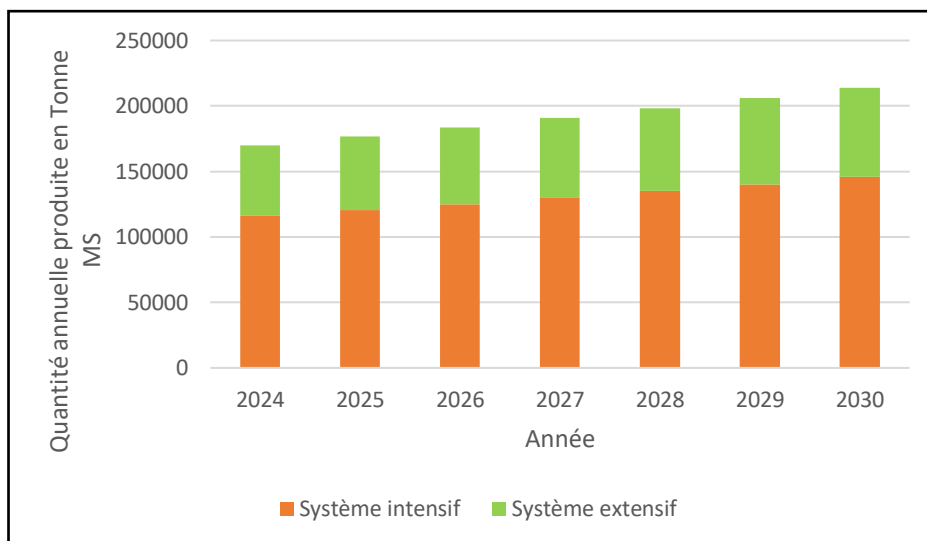


Figure 12: Evolution du gisement potentiel annuel des boues produite par le parc des STEP's réalisées et en cours

¹¹ ONEE-Branche Eau et PNA

¹² SOUDI Brahim 2015, Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances.

¹³ Boues issues des dispositifs d'épuration en milieu rural marocain : Traitement et valorisation agricole. Programme AGIR. GIZ, 2020

En 2024, la production annuelle de boues est estimée à environ 169 902 tonnes de matières sèches, soit 465 486 kg de matières sèches par jour. Le système intensif contribue à hauteur de 68 %, tandis que le système extensif représente 32 % de cette production. D'ici 2030, la quantité de boues générées par l'ensemble des stations d'épuration atteindra 213 744 tonnes par an, soit une production journalière de 585 599 kg de matières sèches.

En matière de gestion des stations d'épuration et des boues qui en résultent, les figures 13 et 14 montrent que les régies assurent la plus grande part de la production, représentant 52% du total, soit une quantité annuelle de boue de 241686 tonnes. L'ONEE contribue à hauteur de 41 %, avec une production quotidienne d'environ 192849 tonnes. Les concessionnaires privés, utilisant principalement des procédés intensifs, produisent annuellement 8 041 tonnes de MS. Quant aux autres opérateurs, notamment les communes, ils génèrent une quantité très réduite de boues, estimée à 2 992 tonnes de MS par an, provenant essentiellement de procédés extensifs.

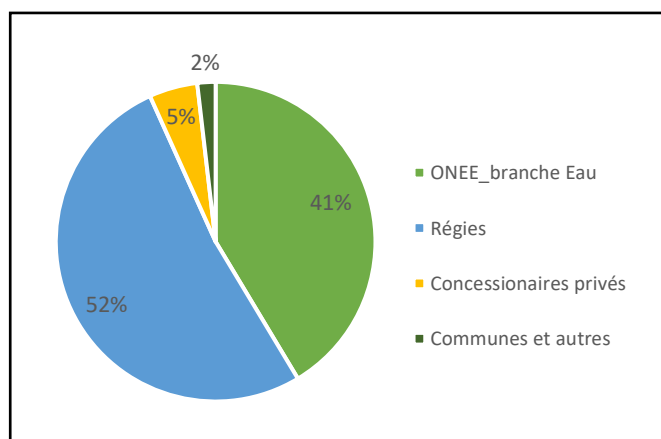


Figure 14 : Contribution de chaque opérateur à la production des boues.

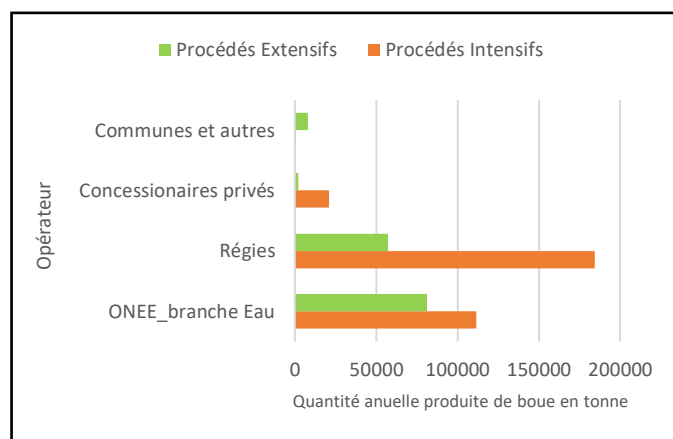


Figure 13 : Production des boues selon les différents opérateurs de gestion (2024)

3.4. Caractérisation qualitative des boues

La caractérisation des boues issues des stations d'épuration est cruciale pour évaluer leur composition, déterminer leur qualité et, par conséquent, juger de leur potentiel de valorisation ou de traitement. En effet, la nature de ces boues varie selon plusieurs facteurs, tels que l'origine des eaux usées, la saison, le type de traitement adopté au sein de la station, ainsi que les méthodes de conditionnement appliquées ¹⁴.

¹⁴ Singh, R., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste management*, 28, 347-358.

Encadré 1 : paramètre de caractérisation des boues selon le mode de valorisation

La valorisation verte (épandage agricole, réhabilitation des sols dégradés, etc.), par exemple, requiert une caractérisation complète pour évaluer leur valeur fertilisante, la détermination des teneurs en Eléments Traces Métalliques (ETM), en composés traces organiques (CTO) et en pathogènes.

Pour **la valorisation bioénergétique**, leur pouvoir méthanogène est un paramètre essentiel. Aussi, le Pouvoir Calorifique Inférieure (PCI), dépendant de l'humidité, constitue un critère important pour l'incinération ou la co-incinération avec les déchets d'ordures ménagères notamment en cimenteries.

La mise en décharge, option souvent controversée et recommandée comme option de dernier recours, requiert une siccité allant de 25 à 30%.

La consistance des boues dépend de leur taux de matière sèche. On distingue les niveaux de consistance suivant ¹⁵ :

- Les boues liquides : elles présentent une siccité de 0 à 10 %
- Les boues pâteuses : elles présentent une siccité de 10 à 25 %
- Les boues solides : elles présentent une siccité de 25 à 85 %
- Les boues sèches : elles présentent une siccité supérieure à 85 %
- Les boues chaulées : boues auxquelles on ajoute de la chaux pour stabiliser la matière organique et réduire les odeurs.
- Composte de boues : produit obtenu par le compostage des boues d'épuration, enrichi en matière organique

Le détail de la composition de ses types de boues est présenté dans le tableau 2.

Tableau 2: Type de boues et leur composition ¹⁶

Paramètre	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Composte de boue
Teneur en matière sèche (MS)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Teneur en matière organique	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Teneur en matière minérale	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6,5 à 7	7 à 8	6 à 8	9 à 12	6 à 7
Rapport C/N	4 à 5	5 à 6	4 à 6	8 à 11	15 à 25
Azote (kg N/T brute)	2 à 4	8 à 12	30 à 50	6 à 9	5 à 9
Phosphore (kg P2O5/T brute)	2 à 3	6 à 9	50 à 70	6 à 10	6 à 8
Potasse (kg K2O/T brute)	0,9	0,8	5	1	1 à 2

¹⁵ www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/

¹⁶ www.eau-loire-bretagne.fr/les_rendez-vous_de_leau/les_rencontres/Rencontres_2012/Boues-2_Syprea.pdf

Les boues d'épuration renferment une importante quantité de composés organiques et inorganiques, tels que des éléments fertilisants et des traces métalliques, ainsi que des agents pathogènes, notamment des microorganismes et des parasites. Toutefois, en dépit de la présence de composés toxiques liés aux activités reliées au réseau d'assainissement, la matière solide contenue dans ces résidus représente une source précieuse d'éléments naturels valorisables.¹⁷

Au Maroc, les boues de 19 STEPs ont été caractérisées et sont listées dans le tableau 3.

Tableau 3:Caractéristiques des STEPs concernées par les analyses de boues

N°	STEP	Capacité (m³/j)	Procédé d'épuration	Source
1	Ain Taoujdate	1500	Lagunage naturel	<i>Soudi et Hamdani, 2008, Gestion des boues des stations d'épuration au Maroc : Quantification, caractérisation et options de traitement et de valorisation, mémoire, Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II.</i>
2	Bouregreg	86	Boues activées + lagunage aéré	
3	Drarga	1180	Infiltration percolation	
4	Nador	26000	Boues activées	
5	Skhirat	6000	Lagunage naturel	
6	Tafoghalt	70	Lits bactériens	
7	Taourirt	6500	Lagunage naturel	
8	Grand Agadir	75 000	Infiltration percolation	
9	Marrakech	120 000	Boues activées	<i>Armelle Sfiligoi, 2010, Bilan sur les possibilités de la filière boue de la STEP de Marrakech, rapport de stage, Ecole nationale Supérieure Agronomique de Toulouse.</i>
10	Al Hoceima	9600	Boues activées	<i>Données communiquées par l'ONEE</i>
11	Berrechid	16000	Lagunage naturel	
12	Dar El Gueddari	650	Lagunage naturel	
13	M'rirt	2200	Lagunage naturel	
14	Outat El Haj	880	Lagunage naturel	
15	Rissani	1180	Lagunage naturel	
16	Tiznit	4900	Lagunage naturel	
17	Khouribga	18000	Boues activées	<i>AADRAOUI Mohamed, 2020 thèses de doctorat. Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation des boues de station d'épuration dans les matériaux de construction.</i>
18	Khénifra	10002	Lits bactériens	<i>Rachida AFAANE et al.2019. Valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Fès</i>
19	Fès	105000	Boues activées	

¹⁷ AADRAOUI Mohamed, thèse de doctorat. Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation des boues de station d'épuration dans les matériaux de construction

3.4.1. Les éléments traces métalliques (ETM)

Les éléments traces métalliques (ETM) – cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc, etc. sont des constituants indésirables des boues d'épuration urbaines. Comme certains d'entre eux sont potentiellement toxiques et ne présentent aucun intérêt agronomique, leur présence génère une certaine inquiétude, parfaitement compréhensible lorsqu'il est question d'épandre ces déchets sur des sols destinés à produire des aliments (CTP)¹⁸.

Il est également important de souligner que le pH du sol joue un rôle crucial dans la disponibilité des ETM et leur potentiel de toxicité, influençant ainsi l'impact de l'épandage sur la qualité des sols. En effet, un pH acide favorise la solubilité et accroît leur biodisponibilité, tandis qu'un pH basique a l'effet inverse et peut même, dans certains cas, provoquer une carence nutritive sur les plantes¹⁹.

Le tableau 4 présente la répartition des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) dans les boues issues des 19 stations d'épuration (STEPs) pour lesquelles nous avons des résultats d'analyses. Ces teneurs sont comparées aux valeurs seuils établies par les réglementations européennes, allemandes, françaises et tunisiennes. Ce tableau permet ainsi d'évaluer la conformité des boues par rapport aux normes internationales, en identifiant les concentrations de métaux lourds (zinc, cuivre, plomb, chrome, cadmium, mercure, nickel) présentes dans les différentes STEPs et en soulignant les éventuels dépassements des limites réglementaires.

La distribution des teneurs en ETM à travers les STEPs montre que les concentrations des boues sont inférieures aux seuils fixés par les réglementations européenne, allemande, française et tunisienne. Les boues de la STEP de Berrechid présentent toujours la valeur supérieure par rapport aux autres STEPs et affichent, notamment, une teneur en zinc de 2800 mg/kg qui dépasse le seuil fixé à 2000 mg/kg. Les résultats d'une seule analyse ne permettent pas toujours d'orienter les décisions d'où la nécessité de répéter les analyses pour suivre la qualité des boues.

Les valeurs élevées enregistrées dans la STEP de Berrechid s'expliquent par l'aspect industriel de la ville. La province de Berrechid dispose de deux grandes zones industrielles (la zone industrielle de Berrechid et la zone industrielle de Sahel), en plus de quelques autres agglomérations industrielles éparpillées à travers les communes. Plusieurs études ont été menées sur la caractérisation des eaux usées de la zone de Berrechid et ont montré qu'elles présentent des charges polluantes très élevées.

¹⁸ Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration, 2000. *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture. Dossier documentaire*. ADEME Éditions, Angers, 58 p. + fiches.

¹⁹ Giroux et al. *Les éléments traces métalliques (ETM), leur accumulation dans les sols agricoles du Québec*. IRDA 2008

Les teneurs en chrome dans les boues restent faibles et se situent en dessous du seuil réglementaire fixé à 900 mg/kg. La concentration maximale, atteignant environ 321 mg/kg de matière sèche (MS), a été observée dans les boues de la STEP de Marrakech, ce qui peut être attribué à la présence de tanneries utilisant du chrome. À l'inverse, la concentration minimale en chrome a été mesurée à la STEP de Fès, où une station de déchromatation a été installée en amont de la station d'épuration.

Tableau 4: Concentration en éléments traces métalliques des boues au Maroc (mg/kg)

		Zinc	Cuivre	Plomb	Chrome	Cadmium	Mercure	Nickel
Les normes internationales	Portugal (2013)	2500	1000	750	1000	20	16	300
	UE (2013) ²⁰	2500-4000	1000-1750	750-1200	1000-1750	20-40	16-25	300-400
	France ²¹ (2009)	3000	1000	800	1000	10	10	200
	Tunisie (1999)	2000	1000	800	500	20	10	200
	Allemagne (2013) ²²	2500	800	900	900	10	8	200
Les STEPs du Maroc	Dar El Gaddari	516,67	309	77,5	39	0,6	4,62	24,5
	El Hoceima	-	122	45,2	18,7	0,675	1,05	18,4
	Bouregreg	-	93,7	21,4	10,9	0,45	0,36	7,51
	Nador	624	127,4	81,4	25,4	0,82	1,844	27,6
	Mriret	520	64	120	16	0,94	4,8	17
	Outat lhaj	980	130	100	22	0,77	2,3	14
	Tiznit	1400	370	280	34	2,1	4,6	-
	Rissani	440	130	110	30	1,5	-	0
	Berrechid	2800	410	380	86	2,9	-	46
	Agadir	867,1	144,4	235,5	39,9	1,6	-	17,2
	Skhirate	856,5	235,7	129,1	46,9	1,96	-	19,2
	Drarga	993,3	257,5	120,1	49,4	1,5	-	21,5
	Ain Taoujdat	803,8	232,9	82,1	60,9	0,9	-	21,4
	Tafoghalte	1111,5	245,8	111,8	52,8	1,2	-	23,8
	Taurirt	1342	260,04	90,8	36,3	1,1	-	20,7
	Marrakech	684,46	177,80	176,84	321,1	2,04	2,05	24,61
	Fes	377	148	34	9	0,01	-	35
	Khouribga	1289	158,7	76,53	27,76	3,03	-	17,64
	Khénifra	1218	168,5	61,59	31,68	4,24	-	15,82

²⁰ Règlement n° 219/2009 du Parlement européen et du Conseil du 11 mars 2009

²¹ ADEM

²² Mininni G. et Dentel S., 2013, Highlights of current legislation on sludge and bio-waste in EU member states and in the United States, Conférence Internationale « Gestion innovante des boues d'épuration à l'échelle européenne », Charleroi Espace Meeting Européen, 22 octobre 2013.

Les concentrations moyennes de métaux lourds observées sont nettement inférieures aux seuils fixés par la réglementation. Cependant, des apports répétés de boues par épandage pourraient, à long terme, entraîner une accumulation de ces éléments dans les sols récepteurs, atteignant des niveaux potentiellement toxiques pour les plantes (phytotoxicité) et présentant un risque d'incorporation dans les chaînes alimentaires. C'est pour cette raison que la réglementation européenne, notamment la Directive du 12 juin 1986, impose une dose maximale d'épandage de 30 tonnes par hectare sur une période de 10 ans. De plus, cette directive fixe des limites pour les quantités annuelles de métaux lourds pouvant être introduites dans les sols, en prenant une moyenne sur 10 ans²³.

3.4.2. Les composés traces organiques (CTO)

Les composés traces organiques (CTO) dans les boues d'épuration incluent une variété de substances chimiques présentes en faibles concentrations mais qui peuvent avoir un impact environnemental important. Ces composés proviennent principalement des activités industrielles et domestiques, et leur présence dans les boues d'épuration reflète la diversité des substances rejetées dans les réseaux d'assainissement. Les principaux (CTO) présents dans les boues d'épuration comprennent ²⁴:

- **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs)** : Ces composés proviennent principalement de la combustion incomplète des matières organiques, des carburants fossiles, et des activités industrielles.
- **Polychlorobiphényles (PCB)** : Utilisés dans le passé comme isolants électriques et dans d'autres applications industrielles,
- **Composés pharmaceutiques et produits de soins personnels (PPCPs)** : médicaments, antibiotiques, hormones, et produits de soins tels que shampoings ou cosmétiques peuvent être détectés dans les boues.
- **Phtalates et Bisphénol A (BPA)** : Utilisés dans les plastiques et divers produits de consommation.

Ces composés soulignent les risques potentiels liés à la valorisation des boues d'épuration et la nécessité de réguler leurs concentrations avant leur utilisation en agriculture.

Parmi les 19 stations d'épuration (STEPs) étudiées, seules cinq ont procédé à l'analyse des composés traces organiques (CTO). Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau 5.

²³ Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances. SOUDI Brahim 2015.

²⁴ EPA Environmental Protection Agency ; United States ; Report on the Elemental Analyses of Samples from the Targeted National Sewage Sludge Survey. Avril 2021

Tableau 5: La teneur des boues en composés traces organiques (µg/Kg MS)

Paramètre	Dar El Gueddari	Berrechid	Nador	Outat Lhaj	Marrakech
Total des 7 principaux PCB	<14	-	0	0	< 0.1848
Fluoranthène	3	<0.01	<0.01	0	0,2789
Banzo(a)antheracène	3,66	297,14	<0.01	12,91	
Benzo(b) fluoranthène	4,33	172,27	<0.01	0	0,0789
Benzo(a)pyrène	3,66	37,82	<0.01	0	0,08935

N.B. Selon les normes de l'UE²⁵, les teneurs limites en composés organiques dans les boues sont : 6 mg/kg pour les HPAs et 0,8 mg/kg pour les PCBs.

Les résultats des analyses révèlent que les boues des stations d'épuration présentent des concentrations très faibles en composés traces organiques, restant largement inférieures aux seuils réglementaires proposés par la norme européenne. Parmi les stations étudiées, les boues de la STEP de Berrechid se distinguent par des valeurs plus élevées par rapport aux autres stations, bien que ces concentrations restent dans des limites acceptables. Cette observation souligne une variation possible dans les compositions des boues en fonction des spécificités locales ou des types de traitement utilisés dans chaque station.

3.4.3. Les pathogènes

Les boues d'épuration renferment divers agents pathogènes pouvant présenter des risques pour la santé publique et l'environnement si elles ne sont pas traitées de manière adéquate. Parmi ces pathogènes, on retrouve des bactéries, des virus, des parasites, et des champignons, principalement issus des eaux usées domestiques et industrielles. La présence de ces micro-organismes est un facteur important à prendre en compte, particulièrement si les boues sont destinées à des applications agricoles.

L'évaluation du niveau de contamination en œufs d'helminthes, est essentielle avant toute valorisation des boues dans l'agriculture. Le tableau 6 présente la concentration en œufs d'helminthes observée dans les boues de 9 stations d'épuration, ce qui permet d'apprécier leur nocivité vis-à-vis des sols agricoles et des cultures qui pourraient en être amendées.

²⁵ environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/sewage-sludge_en

Tableau 6 : Le nombre des œufs d'helminthes dans les boues résiduaires de neuf STEP

STEP	Type de traitement des boues	Etat des boues (liquide, solide, pâteuse)	Total d'œufs d'Helminthes (Nombre d'œuf /L ou /100g de MS)
Dar El Gaddari	Déshydratation	Solide	328
El Hoceima	Epaississement et déshydratation avec polymérisation et chaulage	Solide	1 565
Bouregreg	Séchage naturel	Solide	47
Nador	Epaississement (floculation)	Solide	143,8
Mriret	Séchage naturel	Solide	176
Outat Ihaj	Séchage naturel	Solide	68
Tiznit	Séchage naturel	Solide	64
Rissani	Séchage naturel	Solide	460
Marrakech	Digestion anaérobie	Solide	43

Les résultats des analyses effectuées sur neuf stations d'épuration (STEP) ont mis en évidence des concentrations d'œufs d'helminthes très variables dans les boues produites. Ces concentrations dépassent largement le seuil réglementaire établi par la norme française, fixée à 3 œufs pour 10 g de matière sèche (MS). La concentration la plus élevée a été relevée à la STEP d'El Hoceima, avec 1565 œufs pour 100 g de MS, tandis que la plus faible a été enregistrée à la STEP de Marrakech, avec 43 œufs pour 100 g de MS

Afin de minimiser ces risques, différents traitements peuvent être appliqués aux boues. En effet, les boues ayant subi un séchage prolongé sur lits de séchage, sous les conditions climatiques marocaines, ainsi que celles traitées par des procédés d'hygiénisation permettent une élimination totale des agents pathogènes identifiés²⁶. Aussi, le traitement des boues par chaulage et spécifiquement avec de la chaux vive permet l'élévation du pH jusqu'à 12 empêchant la survie des micro-organismes et des pathogènes. Ce traitement permet aussi d'augmenter la siccité des boues (30%) suite à la réaction de la chaux vive de manière exothermique au contact de l'eau contenue dans les boues²⁷. Le traitement thermique à son tour a un pouvoir hygiénisant remarquable. Ces méthodes assurent ainsi la sécurité des boues avant leur valorisation, notamment en agriculture.

3.4.4. Les paramètres agronomiques

Les paramètres agronomiques sont essentiels pour caractériser les boues d'épuration et évaluer leur potentiel en tant qu'amendement organique pour les sols. Ils se concentrent

²⁶ Alexandre Dudkowski. L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. INRA-ME&S (<http://www7.inra.fr/dpenv/lesboues.htm>)

²⁷ Sodimate.fr/applications/traitement-des-boues-depuration-et-deau-potable/

principalement sur les éléments nutritifs tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le calcium (Ca). Ils incluent également la teneur en matière organique (MO), qui est essentielle pour corriger le déficit hydrique des sols. En effet, la matière organique améliore la capacité de rétention d'eau et contribue à l'amélioration de la structure du sol.

La teneur en éléments fertilisants des boues dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de traitement des eaux usées, l'origine des eaux usées (domestiques ou industrielles), les conditions d'exploitation des stations d'épuration, et la nature des matières premières traitées. Ces éléments influencent la composition chimique des boues et leur concentration en nutriments. Le tableau 7 présente les teneurs en éléments fertilisants dans les boues selon le procédé d'épuration.

Tableau 7: teneurs en éléments fertilisants dans les boues selon le procédé d'épuration²⁸.

Type de traitement	Azote (N)	Phosphore (P)	Potassium (K)	Remarques
Boues Activées	2% à 6%	1.5% à 5%	0.1% à 0.5%	Issues de systèmes à boues activées, généralement riches en azote et en phosphore.
Boues Anaérobies	3% à 7%	2% à 3%	0.2% à 0.7%	Contiennent souvent plus d'azote en raison de la libération d'azote des composés organiques.
Boues de Lagunage	1% à 4%	0.5% à 2%	0.1% à 0.4%	Moins concentrées en nutriments en raison de la dilution et de l'assimilation par les plantes aquatiques et les algues.

Les valeurs de la teneur en éléments fertilisants des boues provenant des stations d'épuration (STEP) étudiées sont présentées dans le tableau 8.

²⁸ Jemali A. Soudi B. & Berdai H, Valorisation agricole des boues résiduaires : Valeur fertilisante et leur Impact sur les sols. Proceeding of 13th International Congress on Agricultural Engineering. Vol I: Land and Water Use. Rabat, Maroc, 1998.

Tableau 8: La distribution des teneurs des boues en éléments fertilisants

STEP	Procédés d'épuration	Type traitement des boues	La teneur des boues en élément fertilisant (mg/kg MS)				
			Azote total	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Dar El Gaddari	Lagunage	Lits de séchage	5080	4500,00	3 690,00	77 100,00	11 700,00
Marrakech	Boues activées	Stockage des boues digérées, Déshydratation, Valorisation du biogaz	10350	7630,00	1 246,86	41 135,36	7 270,77
El Hoceima	Boues activées	Lits de séchage	16300	38472,00	4 891,08	58 494,92	10 943,46
Bouregreg	Lagunage	Lits de séchage	38100	4518,00	545,40	9 756,00	165,40
Nador	Boues activées	Lits de séchage	8556,39	46074,80	8 411,22	77 153,59	19 073,68
Outat Ihaj	Lagunage	Lits de séchage	9 040,00	23129,00	2 180,51	139 800,06	15 486,65
Tiznit	Lagunage	Lits de séchage		21503,10	2 337,12	110 132,78	-
Rissani	Lagunage	Lits de séchage	2161	81,30	-	-	-
Berrechid	Lagunage	Lits de séchage	60,30	35724,00	6 228,30	24 539,88	
Agadir	Infiltration percolation	Lits de séchage	27800	29994,42	10 966,38	105 945,78	17 247,56
Skhirate	Boues activées	Lits de séchage	26400	19492,48	8 848,52	120 120,30	14 519,98
Drarga	Infiltration percolation	Lits de séchage	26600	25487,70	7 664,30	106 998,12	15 160,01
Ain Taoujdat	Lagunage	Lits de séchage	27700	14736,15	12 289,14	104 127,95	9 296,97
Tafoghalte	Lagunage	Lits de séchage	20900	34013,37	7 848,62	85 034,54	11 177,25
Taurirt	Lagunage	Lits de séchage	24100	43248,94	2 937,06	45 320,97	8 590,62
Fes	Boues activées	Stockage des boues digérées, Déshydratation, Valorisation du biogaz	20250	14928,00	1542	-	-
Valeur moyenne			19561	24230	5529	78976	12895

La variabilité des teneurs en éléments fertilisants s'explique par la nature des eaux usées et les procédés de traitement appliqués aux boues (stabilisation biologique, chimique, conditionnement, déshydratation, etc.)²⁹. Selon les résultats des analyses et les données disponibles dans la littérature (Soudi³⁰, 2003 ; Dudkowski³¹, 2000 ; Syprea³², 2012), une tonne de boues sèches contient en moyenne 17 kg d'azote (N), 23 kg de P₂O₅ et 5 kg de

²⁹ GRIMAUD L. (1996). La valorisation des boues de station d'épuration en agriculture. Mém. D.U. "Eau et Environnement", D.E.P., univ. Picardie, Amiens, 44 p.

³⁰ Manuel d'utilisation des boues résiduelles issues des stations d'épuration des eaux usées : Etat de l'art et tentatives d'adaptation aux pays de Proche Orient, Bureau Régional pour le Proche-Orient, FAO.

³¹ Alexandre Dudkowski, 2000, L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines, INRAME&S.

³² SYPREA, 2012, Intérêt agronomique des boues et débouchés en agriculture, Les rencontres de l'eau en Loire-Bretagne Clermont-Ferrand 21 juin 2012.

K_2O . L'azote et le phosphore, sous forme organique, se minéralisent facilement, devenant des formes minérales assimilables durant les deux premières années suivant l'épandage. De plus, les conditions climatiques chaudes de nos régions accélèrent ce processus de minéralisation.

Le tableau 9 révèle que la teneur en matière organique des boues est en moyenne de 50% de la matière sèche, ce qui en fait un gisement précieux pour l'amendement organique des sols agricoles, particulièrement dans un contexte de carence en MO des sols, comme c'est le cas au Maroc.

Tableau 9: Teneur des boues en matière organique (en % de Matière sèche) dans les boues des STEP's au Maroc

STEP	Teneur en MO (En % de MS)
Marrakech	52,7
Bouregreg	56,7
M'rirt	56,17
Tiznit	77,78
Agadir	62,05
Skhirat	50,82
Drarga	55,3
Ain Taoujdat	66,44
Tafoghalte	47,43
Fes	52,21
Kouribga	42,35
Khénifra	,45
Taourirt	55,02
Moyenne	46,42

3.5. Valeur fertilisante des boues

Comme il a été mentionné auparavant, l'apport de boues constitue une source très appréciable d'éléments fertilisants et particulièrement azotés et phosphatés. Comme il sera constaté ultérieurement, les teneurs en azote varient en fonction du type de boues : les boues liquides sont généralement plus riches en cet élément que les boues séchées et/ou compostées. Le tableau 10 montre des ordres de grandeur de la composition des boues en éléments nutritifs majeurs.

Tableau 10: Concentrations moyennes en éléments majeurs (N, P₂O₅ et K₂O) dans les boues résiduaires (valeurs moyennes d'après plusieurs références)

Type de boue	Humidité (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Boue brute séchée à l'air	5 - 40	1.0	0.6 - 0.8	0.2 - 0.4
Boue ayant subi une digestion anaérobie et séchée à l'air	5 - 30	1.1	1.0 - 1.2	0.1 - 0.2
Boue liquide ayant subi une digestion anaérobie	95	0.25	0.5 - 0.7	0.01 - 0.02

3.5.1. L'azote

La valeur fertilisante azotée des boues résiduaires, par rapport à un engrais minéral, pour l'année de l'épandage, varie en fonction de plusieurs facteurs. Ces derniers sont : la nature des boues, les conditions climatiques et culturales, la fraction d'azote organique facilement minéralisable et leur teneur initiale en azote minéral. Le taux annuel de minéralisation des principaux types de boues est rapporté dans le tableau 11.

Tableau 11 : Taux de minéralisation de l'azote durant la première année d'épandage

Type de boues	Taux de minéralisation annuel de l'azote	Référence
Boue liquide	40 à 60 %	ADEME (2001)
Boue pâteuse	30 à 35 %	ADEME (2001)
Boue sèche	25 à 40 % 40 à 60 %	ADEME (2001) Soudi et Jemali (1998)
Boue chaulée	30 à 40 %	ADEME (2001)
Boue compostée	10 %	ADEME (2001)

Encadré 2 : Valeur fertilisante azotée (VFN) des boues résiduaires (Soudi et Bazza, 2006)

$VFN = N_{org} (\text{boues en } \%) \times TMa + N \text{ minéral}$ TMa : Taux de Minéralisation annuel (%).

Des ordres de grandeur de TMa sont rapportés

Année 1. $VFN = N_{org} (\%) \times 40 \% + N \text{ minéral total}$

Année 2. $VFN = N_{org} (\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Année 3. $VFN = N_{org} (\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la deuxième année} + 5\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Années 4 et 5. $VFN = N_{org} (\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la troisième année} + 3\% \text{ de } N_{org} \text{ appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

La fraction d'azote organique minéralisable et donc biodisponible durant la première année qui suit l'incorporation des boues dans le sol est estimée pour les différents types de boues comme le montre le tableau 12.³³

Tableau 12 : Fraction estimée (en %) d'azote susceptible d'être disponible pour la culture après différents temps d'application et pour différents types de boues

Période après application (années)	Boue stabilisée à la chaux	Boue de digestion aérobie	Boue de digestion anaérobie	Boue compostée
0 - 1	30	30	20	10
1 - 2	15	15	10	5
2 - 3	7	8	5	3

3.5.2. Le phosphore

La concentration en phosphates dans les boues tend à augmenter en raison du développement et de la diversification de l'usage des détergents synthétiques, riches en phosphates. Comme mentionné précédemment, la concentration en phosphore varie selon le type de boue et la composition des eaux usées brutes. Contrairement à l'azote, le phosphore se trouve majoritairement sous forme minérale dans les boues (70 à 90 % du phosphore total).

Si la teneur en azote des boues est 1 à 1,5 fois supérieure à celle du phosphore, la teneur en azote requise des plantes cultivées est presque 10 fois celle du phosphore. Ainsi, si la dose de boues appliquée est déterminée en fonction des besoins en azote, la quantité de phosphore apportée peut être excessive par rapport aux besoins des cultures courantes.

Encadré 3 : Valeur fertilisante du phosphore assimilable apportée par les boues résiduaires

La quantité de phosphore assimilable apportée par les boues (kg/ha) est estimée en adoptant un taux de 50 % du phosphore total présent dans la boue.

$P_{\text{assimilable}} = \text{Dose de boue} \times \text{Teneur en P} \times \text{Taux de P assimilable} \times \text{Facteur de conversion}$

Où :

- **Dose de boue** : la quantité de boue d'épuration appliquée par hectare en (kg/ha)
- **Teneur en P** : la concentration en phosphore dans les boues en (g/kgMS)
- **Taux de P assimilable** : la fraction de phosphore total considéré comme assimilable par les plantes (généralement estimé à 50 %).
- **Facteur de conversion** : utilisé pour convertir le phosphore (P) en unités fertilisantes conventionnelles exprimées en P_2O_5 . Ce facteur est égal à 2,29

³³ Evanylo, G. K. (1999). Agricultural land application of biosolids in Virginia: Managing biosolids for agricultural use. Virginia Cooperative Extension.

3.5.3. Le Potassium

Les concentrations en potassium sont généralement faibles en raison des pertes dans les effluents liquides. On considère généralement que 90 % du potassium présent dans les boues est disponible la première année d'épandage. Un facteur multiplicatif de 1,2 est utilisé pour convertir le potassium (K) en unités fertilisantes conventionnelles (K_2O).

Encadré 4 : Valeur fertilisante du Potassium apportée par les boues résiduaires

La quantité du potassium apportée par les boues (kg/ha) est estimée en adoptant un taux de 90 % du potassium total présent dans la boue.

$K \text{ disponible} = \text{Dose de boue} \times \text{Teneur en K} \times \text{Taux de K disponible} \times \text{Facteur de conversion}$

Où :

- **Dose de boue** : la quantité de boue d'épuration appliquée par hectare en (kg/ha)
- **Teneur en K** : la concentration en potassium dans les boues en (g/kgMS)
- **Taux de K disponible** : la fraction de potassium considéré comme disponible pour les plantes (généralement estimée à 90 %).
- **Facteur de conversion** : utilisé pour convertir le potassium (K) en K_2O . Ce facteur est généralement de 1,2

3.5.4. Évaluation du gisement de matière organique et d'éléments fertilisant contenus dans les boues

L'évaluation des tonnages en matière organique et en éléments nutritifs contenus dans les boues est une étape cruciale pour déterminer le potentiel de valorisation agricole des boues d'épuration. Cela consiste à quantifier les ressources disponibles en matière organique ainsi qu'en éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium, etc.) et à évaluer leur contribution à l'enrichissement des sols.

Encadré 5 : Calcul des tonnages en éléments fertilisants majeurs potentiellement apportés

Le calcul des gisements de matière organique (MO) et d'éléments nutritifs vise à déterminer la quantité de l'élément étudié à partir de la production totale de boues et de sa teneur dans celles-ci, selon l'équation suivante :

$$Q_i = Q_{Btj} \times T_i$$

Avec

- Q_i = la quantité disponible en élément i
- Q_{Btj} = la production totale des boues dans l'année j ;
- T_i = La teneur en éléments i dans les boues

À partir du gisement des boues produites par les stations d'épuration (STEP), les quantités potentielles d'éléments nutritifs ont été estimées en calculant les tonnages d'azote, de phosphore et de potassium transportés par ces boues, selon un scénario de potentiel fertilisant minimal et maximal (voir figure 15). D'ici 2030, il est prévu que les boues produisent en moyenne **7 535 tonnes d'azote**, **5 590 tonnes de phosphore** et **608 tonnes de potassium**, offrant ainsi un apport significatif pour l'enrichissement des sols.

La conversion des quantités de nutriments contenues dans les boues d'épuration en valeur fertilisante Azotée, en phosphate assimilable (P_2O_5) et en potassium assimilable (K_2O) indique qu'un apport de 1 000 kg de boues par hectare fournit, durant la première année, environ 18,3 kg d'azote assimilable, 30 kg de phosphate assimilable (P_2O_5) et 3 kg de potassium assimilable (K_2O). Ainsi, le gisement total de boues d'épuration prévu pour 2030 pourrait générer jusqu'à **3 915 tonnes d'azote**, **6 419 tonnes de phosphate** (P_2O_5) et **642 tonnes de potassium** (K_2O), sans oublier l'apport en matière organique.

D'ici 2030, le gisement de matière organique atteindra environ **106976 tonnes**. Ce gisement permettrait, selon les normes de besoins estimées à 30 tonnes par hectare³⁴, d'amender près de 3566 hectares, soit une portion relativement faible de la surface agricole utile totale, qui est d'environ **9 millions d'hectares**. Il en découle que la valorisation agricole est une filière de choix capable, à long terme, de résorber efficacement l'intégralité des boues produites.

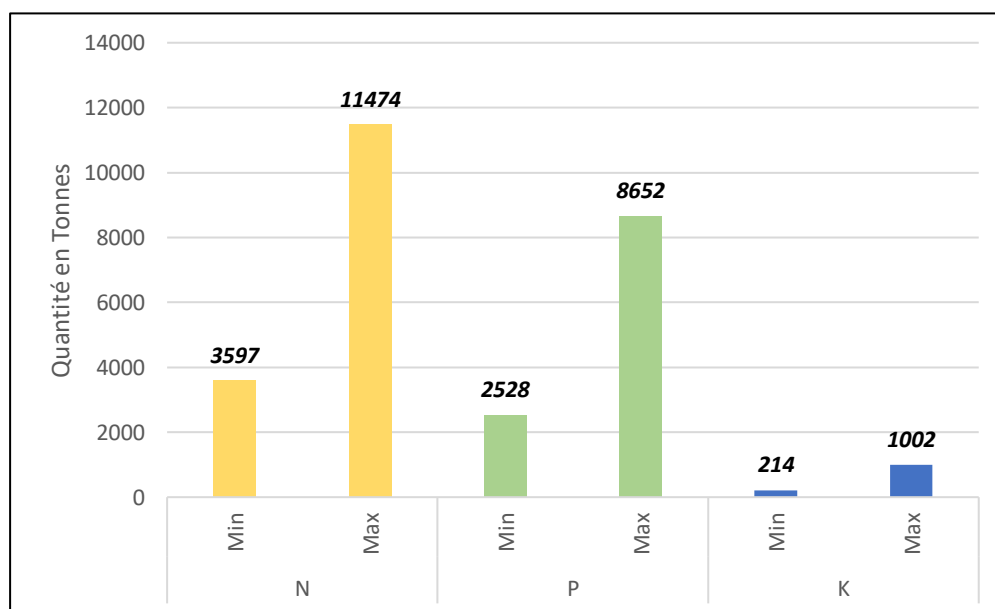


Figure 15 Tonnages en éléments fertilisants majeurs potentiellement apportés par les boues à l'horizon 2030 au Maroc.

³⁴ FAO SOILS BULLETIN 80. The importance of soil organic matter Key to drought-resistant soil and sustained food production

En s'appuyant sur les prix moyens des unités fertilisantes d'azote (N), de phosphate (P2O5) et de potassium (K2O) disponibles sur le marché, le gain économique lié à la valorisation des boues en tant qu'amendement fertilisant est estimé à un montant de **102 millions** de dirhams.

Il est important de noter que les boues d'épuration transportent également d'autres nutriments, qui ne sont pas toujours pris en compte dans les analyses habituelles. Parmi ceux-ci figurent le calcium, le magnésium, ainsi que divers oligo-éléments, qui jouent tous un rôle essentiel dans la nutrition des plantes. Ces éléments supplémentaires contribuent à enrichir le sol, favorisant ainsi la santé des cultures et augmentant les rendements agricoles.

Encadré 6

L'utilisation des boues d'épuration comme amendement organique en agriculture offre un potentiel économique considérable, en permettant de réduire les coûts des engrais, grâce à la présence de nutriments essentiels tels que l'azote et le phosphore. Cette valorisation des déchets permet également de diminuer la dépendance aux engrais chimiques, dont la production est énergivore et génère des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Par ailleurs, la mise en décharge des boues peut engendrer des émissions de méthane et de dioxyde de carbone en raison de la décomposition anaérobie des matières organiques, soulignant ainsi l'importance d'une gestion appropriée. L'enrichissement des sols en matière organique favorise également le stockage du carbone et améliore la santé des sols, renforçant ainsi la résilience des cultures face aux conditions environnementales difficiles.

Toutefois, une gestion adéquate de l'application des boues est cruciale pour éviter tout impact environnemental négatif, ce qui nécessite le respect de normes de qualité rigoureuses. En résumé, l'intégration des boues d'épuration dans l'agriculture pourrait jouer un rôle central dans l'économie circulaire tout en participant à la lutte contre le changement climatique.

4. Situation actuelle de la gestion des boues

4.1. Destinations actuelles et initiatives entreprises en matière de traitement et de valorisation des boues

Avec les avancées dans le domaine de l'assainissement, notamment l'expansion des stations d'épuration à travers le Maroc, la gestion des boues est devenue un enjeu majeur. L'augmentation du nombre de STEP s'est entraînée une forte hausse de la production de boues résiduaires, un sous-produit inévitable du traitement des eaux usées. Ces boues nécessitent une gestion efficace pour limiter leurs impacts environnementaux et sanitaires. À leur sortie des stations d'épuration, elles sont particulièrement liquides, ce qui en accroît considérablement le volume. Il est donc crucial de les stabiliser afin de réduire leur charge pathogène et leur potentiel de nuisance olfactive ³⁵.

L'histoire de la gestion des boues au Maroc a connu une évolution progressive, passant d'une absence quasi totale de prise en charge au cours des premières décennies à l'adoption de technologies modernes dans le cadre des programmes nationaux d'assainissement. La revue stratégique du Programme National d'Assainissement (PNA) en 2006 a fortement préconisé d'inclure la gestion des boues dès la phase de planification des projets de collecte et d'épuration. De plus, la nouvelle version de la loi sur l'eau (n° 36-15) a marqué un tournant en apportant des dispositions claires sur la réutilisation des eaux usées et la valorisation des boues. Ces initiatives représentent des moteurs importants pour une meilleure maîtrise de la gestion des boues d'épuration et pour l'intégration des filières des eaux usées et des boues. Cette intégration, tant sur le plan technique que managérial, devient une nécessité urgente, car une mauvaise gestion des boues pourrait compromettre la durabilité des projets d'épuration et de traitement des eaux usées.

La gestion des boues est devenue une préoccupation de premier plan pour plusieurs raisons :

- **Augmentation du volume de boues** : avec l'extension du réseau d'assainissement, le volume de boues générées par les stations d'épuration a considérablement augmenté, nécessitant des infrastructures et des solutions adaptées pour leur traitement et leur valorisation.
- **Risques environnementaux et sanitaires** : les boues issues des STEP contiennent des matières organiques, des métaux lourds, des agents pathogènes et des substances chimiques qui, si elles ne sont pas correctement traitées, peuvent contaminer les sols, les eaux souterraines et les écosystèmes environnants. Par

³⁵ M.O. Belloulid, H. Hamdi, L. Mandi and N. Ouazzani, "Solar drying of wastewater sludge: thermal treatment and valorization", in: *Proceeding of International Workshop on Waste Management in Maghreb Countries*. pp. 86-87, 2013

ailleurs, une gestion inadéquate des boues peut également poser des risques pour la santé publique, en particulier dans les zones urbaines denses.

- **Pression sur les infrastructures existantes** : les stations d'épuration conçues il y a plusieurs années ne sont pas toujours équipées pour gérer de manière optimale la quantité croissante de boues. Cela crée une surcharge des équipements, compromettant ainsi l'efficacité du traitement des eaux et nécessitant des investissements supplémentaires en infrastructures.
- **Opportunités de valorisation** : Bien que la gestion des boues pose des défis, elle offre également des opportunités de valorisation, notamment dans les domaines de la production d'énergie (via le biogaz) et de la réutilisation des boues en agriculture sous forme de compost. Ces initiatives sont encore à leurs débuts au Maroc, mais elles présentent un potentiel significatif pour promouvoir une économie circulaire.

Ainsi, la problématique de la gestion des boues au Maroc s'inscrit désormais comme une priorité dans les politiques de développement durable et de gestion des ressources en eau. Des solutions innovantes et durables sont nécessaires pour répondre à cette problématique tout en tenant compte des impératifs environnementaux, économiques et sociaux.

4.1.1. Destinations actuelles des boues

Malgré le rythme d'assainissement relativement soutenu, qui a conduit à une production annuelle de boues estimée à 170 000 tonnes de matière sèche, le Maroc accuse un retard en matière de valorisation de ces boues. Dans la majorité des stations d'épuration du pays, les boues sont soit accumulées à proximité des installations, stockées dans des lits de séchage, ou, lorsque cela est possible, envoyées vers des décharges. Dans certains cas, elles sont également utilisées de manière peu ou pas encadrée par les agriculteurs.

- **Stockage direct sur les sites des stations d'épuration** : cette option est la plus courante, mais elle génère des impacts environnementaux et des nuisances, selon la sensibilité de l'environnement et du voisinage ;
- **Mise en décharge contrôlée** (en cas d'accord entre l'opérateur d'assainissement et le gestionnaire de la décharge), cette option était la plus répandue au Maroc et souvent adoptée en urgence ³⁶. Environ 60 % des boues générées par les STEP sont déposées dans des décharges contrôlées ³⁷, mais cette pratique présente plusieurs inconvénients. Les boues, souvent insuffisamment déshydratées (avec une siccité de 20-25 %), augmentent le volume des lixiviats et réduisent la durée de vie des décharges^{33 34}. En effet, il est à mentionné qu'une situation de blocage est récemment

³⁶ Chantier COSTEA-REUSE – Réutilisation des eaux usées en agriculture. Rapport de synthèse Maroc, Mars 2022. Brahim Soudi Et Khaoula Zahraoui

³⁷ Secrétariat d'état chargé de l'environnement. Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Épuration au Maroc

apparue, marquée par le refus des collectivités locales d'accepter les boues dans les décharges contrôlées. Dans le meilleur des cas, l'accueil des boues est soumis au paiement d'une redevance « négociée » qui n'est pas fixée de manière réglementaire, contrairement à ce que stipule l'Article 48 de la Loi 28-00. Comme mentionné plus loin, le statut des boues au Maroc reste flou, ce qui perpétue l'absence de synergie entre les producteurs de boues et les collectivités locales ³⁸.

- ***Incinération et valorisation énergétique :*** L'incinération est peu pratiquée au Maroc, notamment en raison du coût élevé de cette technique. Quelques projets pilotes ont été menés pour la co-incinération dans les cimenteries, mais cette option reste marginale avec moins de 5 % des boues incinérées³⁹.
- ***Valorisation agricole :*** L'utilisation des boues en agriculture est encore peu développée au Maroc. Des initiatives pilotes existent, mais elles représentent seulement 10 à 15 % ³⁵des boues valorisées. L'épandage agricole présente un potentiel important, mais la variabilité de la qualité des boues et l'absence d'un cadre réglementaire strict limitent son adoption à grande échelle.

4.1.2. Initiatives Entreprises en Matière de Valorisation des Boues

Le Maroc a entrepris plusieurs initiatives pour promouvoir la valorisation des boues, avec un accent sur la production d'énergie renouvelable et l'agriculture.

4.1.2.1. Le séchage solaire

Le séchage solaire est une technologie particulièrement adaptée aux conditions climatiques du Maroc, plusieurs STEPs ont adoptées cette technique notamment celle de Marrakech, Fès, Youssoufia, Ben Guérir, d'autres projets sont en cours de réalisation comme le cas de la ville de Laâyoune Le séchage solaire permet d'atteindre des taux de siccité de 60 à 80 % ³⁵, facilitant ainsi le transport et l'utilisation des boues dans l'agriculture ou pour la production de biogaz.

³⁸ Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances. SOUDI Brahim 2015.

³⁹ Assainissement liquide et gestion des boues au Maroc, SWIM-H2020 SM_Sludge Management_Morocco, 2018

Encadré 7



L'exemple le plus important est celui de la station de traitement des eaux de Marrakech qui produit environ 71 tonnes de boues par jour, dont une partie est valorisée grâce à cette technique. L'installation de la ville de Marrakech représente actuellement la plus grande installation solaire pour le séchage des boues en Afrique. Cette installation a été réalisée sur une

surface de séchage de 40 320 m² et a la capacité de traiter 75 000 tonnes de boues avec une siccité initiale de 22% et une siccité finale de 80%. Le coût d'investissement de cette installation est de 140 millions de Dirhams. Le coup d'exploitation est environ 150 DH/t MS par an ⁴⁰. L'installation de ces séchoirs solaire des boues représente l'état principal actuel des réalisations dans la gestion des boues au Maroc, ce qui fait que beaucoup d'opportunités sont présentes pour différents acteurs dans cette filière, notamment dans la valorisation de ces boues ⁴¹.

Les boues séchées sont récupérées dans le procédé de fabrication du ciment : 50 t/jour de boues séchées sont utilisés pour remplacer 18 t/jour de coke de pétrole dans la chaîne de cuisson du clinker par un apport massique de 15 t/jour de matière minérale intégrée dans la composition du clinker ⁴²

4.1.2.2. La méthanisation

La production de biogaz à partir des stations d'épuration au Maroc est un domaine en développement qui présente un fort potentiel pour la valorisation des boues d'épuration. Le biogaz est généré à partir de la décomposition anaérobie des matières organiques présentes dans les boues, ce qui permet de transformer un déchet en une source d'énergie renouvelable. Bien que le secteur soit encore en phase d'expansion, certaines stations d'épuration, notamment celles des grandes villes comme Marrakech, Fès, Kénitra et autres, ont mis en place des projets de valorisation énergétique des boues via la production de biogaz. Ces initiatives visent non seulement à réduire le volume des boues, mais aussi à produire de l'énergie sous forme de biogaz, qui peut être utilisé pour alimenter les équipements de la station elle-même, ou pour être réinjecté dans le réseau.

⁴⁰ Thermo-System (2018). <https://www.thermo-system.com/fr/references>

⁴¹ ARISILY, T., & HAJJI, A Technologie de séchage solaire des boues des stations d'épuration des eaux usées et son impact sur la gestion des boues au Maroc. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2020) 8(1): 57-66

⁴² Chantier COSTEA-REUSE – Réutilisation des eaux usées en agriculture. Rapport de synthèse Maroc, Mars 2022. Brahim Soudi Et Khaoula Zahraoui

Encadré 8

La station de Marrakech génère 800 Nm³ de biogaz par heure, ce qui contribue à satisfaire les besoins énergétiques de la station elle-même et permet d'éviter l'émission de 60 000 tonnes de CO₂ équivalent par an⁴³.

La STEP de Fès, grâce à digestion des boues et cogénération de l'énergie électrique à partir du biogaz, capte près 15 000 m³/j de méthane pour produire environ 22 millions kWh/an d'électricité couvrant ainsi 50% des besoins en énergie électrique de la station⁴⁴.

À Khouribga, la production de biogaz atteint environ 2 600 Nm³/j, utilisée pour la cogénération d'énergie électrique et thermique. Le biogaz produit couvre 100 % des besoins en énergie thermique de la station, soit 8 400 kW par jour, et entre 30 % et 40 % de ses besoins en électricité, avec environ 200 kW générés pour une demande totale de 600 kW⁴⁵.

Dans le même sens, l'OCP a mis en place deux moteurs à biogaz aux STEPs de Bengurir et Youssoufia d'une puissance de 100 et 150 kW pour la valorisation énergétique des boues d'épuration, permettant ainsi de couvrir les besoins énergétiques des deux STEPs et 30% des besoins énergétiques de chaque site⁴⁶.

4.1.2.3. Le Compostage

Le compostage est une autre filière pour la valorisation des boues d'épuration. En les mélangeant avec des déchets organiques, les boues peuvent être transformées en compost riche en nutriments, adapté à l'enrichissement des sols agricoles et peuvent couvrir en partie ou en totalité les besoins des cultures⁴⁷.

L'utilisation directe des boues brutes n'est pas sans risques, compte tenu de leur pouvoir fermentescible, des nuisances olfactives et des dangers sanitaires liés à la présence d'agents pathogènes et d'éléments toxiques. Ces boues doivent ainsi être stabilisées avant toute utilisation agricole. En effet, le compostage est une des techniques pouvant assurer cette stabilisation et permettant la valorisation des boues pour être utilisé comme amendement organique. Néanmoins, il est important de vérifier les concentrations en métaux lourds⁴⁸. Certaines stations, comme celles de Nador et M'Zar à Agadir, ont montré des résultats prometteurs, avec des boues atteignant une siccité de plus de 80 % après compostage, respectant les normes internationales d'épandage agricole.

⁴³ Assainissement liquide et gestion des boues au Maroc, SWIM-H2020 SM_Sludge Management_Morocco, 2018

⁴⁴ <https://www.massolia.com/bio-durable/fes-la-nouvelle-station-depuration-bientot-livree/>

⁴⁵ Echakraoui Zhour. Maîtrise et Optimisation de la station de traitement et d'épuration de Khouribga Maroc, mémoire PFE Master Sciences et Techniques

⁴⁶ https://telquel.ma/2017/03/10/comment-le-biogaz-alimente-villes-et-grands-projets-au-maroc_1538668

⁴⁷ SU D.C., WONG J.W.C. et JAGADEESAN H., 2004. "Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil", Chemosphere, 56, 10 : 957- 965.

⁴⁸ SPINOSA L., 2001. "Evolution of sewage sludge regulations in Europe", Water Science Technology, 44, (10) : 1-8.

Encadré 9

Exemple de la station de Nador ⁴⁹ :

Au cours des 90 jours de compostage, les analyses physicochimiques ont montré que tous les paramètres ont atteint des niveaux qui reflètent la stabilité du compost final. Au cours du compostage, on a assisté à une production accentuée du nitrate NO_3^- , qui est passée de 615,59 mg/kg à 2888,15 mg/kg. La teneur de NH_4^+ est par contre faible au début du compostage et sa concentration a augmenté pour atteindre 140,8 mg /kg à 90 jours. Les concentrations totales en métaux lourds analysés (Zn, Pb, Cu, Cr, Ni et Cd) dans le compost final restent très inférieures aux valeurs limites des composts utilisés comme amendement organique en comparaison avec les normes européennes (E.U) et celles de l'Agence de Protection de l'Environnement (U.S. EPA).

4.1.2.4. Valorisation agricole des boues séchées et/ou compostées

- **L'expérience de Dar El Gueddari**

L'ONEE a entrepris une action pilote de valorisation des boues par le curage des lagunes de la STEP de Dar El Gueddari, avec pour objectif l'épandage des boues sur des terres agricoles dans le cadre de mesures d'accompagnement visant à créer un référentiel technique et normatif⁵⁰. En l'absence d'industries polluantes raccordées au réseau, des analyses des boues ont été réalisées (ETM, CTO et pathogènes) afin de vérifier leur conformité avec les normes internationales, notamment européennes et québécoises, considérées parmi les plus rigoureuses. Les résultats ont confirmé la conformité des boues à ces normes, démontrant ainsi leur potentiel fertilisant pour une utilisation en agriculture⁵¹.

Après un séchage solaire, les boues étaient destinées à être épandues sur les sols du site d'expérimentation hydro-agricole de Souk Tlet. Cependant, malgré la conformité des boues avec les normes européennes et canadiennes, l'épandage prévu pour 2014 n'a pas pu être réalisé. L'ORMVAG, qui devait mettre à disposition des terrains agricoles, s'est finalement désengagé, estimant que les sols de la zone expérimentale initialement sélectionnée n'étaient pas adaptés à l'épandage des boues⁵².

⁴⁹ Sbaa, Mohamed & Zahra, Zerrouqi. (2007). Valorisation par compostage des boues d'épuration de la ville de nador (Maroc). Tribune de l'eau. 60. 25-29.

⁵⁰ Programme National d'Assainissement Liquide et d'épuration des eaux usées : Bilan d'Étape et perspectives. ADI/ONEE

⁵¹ Boues issues des dispositifs d'épuration en milieu rural marocain : Traitement et valorisation agricole. Programme AGIR. GIZ, 2020

⁵² ONEE-Branche eau. 2014. Approche préliminaire pour la conception d'une opération pilote d'épandage des boues curées de la STEP de Dar El Gueddari. Rapport final

- ***L'expérience de la STEP de M'zar***

En 2006, la RAMSA (Régie Autonome Multi-services d'Agadir) a réalisé une étude de faisabilité pour la valorisation des boues issues de la STEP de M'zar, qui a conclu que le séchage solaire était la technique la plus appropriée, à la fois sur le plan technique et économique. Cette méthode permet d'atteindre une siccité supérieure à 85%⁵³, rendant les boues sèches, sans odeur, et faciles à manipuler. Sur le plan agronomique, elles présentent des teneurs élevées en azote et en phosphore, et sont conformes aux normes d'épandage agricole en matière d'éléments traces métalliques (ETM) et de contaminants biologiques⁵⁴, malgré de légers dépassements au niveau du cuivre, du zinc et du cadmium.

Entre 2012 et 2013, un projet pilote de co-compostage des boues de la STEP avec d'autres déchets organiques a été mis en place. Le compost obtenu s'est avéré conforme à la norme européenne NFU 44-095, offrant des options de valorisation telles que l'épandage agricole et la réhabilitation des sols dégradés, notamment pour la stabilisation des dunes de M'zar. Cette expérience a démontré la faisabilité technique et normative de la valorisation des boues compostées⁵⁵.

- ***Les STEPs d'Al Attaouia et de Skhirat***

La STEP d'Al Attaouia, située dans la province d'El Kelaâ des Sraghna, et celle de Skhirat illustrent les défis et les pratiques observées dans la gestion des boues au niveau local. À Al Attaouia, la station, d'une capacité de 700 m³/j, était gérée par la municipalité entre 2005 et 2009, mais elle est désormais hors service. Les bassins anaérobies et de maturation sont saturés de boues, révélant les limites de la gestion municipale de ces installations, qui nécessiteraient l'intervention d'organismes spécialisés disposant des compétences et ressources appropriées pour une gestion rigoureuse⁵⁶.

Dans les deux cas, que ce soit à Al Attaouia ou à Skhirat, les boues sont déposées à proximité des stations sans traitement préalable. Cependant, dans ces régions agricoles, les agriculteurs locaux prélèvent régulièrement ces boues pour les utiliser comme fumure sur leurs parcelles. Ils affirment la qualité du produit agricole obtenu, ce qui témoigne d'une acceptabilité notable de l'épandage des boues⁵⁷. Cette pratique, bien que courante, se déroule sans cadre réglementaire strict, soulignant la nécessité de régulations claires pour assurer une valorisation sécurisée et durable des boues.

⁵³ Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances. SOUDI Brahim 2015.

⁵⁴ Assainissement liquide et gestion des boues au Maroc, SWIM-H2020 SM, Sludge Management, Morocco, 2018

⁵⁵ Boues issues des dispositifs d'épuration en milieu rural marocain : Traitement et valorisation agricole. Programme AGIR. GIZ, 2020

⁵⁶ Programme National d'Assainissement Liquide et d'épuration des eaux usées : Bilan d'Étape et perspectives. ADI/ONEE

⁵⁷ Projet de Renforcement des Capacités sur l'Utilisation sans danger des Eaux Usées en Agriculture. Rapport National du Maroc. Décembre 2011

L'analyse des expériences de valorisation des boues dans différentes stations d'épuration au Maroc met en lumière plusieurs obstacles qui entravent l'implémentation efficace de ces pratiques. Bien que des projets pilotes, comme ceux de Dar El Gueddari et de M'zar, aient démontré le potentiel agronomique des boues et la faisabilité de techniques comme le séchage solaire et le compostage, des défis majeurs persistent.

Tout d'abord, le manque de synergie entre les différentes parties prenantes est un obstacle significatif. Dans le cas de Dar El Gueddari, malgré la conformité des boues aux normes, le désengagement de l'ORMVAG en raison de l'inadéquation des sols a compromis l'épandage prévu. Cela souligne l'importance d'une coordination efficace entre les opérateurs de stations d'épuration et les gestionnaires de terres agricoles.

Ensuite, la situation des STEPs d'Al Attaouia et de Skhirat met en évidence une gestion inadéquate et un manque d'infrastructure adaptée, avec des installations hors service et une saturation des bassins. Ce contexte entrave non seulement la valorisation des boues, mais pose également des problèmes environnementaux, en raison du stockage non réglementé des boues.

Enfin, l'absence d'un cadre réglementaire clair pour encadrer la valorisation des boues crée une incertitude pour les agriculteurs et les autorités. Bien que ces derniers aient démontré une acceptabilité à utiliser les boues comme amendement, l'absence de normes précises soulève des inquiétudes quant à la sécurité et à la durabilité de ces pratiques.

En somme, pour que la valorisation des boues issue des stations d'épuration soit une réussite, il est impératif d'établir des régulations claires, de renforcer la coopération entre les différents acteurs impliqués, et de développer les infrastructures nécessaires à une gestion efficace et sécurisée des boues. Sans ces mesures, les initiatives de valorisation risquent de rester limitées et inefficaces.

4.2. Problématiques liées aux boues mal gérées

4.2.1. Impacts environnementaux

La gestion inadéquate des boues d'épuration présente des défis environnementaux et opérationnels considérables :

- **Pollution des sols et eaux** : Les boues d'épuration contiennent des éléments toxiques tels que les métaux lourds (zinc, cuivre, plomb) ainsi que des agents pathogènes comme des virus et des bactéries⁵⁸. En raison des processus physico-chimiques utilisés dans le traitement des eaux usées, ces substances polluantes, y compris des composés organiques faiblement biodégradables, tendent à se concentrer dans les boues. Lorsqu'elles ne sont pas correctement traitées ou sont stockées de manière inappropriée, ces boues peuvent contaminer les sols

⁵⁸ www.lafabriqueecologique.fr/app/uploads/2020/12/Oeil-35-Les-m%C3%A9taux-lourds.pdf

agricoles, les nappes phréatiques et les eaux de surface, menaçant ainsi la biodiversité et la santé humaine⁵⁹. Elles sont donc considérées comme des déchets dangereux en raison de leur potentiel à contenir des métaux lourds et des organismes pathogènes. Le fait d'apporter des boues dont la qualité chimique et organique est différente de celle du milieu récepteur va entraîner des modifications de ce milieu ; Les modifications de la composition du sol vont essentiellement dépendre des propriétés du sol récepteur.

Les boues contiennent notamment des eaux et des éléments polluants. Ces éléments peuvent nuire à l'environnement, particulièrement les eaux souterraines et les eaux de surface, lorsqu'ils sont rejetés en grande quantité. De plus, les boues peuvent contenir des agents pathogènes tels que les virus et les bactéries, augmentant les risques de propagation de maladies hydriques dans les zones où les boues sont mal stockées.

- **Nuisances olfactives et sanitaires :** Le problème des nuisances olfactives liées aux boues d'épuration des eaux usées devient de plus en plus fréquent, en particulier à cause de l'urbanisation qui rapproche les zones résidentielles de ces infrastructures. Les boues génèrent des molécules volatiles malodorantes qui se dispersent dans l'atmosphère. Ces molécules proviennent de transformations biologiques ou chimiques complexes et appartiennent principalement à quatre familles chimiques : les composés soufrés réduits, les composés azotés basiques, les aldéhydes et cétones, et les acides organiques. Ces composés ont des seuils olfactifs très bas et sont souvent présents en mélange dans l'air malodorant⁶⁰.

4.2.2. Impact sur la performance épuratoire des STEP

La mauvaise gestion des boues impacte considérablement les performances des stations d'épuration des eaux usées, entraînant des effets négatifs sur leur efficacité et des conséquences environnementales, économiques et techniques.

- **Réduction de l'efficacité du traitement**

Surcharge des bassins de traitement : Si les boues ne sont pas correctement extraites ou traitées, elles peuvent s'accumuler dans les bassins d'épuration, réduisant la capacité de traitement de la station. Cela affecte le processus de décantation et diminue l'efficacité globale du traitement des eaux usées.

Diminution de la qualité de l'effluent : Une mauvaise gestion des boues peut entraîner une mauvaise séparation des solides et des liquides, entraînant des effluents contenant

⁵⁹ Les boues résiduelles de la station d'épuration de Marrakech : caractéristiques et impacts environnementales, 2012, mémoire de fin d'études, KARAFI Kaoutar & MOUSTAOUI Farida,

⁶⁰ Martine Ramel, M. Fischer. Nuisances olfactives en station d'épuration des eaux : méthodologie de caractérisation des émissions. Congrès International de technologie et de recherche pour l'environnement, Oct 1992, Bâle, Suisse. pp.151-162. Ffineris-00971846

encore des matières organiques ou d'autres polluants. Cela conduit à un rejet d'eaux insuffisamment traitées dans l'environnement⁶¹.

- **Augmentation des coûts de fonctionnement**

Entretien et nettoyage fréquents : Lorsque les boues ne sont pas gérées de manière optimale, elles peuvent obstruer les équipements, comme les pompes et les canalisations, entraînant des pannes fréquentes et un besoin accru de maintenance⁶². Le remplacement ou la réparation d'équipements coûteux alourdit les charges de fonctionnement.

Énergie accrue : L'accumulation excessive de boues peut nécessiter plus d'énergie pour leur pompage et leur traitement, ce qui entraîne une augmentation des coûts énergétiques pour la STEP.

- **Dégradation des infrastructures**

Corrosion et usure prématurée des équipements : Les boues mal gérées, surtout si elles contiennent des substances corrosives (par exemple des métaux lourds ou des produits chimiques), peuvent accélérer la dégradation des infrastructures et des équipements. Cela diminue leur durée de vie et nécessite des remplacements plus fréquents.

Blocage des conduits : L'accumulation excessive de boues dans les bassins de décantation et les canalisations peut provoquer des obstructions, affectant la fluidité du processus de traitement et augmentant les risques de débordement ou de panne.

5. Filières de traitement-valorisation des boues d'épuration

5.2. Benchmark international

Le benchmark international sur les techniques de traitement et valorisation des boues d'épuration consiste à comparer les pratiques, technologies et innovations utilisées dans différents pays pour gérer les boues issues des stations d'épuration.

- **Danemark : La Révolution de la Méthanisation**

Le Danemark est un exemple remarquable en matière de valorisation énergétique des boues. Environ 90 % des boues d'épuration sont traitées par méthanisation, ce qui produit du biogaz utilisé à des fins énergétiques. Cette méthode permet de produire jusqu'à 60 millions de mètres cubes de biogaz par an, couvrant les besoins énergétiques de plus de 50 000 foyers. Ce modèle réduit les émissions de 60 000 tonnes de CO₂ par an.

⁶¹ <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/>

⁶² <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/procedes-biologiques/procedes-a-cultures-libres/aide-a-l-analyse-des-dysfonctionnements>

En parallèle, les boues résiduelles sont stabilisées et utilisées dans l'agriculture, minimisant ainsi leur impact sur l'environnement⁶³.

- **Allemagne : Co-Incineration et Valorisation des Résidus**

L'Allemagne a mis en œuvre un système de co-incinération des boues dans les cimenteries, permettant non seulement de récupérer de l'énergie, mais aussi de valoriser les cendres issues de l'incinération dans la fabrication de matériaux de construction. Ce procédé permet de réduire de 50 % le volume des boues à traiter⁶⁴. En 2021, environ 1,2 million de tonnes de boues ont été co-incinérées, générant suffisamment d'énergie pour chauffer 100 000 foyers tout en réduisant les besoins en matières premières pour la production de ciment⁶⁵.

- **Suède : Valorisation Agricole et Normes Rigoureuses**

La Suède est un modèle dans l'utilisation des boues en agriculture, avec environ 45 % des boues recyclées pour l'épandage agricole. Des normes très strictes de contrôle de la qualité des boues garantissent qu'elles sont exemptes de métaux lourds et de polluants. Ce modèle contribue à une augmentation de la teneur en matière organique des sols de 5 à 10 % et à une amélioration de leur rétention en eau de 10 %⁶⁶.

En Europe, comme souligné sur la figure 16 ⁶⁷, 60 % des boues d'épuration sont recyclées, dont la moitié est compostée avec des déchets verts. La valorisation des boues en agriculture est le débouché privilégié par la France, mais aussi le Portugal, l'Espagne, l'Italie, la République Tchèque et le Royaume-Uni. Elle constitue d'ailleurs une option généralement mieux perçue que l'incinération, en particulier par les associations de protection de l'environnement et les organisations agricoles.

En résumé, le benchmark international montre une tendance vers des solutions plus écologiques, avec une forte dépendance aux technologies capables de valoriser les boues tout en minimisant les impacts environnementaux.

⁶³ [Assets.danfoss.com/documents/latest/241478/AE446319295336en-000101.pdf](https://assets.danfoss.com/documents/latest/241478/AE446319295336en-000101.pdf)

⁶⁴ www.fp2e.org/userfiles/files/publication/pratiques/Livret_Boues.pdf

⁶⁵ www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/germany-waste-to-energy-market-industry

⁶⁶ www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/dossiers/de-l-engrais-issu-des-step.html

⁶⁷ SYPREA/ FNADE. *La valorisation des boues d'épuration, un enjeu collectif pour demain*. Mars 2021

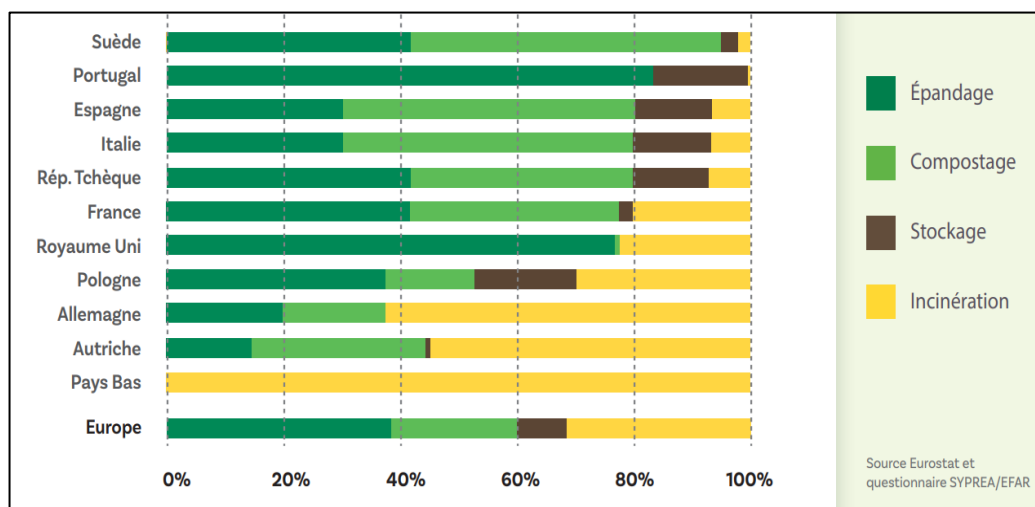


Figure 16 : Destination des boues d'épuration dans quelques pays européens source SYPREA, 2021

5.3. Filières recommandées pour le Maroc

5.3.1. Système intensif à boues activées dans les grandes agglomérations

Le choix de la méthode dépendra du contexte spécifique et des possibilités de valorisation :

- **Filière verte** : valorisation en agriculture, pour la réhabilitation des sols dégradés, a végétalisation des carrières abandonnées et des décharges fermées, etc.
- **Filière rouge** : valorisation énergétique.

En l'absence de ces options, une collaboration avec les gestionnaires des déchets ménagers pourrait être nécessaire afin d'intégrer les boues dans les décharges contrôlées (**Filière noire**) ou de créer des sites spécialisés pour leur traitement ; les recommandations concernant la gestion des boues sont illustrées dans la figure 17 ⁶⁸.

⁶⁸ Soudi et al.2016. Gestion des boues des stations d'épuration au Maroc : Quantification, caractérisation et options de traitement et de valorisation

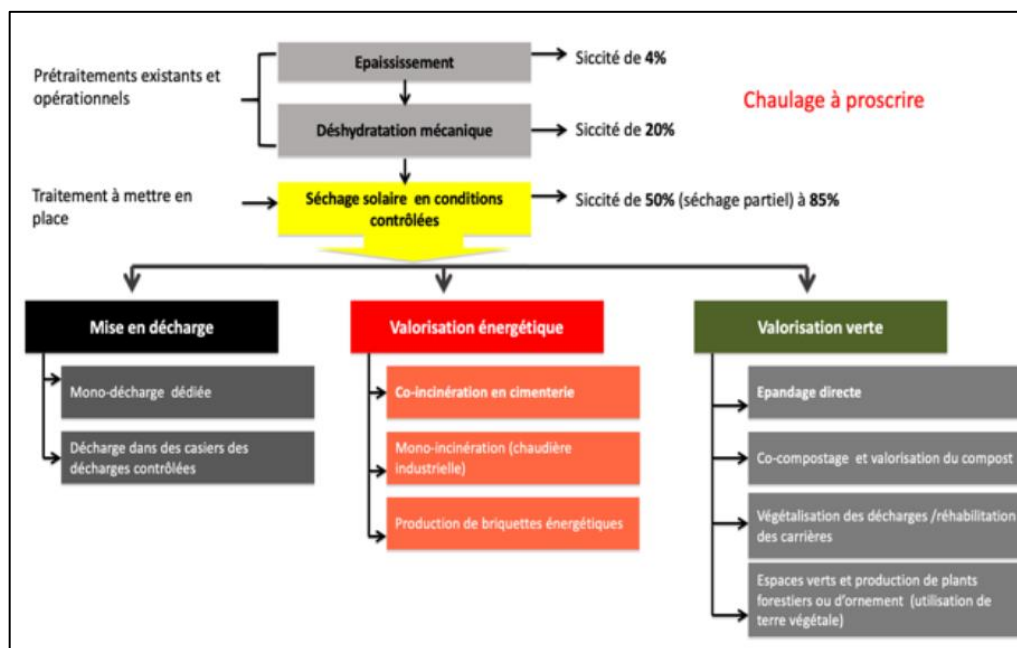


Figure 17: Filières de gestion des boues recommandées pour les systèmes intensifs (Soudi, 2016)

Filières pour les systèmes extensifs

Les trois approches principales (verte, rouge et noire) restent inchangées. La principale distinction réside dans la méthode de traitement. Par exemple, pour le lagunage naturel, les boues sont placées sur des lits de séchage naturel⁶⁹. Si le séchage se prolonge dans des zones arides, il devient possible d'utiliser les boues directement comme amendement pour les sols ou de les co-composter avec d'autres déchets organiques disponibles à une distance économiquement rentable. En effet, le séchage prolongé permet non seulement de réduire la teneur en eau des boues, mais aussi d'éliminer les agents pathogènes et les œufs d'*Ascaris*⁷⁰.

5.3.2. Filières pour le milieu rural

Dans les zones rurales, il est préconisé d'opter pour la valorisation des boues sous forme liquide, par épandage direct, seules ou associées à des eaux usées traitées. Cette approche est plus adéquate et offre une valorisation plus efficace, à condition que les boues soient stabilisées et exemptes de risques sanitaires. En effet, le climat aride de nombreuses zones rurales ne justifie pas l'utilisation de méthodes telles que le séchage naturel ou la déshydratation mécanique des boues, qui seraient inefficaces dans ces contextes.

En l'absence de retours d'expérience dans nos régions, on se propose de relater des réflexions inspirées d'études menées dans le cadre de projets pilotes en milieu rural, initiés par le Ministère de l'Intérieur avec le soutien de la GIZ, notamment dans le village rural de Chouirij dans la région de Marrakech-Safi. Il s'agit de considérer les boues

⁶⁹ Soudi Brahim et Zahraoui. Khaoula Rapport Chantier COSTEA_réutilisation des eaux usées au Maroc 2022

⁷⁰ Xanthoulis D. (1996). Rapport de synthèse : Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles, Ouarzazate, Maroc. PNUD, FAO, Département de l'Agriculture – Maroc – Maroc.

produites par des systèmes d'assainissement en milieu rural des zones arides comme de « l'eau usée chargée en matière organique ». Le déficit climatique de nos régions ne justifie ni le séchage naturel ni la déshydratation mécanique, procédés qui reviendraient à évaporer 98% d'eau pour ne récupérer que 2% de boues, ce qui est inadapté. Les boues issues des stations d'épuration des eaux usées (STEP) sont en grande majorité liquides, et si le séchage est pertinent dans les climats humides pour réduire les coûts de transport, il semble peu adapté dans les régions au climat aride. Par conséquent, la valorisation des boues à l'état liquide (épandage direct des boues liquides), seules ou mélangées aux eaux usées traitées, est recommandée pour une valorisation optimale des sous-produits, à condition que cette option soit sans risque pathogène et que les boues soient stabilisées chimiquement.

Parmi les agents de stabilisation, la chaux est couramment utilisée. Cependant, dans le contexte marocain, de l'Afrique du Nord et du Moyen- Orient, où les sols sont souvent riches en carbonates de calcium et présentent un pH neutre à basique, l'épandage de boues chaulées pourrait induire une augmentation excessive du pH et altérer les propriétés physico-chimiques des sols (Soudi et Bazza, 2003). D'autres flocculants, tels que les chlorures ferriques ou les nitrites, sont donc suggérés. Une homogénéisation efficace du flocculant avec les boues est essentielle pour une stabilisation optimale. La promulgation d'un décret encadrant la valorisation des boues, incluant des normes sanitaires pour les boues liquides stabilisées en milieu rural, est également nécessaire.

Une fois stabilisées, les boues peuvent être mélangées avec de l'eau traitée puis transportées vers les parcelles agricoles ou des sites de valorisation, en camion-citerne pour les terrains plats ou par équidés équipés de citernes en terrain accidenté, une pratique déjà développée dans les zones montagneuses du Maroc. Ce mode de valorisation est particulièrement adapté pour l'irrigation des vergers d'oliviers et des plantations fruitières dans les bassins versants en zones arides pour la conservation des eaux et des sols.

6. Réglementations et directives pour l'application des boues aux sols agricoles : benchmark international et déductions pour le Maroc

6.2. Vue d'ensemble des directives définissant les prescriptions et conditions de valorisation agricole des boues

Bien qu'elles présentent un pouvoir fertilisant important, l'apport des boues comme fertilisant pour les cultures et comme amendement organique des sols peut véhiculer des éléments traces métalliques et organiques qui constituent un risque sanitaire et environnemental pour les sols. De ce fait, l'utilisation des boues en agriculture, en horticulture et même en sylviculture nécessitent une réglementation et l'application de normes d'exploitation qui garantissent la sécurité et empêchent la contamination des sols et des produits agricoles.

• Europe

La valorisation agricole des boues est réglementée par la directive européenne 86/278/CEE du 12 juin 1986 (modifiée en 2009) relative à la protection de l'environnement et notamment des sols lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. Cette directive fixe les valeurs limites des éléments traces métalliques dans les boues utilisées en agriculture ainsi dans les sols récepteurs de cette matière. Elle décrit aussi les périodes d'interdiction d'épandage, et les conditions d'utilisation ainsi que les analyses recommandées.

Les prescriptions de cette directive ont été transposées dans la réglementation nationale de chaque État membre à travers des décrets et des arrêtés. Ces textes de lois sont rapportés par le tableau 13.

Tableau 13: Textes réglementaires concernant l'utilisation des boues en agriculture dans les pays d'Europe

Pays	Textes réglementaires
France	Décret n°97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Arrêté du 8 janvier 1998, fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. Circulaire de 18 avril 2005 relative à l'épandage agricole des boues de stations d'épuration urbaines. Le décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 (article R 211-25 à R 211-47 du code de l'environnement) relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées urbaines, et son arrêté d'application du 8 janvier 1998 (modifié), fixent le cadre réglementaire que doivent respecter les épandages des boues communales. Les matières de vidange issues de l'assainissement non collectif sont soumises à la même réglementation. Tout épandage est soumis au dépôt d'une étude préalable qui comprend : > une caractérisation des boues > une étude du périmètre d'épandage > une présentation de l'organisation des épandages > les conventions de mise à disposition des parcelles d'épandage par les exploitants Les boues issues du traitement des eaux usées industrielles sont soumises à une réglementation semblable à celle concernant les boues des collectivités. Les règles d'épandage applicables aux boues sont similaires à celles applicables aux effluents d'élevage.
Allemagne	Ordonnance sur les boues d'épuration, publié en 1992.
Belgique	L'arrêté du gouvernement Wallon du 12 janvier 1995 portant réglementation de l'utilisation sur ou dans les sols des boues d'épuration ou de boues issues de centres de traitement de gadoues de fosses septiques.
Espagne	Décret royal 1310/ 1990 du 29 octobre sur l'utilisation des boues d'épuration en agriculture.

La réglementation européenne exige d'établir un ensemble de documents afin d'organiser la filière et permettre une bonne traçabilité de produits. Il s'agit de l'étude préalable d'épandage, le bilan, le registre et le programme d'épandage. Le contenu de ces documents est rapporté par :

- **La directive européenne 86/278 concernant l'utilisation des boues d'épuration en agriculture**, dans son article 10 ;
- **L'arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles** dans les articles 2, 3, 4 et 17
- **La circulaire du 18 avril 2005 relative à l'épandage agricole des boues de stations d'épuration urbaines**, en France ;
- **L'arrêté du gouvernement du wallon** en Belgique dans ses articles 8 et 11 ;
- **Le décret royal 1310/ 1990 du 29 octobre sur l'utilisation des boues d'épuration en agriculture** en Espagne dans les articles 6, 7 et 8 ;
- **L'ordonnance sur les boues d'épuration** en Allemagne dans les sections 3, 4 et 7.

L'étude préalable d'épandage est réalisée dans le but de montrer l'innocuité des boues et l'aptitude des sols à les recevoir. Cette étude doit comprendre : i) Les données relatives aux boues (origine, quantité produites et utilisées, qualité des boues destinées à l'épandage (type de traitement, résultats d'analyses...) ; ii) Les données relatives aux sols récepteurs (caractérisation générale, description des systèmes de cultures, résultats d'analyse,...) ; iii) la description des contraintes présentes dans la zone concernées (habitations, sources d'eau, productions spéciales, réseaux routiers...) ; iv) la présentation des moyens techniques qui seront utilisés dans l'épandage ; et v) la justification et l'accord des utilisateurs de boues pour la mise à disposition de leurs parcelles.

Le programme prévisionnel annuel d'épandage est un document tenu par les producteurs de boues⁷¹ visant la planification de l'opération de l'épandage. Il comprend une caractérisation des boues objet d'épandage (quantité prévisionnelle, rythme de production, valeur agronomique), une liste des parcelles concernées et leurs caractéristiques (systèmes de cultures, analyses des sols...), et une description du calendrier d'épandage en précisant les doses à épandre par unité culturale. Le programme identifie également les différentes personnes, physiques ou morales, intervenantes dans l'opération de l'épandage, et précise les modalités de surveillance et de suivi.

Un autre document permet le suivi agronomique de l'épandage et doit être délivré au préfet au même temps que le programme annuel d'épandage, c'est le bilan agronomique annuel. Ce document comprend : un bilan qualitatif et quantitatif des boues épandues, l'exploitation du registre d'épandage indiquant les quantités d'éléments fertilisants apportées par les boues sur chaque unité culturale et les résultats des analyses de sols, et

⁷¹ <http://www.cote-dor.chambagri.fr/services-aux-professionnels/environnement/gestion-des-engrais-et-matieres-organiques/gestion-de-la-matiere-organique-non-agricole-et-mese/bilan-annuel-et-programme-previsionnel.html>

les bilans de fumure réalisés sur des parcelles de référence, ainsi que les conseils de fertilisation complémentaire qui en découlent.

En plus de ces documents, le registre est considéré comme le document de base de surveillance. Il est maintenu par les producteurs des boues, à la fin de chaque année, et rapporte les informations suivantes :

- Les quantités de boues produites dans l'année en précisant les méthodes de traitement qu'elles ont subi,
- Les quantités de boues épandues par unité culturale,
- Les résultats d'analyses pratiquées sur les sols et les boues avec les dates de prélèvements et de mesures et leur localisation,
- L'identification des personnes physiques ou morales chargées des opérations d'épandage et des analyses.

Par ailleurs en France, **l'indice d'acceptabilité des sols à l'épandage « IAE »** permet l'évaluation de la faisabilité de l'épandage et l'aptitude des sols à recevoir les boues. Il est établi sur base d'une série de paramètres dont notamment le pH, la teneur en matière organique, le calcaire total et la granulométrie du sol (Figure 19)⁷².

L'adoption de cet indice permettra la définition des parcelles de référence et aussi la sélection des terres potentiellement aptes à l'épandage.

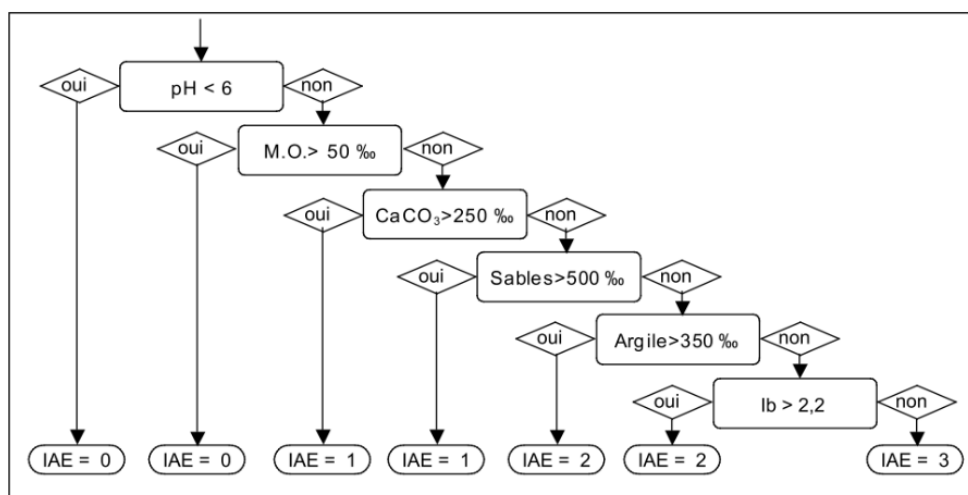


Figure 18 : Arborescence de l'indice d'acceptabilité des sols à l'épandage ou IAE

Toutefois, le compostage des boues peut être une meilleure alternative. A travers le compostage, les boues se transforment en produit final commercialisé de la même manière qu'un engrais organique ou support de culture. Ce procédé a été normalisé en 2002 par la promulgation de la norme française NF 44 – 095, mise en application par l'arrêté du 18 mars 2004 relatif aux vérifications auxquelles doit procéder le responsable

⁷² SOUDI Brahim 2015, Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances.

de la mise sur le marché des matières fertilisantes. L'opération de transformation est subordonnée à une autorisation.

Parmi les exigences de la norme, la production en lot afin d'assurer une bonne traçabilité, depuis la matière première jusqu'au produit final. Le compost fini et certifié, peut être distribué sans aucune formalité autre que la composition et conseils d'utilisation, cela est dû aux seuils fixés par la norme, en termes de métaux lourds, polluant organiques et pathogène, qui s'avère plus stricts que les valeurs limites imposées sur les boues traitées utilisées directement sur les sols. De ce fait, le procédé de compostage permet une économie circulaire, en transitant de la logique « déchet » vers une logique « produit ».

- **Canada**

Au Canada, on parle plutôt de biosolides (boues d'épuration traitées par conditionnement, déshydratation, ou séchage) ou du compost des biosolides. L'épandage direct des biosolides municipaux sur les sols agricoles est soumis aux prescriptions des lois fédérales (règlements et normes provinciales), tandis que l'épandage du compost de biosolides est régi par les dispositifs de la réglementation sur les engrais (Tableau 14). Généralement, l'épandage est subordonné à une autorisation, dans laquelle il est mentionné le lieu d'épandage et la dose d'application envisagée. Les dispositifs réglementaires ainsi que les procédures administratives changent d'une province à une autre, telle que chaque province a son propre cadre juridique (lois, règlements, plans et programmes pour la gestion des boues d'épuration et leur réutilisation en agriculture).

Au Québec, le plan d'action 2011-2015 insiste sur l'importance de la planification régionale de gestion des matières résiduelles en tenant compte de la production et de la gestion des boues résiduaires, dans le but de privilégier la filière de valorisation verte par épandage directe ou après compostage et la filière de production de biogaz, et réduire la quantité de boues mises en décharge.

Tableau 14 : Textes réglementaires concernant l'utilisation des boues d'épuration en agriculture, au Canada

Texte réglementaire	Objet
Loi sur les engrais (LENG) Règlement sur les engrais (RENG)	Établie par l'ACIA (Agence Canadienne d'Inspection des Aliments), cette loi s'applique sur les engrais et les suppléments dont figure le compost des biosolides municipaux.
Norme CAN/BNQ 0413-400	Normes concernant les amendements de sols — Biosolides municipaux alcalins ou séchés, 2009
Norme CAN/BNQ 0413-200	Norme concernant les amendements organiques — Composts, 2005 (modifiées en 2016)

- **Région MENA**

La réglementation de la valorisation des boues dans les pays du MENA est relativement récente. Généralement, elle est inspirée de la réglementation européenne ou américaine.

En Tunisie, l'interdiction de la valorisation agricole des boues en 1998⁷³ avait causé une accumulation des boues dans les stations d'épuration ce qui a généré une situation de blocage. La reprise de la valorisation des boues en agriculture a été timidement relancée en 2008, et elle avait nécessité l'établissement des normes d'utilisation pour éviter les risques sanitaires et environnementaux. Ce processus a été consolidé par la promulgation du décret n° 2007-13 du 13 janvier 2007 fixant les conditions et les modalités de gestion des boues provenant des ouvrages de traitement des eaux usées en vue de leur utilisation dans le domaine agricole, et la publication des normes tunisiennes NT 106.20, ainsi que la création d'un comité national chargé de suivi et de l'évaluation des boues dans le domaine agricole. L'épandage est soumis à un cahier de charge en Tunisie (*Article 3 du décret n° 2007-13 fixant les conditions et les modalités de gestion des boues provenant des ouvrages de traitement des eaux usées en vue de leur utilisation dans le domaine agricole*).

En 2006, en Jordanie, un règlement technique (JS 1145/2006) sur les usages des boues traitées et l'élimination des boues a été émis. JS 1145/2006 réglementait l'ensemble du cycle de production des boues jusqu'à leur réutilisation en tant qu'engrais pour le sol (pour l'élevage et la culture des arbres fruitiers) ou amendement du sol (pour la restauration des terres de pâturage) ou leur élimination en décharges.

JS 1145/2006 spécifiait des seuils pour les paramètres qui déterminent la qualité des boues traitées (biosolides). En conséquence, elles seraient classées en trois classes : la classe (1) étant celle de la plus haute qualité, adaptée à l'élevage et à la culture des arbres fruitiers ainsi qu'à la restauration des terres de pâturage, la classe (2) étant adaptée uniquement à la restauration des terres de pâturage et enfin, la classe (3) n'étant adaptée ni à l'une ni à l'autre et devant être mise en décharge.

JS 1145/2006 a fourni de plus amples détails sur les méthodes et les quantités pour l'application au sol (par exemple, les tonnes de biosolides à appliquer par hectare, le mélange avec la couche de terre, etc.), les exigences environnementales et de santé publique (par exemple, la proximité des plans d'eau, la pente maximale des terres, l'utilisation des terres avant et après application, la signalisation, etc.) ainsi que des considérations pour les autorités de surveillance et de contrôle. (2)

Cependant, malgré la présence d'un cadre législatif pour réglementer l'application au sol des biosolides, cela n'a pas été mis en œuvre. En 2009 et par la suite en 2011, des instructions ont été émises interdisant la production et l'utilisation d'engrais organiques à partir de matériaux provenant des stations d'épuration des eaux usées. Néanmoins, il

⁷³ GORSE F. 2007. *Situation de l'assainissement liquide Tunisie*

convient de mentionner que les autorités sont actuellement en train de revoir les règlements techniques liés à la gestion des boues et à la réutilisation des biosolides.

Les producteurs de boues doivent tenir un registre qui comporte les informations suivantes: quantités des boues produites, les caractéristiques et résultats d'analyses avec les dates de leur réalisation (*Article 6 du décret 2007-13 fixant les conditions et les modalités de gestion des boues provenant des ouvrages de traitement des eaux usées en vue de son utilisation dans le domaine agricole en Tunisie et le point 4.5 de la norme jordanienne JS 1145/2006 sur l'utilisation des boues d'épuration en agriculture*).

Il est nécessaire aussi de réaliser un plan d'épandage. Ce document révèle de la responsabilité des producteurs des boues, en Jordanie (*4.15, la norme jordanienne JS 1145/2006 sur l'utilisation des boues d'épuration en agriculture*). Alors qu'en Tunisie, c'est le commissariat régional du développement agricole selon l'article 7 du décret n° 2007-13, qui s'en charge. En effet, le commissariat régional du développement agricole en Tunisie est chargé, selon l'article 8 du décret n° 2007-13, de :

- La sélection des parcelles agricoles concernées par les campagnes d'épandage dont un échantillon représentatif servira de parcelles de référence,
- La caractérisation de la valeur agronomique des sols à travers des analyses d'échantillons de sols des parcelles de référence, et ce, avant la première campagne d'épandage ensuite tous les deux ans pour le système d'épandage intensif et tous les cinq ans pour le système d'épandage extensif,
- La détermination de la dose maximale des boues à appliquer à l'hectare (selon la qualité des boues et le système d'épandage).

Le suivi de l'opération de l'épandage est indispensable afin de contrôler et éviter toute infraction réglementaire. Les services responsables de cette mission ne sont pas les mêmes dans tous les pays. En Jordanie cette tâche est attribuée à un comité composé de différents Départements ministériels qui veillent sur l'environnement et la santé (*Point 2.15 et 4.4 des normes jordaniennes JS 1145/2006*). Ce comité a le droit de modifier l'autorisation d'épandage lorsqu'il s'avère nécessaire, ainsi qu'il a le droit d'actualiser, modifier compléter, dès que cela s'avère nécessaire, les normes et les restrictions en addition de celles proposées en JS 1145/2006.

En Tunisie, plusieurs organismes interviennent dans le suivi et le contrôle dont notamment :

- Les services du contrôle relevant du ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques et les institutions chargées de la production, du stockage et de la distribution des boues sont chargés chacun, de veiller au respect de l'application des normes en vigueur avant l'utilisation des boues dans l'opération d'épandage (*Article 13 du décret n°2007-13*)

- Le commissariat régional au développement agricole est responsable d'élaboration d'un système de suivi qui se base sur l'analyse des éléments suivants: le pH du sol et des eaux, la teneur en nitrates et nitrites dans la nappe, la concentration en éléments traces métalliques dans le sol, la concentration en azote, en phosphore et en potassium dans le sol, la qualité microbiologique dans l'eau, le sol et les cultures et notamment les coliformes fécaux et les œufs helminthes.(*Article 9 du décret n°2007-13*)
- Les services compétents du ministère de la santé publique sont chargés de suivre le contrôle interne effectué par les producteurs des boues et par les commissariats régionaux au développement agricole et d'assurer le contrôle sanitaire de la qualité des boues, des conditions de leur production, stockage et épandage en vue de vérifier leur conformité aux normes et à la réglementation en vigueur (Article 14 du décret n°2007).

Au cours des trois dernières décennies, des lignes directrices et des réglementations ont été établies par des organisations internationales et des agences locales de législation et de normalisation pour la valorisation sécurisée des eaux usées traitées et des boues en agriculture (*Unes et al., 2021*).⁷⁴

La plupart des normes internationales fixent une limite supérieure pour les concentrations de polluants dans les boues ou pour la concentration maximale de polluants dans le sol, ou limitent la charge maximale de boues/polluants. En général, la classe de produits chimiques la plus considérée pour l'évaluation de la qualité des boues est celle des métaux lourds ou éléments traces métalliques (ETM). Les ETM sont souvent supposés être omniprésents, transférables dans le système sol-plante et dangereux pour la santé humaine et animale et pour l'environnement. Ainsi, la toxicité des ETM a été largement étudiée en raison du fait qu'ils ne sont pas biodégradables ou seulement partiellement métabolisés pour certains métaux (*Ying et al., 2013*)⁷⁵. À cet égard, certains métaux traces sont potentiellement toxiques pour les plantes (notamment le Cr, l'As, le Cd, le Hg et le Pb), tandis que certains autres, comme le Cu, le Ni et le Zn, ont des fonctions physiologiques mais ne sont nocifs que s'ils s'accumulent en excès ou se transforment en différentes formes. En effet certains ETM se confondent à des oligo-éléments ou éléments mineurs nutritifs.

6.3. Normes des éléments traces métalliques

6.3.1. Normes absolues et normes relatives (tenant compte des propriétés du sol)

⁷⁴ Unes, N.; Ragonezi, C.; Gouveia, C.S.S.; Pinheiro de Carvalho, M.Á.A. Review of sewage sludge as a soil amendment in relation to current international guidelines: A heavy metal perspective. *Sustainability* 2021, 13, 2317. DOI:10.3390/su13042317

⁷⁵ Ying, S. C.; Masue Slowey, Y.; Kocar, B.D.; Griffis, S.D.; Webb, S.; Marcus, M.A.; Francis, C.A.; Fendorf, S. Distributed microbially - and chemically-mediated redox processes controlling arsenic dynamics within Mn-/Fe-oxide constructed aggregates. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2013, 104, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.020>

Tableau 15: Valeurs seuils des éléments traces métalliques dans les boues au niveau de quelques pays

Élément (mg kg ⁻¹)	Canada – Ontario ⁷⁶ /reprises par IMANOR	Allemagne ⁷⁷	Belgique ⁷⁸	Espagne ⁷⁹	USA Classe A ⁸⁰	Qatar ⁸¹	UE ⁸²	Tunisie ⁸³	Jordanie ⁸⁴	France ⁸⁵	Oman ⁸⁶
As	14								41		
Zn	220	1500	100 ??	2500 - 4000	2800	2500	2500-4000	2000	2800	3000	3000
Cu	100	850	2000	1000 (pH < 7) 1750 (pH > 7)	1500	1000	1000-1750	1000	3000	1000	1000
Co	20										
Cr	120	120	500	1000-1500	1200	300	1000	500	900	1000	1000
As					41	10	-	-		-	-
Cd	1,6	3	10	20 (pH < 7) 40 (pH > 7)	39	20	20-40	20	40	20	20
Pb	60	130	500	750 (pH < 7) 1200 (pH > 7)	300	300	750-1200	800	840	800	1000
Hg	0,5	2	10	25	17	10	16-25	-	17	10	10
Ni	32	100	100	300 (pH < 7) 4 (pH > 7)	420	200	300-400	200	300	200	300
Se	1,6				36	50	-	-	100	-	50
Mo	4								75		

⁷⁶ Mokni-Tlili, S.; Hechmi, S.; Ouzari, H.I.; Mechergui, N.; Ghorbel, M.; Jedidi, N.; Hassen, A.; Hamdi, H. Co-occurrence of antibiotic and metal resistance in long-term sewage sludge-amended soils: Influence of application rates and pedo-climatic conditions. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2023, 30, 26596–26612

⁷⁷ Ordonnance sur les boues d'épuration, publié en 1992 (actualisée en 2000)

⁷⁸ Article 6 de l'arrêté de gouvernement de Wallon, Belgique ; article 11 de l'arrêté de 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles,

⁷⁹ Décret royal 1310/ 1990 du 29 octobre sur l'utilisation des boues d'épuration en agriculture.

⁸⁰ UnitedStatesEnvironmentalProtectionAgency.AGuideforLandApplifiersontheRequirementsoftheFederalStandardsfor

the Use or Disposal of Sewage Sludge, 40 CFR Part 503. In *Land Application of Sewage Sludge; Technical Report; United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 1994; 59p.*

⁸¹ Qatar Construction Specifications (QCS). Part-01: Landscape Planting. 2014. Available online: <https://www.scribd.com/document/328683307/QCS-2014-pdf>

⁸² CounciloftheEuropeanUnion.CouncilDirective86/278/EECofon the Protection of the Environment, and in Particular of the Soil, When Sewage Sludge is Used in Agriculture; Official Journal of the European Communities; European Union: Brussels, Belgium, 1986; pp. 6–12.

⁸³ Institut National de la Normalisation et de la Propriété Industrielle (INNORPI). Norme Tunisienne NT.106.002RelativeAux

Rejets D'effluents dans le Milieu Hydrique (Protection de L'environnement). Norme Homologuée par Arrêté du Ministre de l'Economie Nationale du 20 Juillet 1989, JORT no 59, Page 1332. Date de Prise D'effet : 1er Octobre 1989. Available on- line: http://www.citet.nat.tn/Portail/doc/SYRACUSE/40964/norme-tunisienne-nt-106-002-norme-tunisienne-nt-106-002-1989-relative-aux-rejets-d-effluents-dans-le?_lg=fr-FR

⁸⁴ Tamimi A. Et al. 2010. Developing a Manual for Management of Sludge and Biosolids at Jordanian Wastewater Treatment (JS 1145/2006)

⁸⁵ AssociationFrançaisedNormalisation.NFU44-095: Organic Soil Improvers — Composts Containing Substances Essential to Agriculture, Stanning from Water Treatment. 2022. Available online: <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/ Sustainability 2023, 15, 6773 23 of 25 nf-u44095/organic-soil-improvers-composts-containing-substances-essential-to-agricult/fa107372/520>

⁸⁶ AbdulKhalik,S.J.;Al-Busaidi,A.;Ahmed,M.;Al-Wardy,M.;Agrama,H.;Choudri,B.S.Theeffectofmunicipalsewagesludge on the quality of soil and crops. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 2017, 6, 289–299

Le tableau 15 illustre la variation des concentrations maximales admissibles de métaux lourds dans les boues dans certains pays et/ou régions. Il est important de signaler que la normalisation des éléments traces dans les boues d'épuration est un processus qui est marqué par plusieurs limitations :

- Les normes sont généralement basées sur les concentrations totales or seule la fraction soluble ou bio - disponible doit être considérée.
- La faiblesse et la ponctualité des travaux de recherche en matière de dynamique d'éléments traces et de leurs effets sur les plantes cultivées. Les résultats sont très souvent contradictoires à cause des variantes expérimentales adoptées en ce qui concerne le type de boue, le type de sol ou l'espèce végétale de la plante testée.
- La grande variabilité des normes proposées par les différents pays (CF en l'occurrence le tableau 15, ci-dessus)
- Les normes présentées ne tiennent pas compte en même temps de tous les paramètres influençant la bio - disponibilité des éléments traces : pH, CEC, texture et matière organique.

Ainsi, nous constatons qu'il y a tendance de relativiser ces valeurs maximales ou valeurs seuils des métaux lourds (ou ETM) en les exprimant en mg/kg de sol sec et en tenant compte notamment du paramètre pH et la texture sol qui détermine respectivement leur biodisponibilité et leur mobilité. Le tableau 16, ci-dessous, compilée par Soudi et Bazza (2006)⁸⁷.

⁸⁷ Soudi, B. et Mohamed Bazza. 2003. Pour la FAO. Traitement et valorisation des boues résiduaires : cas des pays d'Afrique du Nord et du proche - orient. [Options of treatment and valorization of sewage sludge in North Africa and Middle East] – révisée en 2006.

Tableau 16 : Teneurs limites en éléments -traces métalliques dans les sols agricoles (mg/kg sol sec), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse. D'après, OTV (1997)⁸⁸

Pays	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	As	Mo	F	Co	Ti
UE pH 6 à 7	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 75 (a)	50 à 300	150 à 300(a)	-	-	-	-	-	-
France pH > 6	2	150	100	1	50	100	-	300	-	-	-	-	-
Allemagne	1-1.5 (b)	100	60	1	50	100	10	150 à 200 (b)	-	-	-	-	-
Belgique													
– Wallonie pH > 6	1	100	50	1	50	100	-	150 à 200	-	-	-	-	-
– Flandre, sols sableux	1	100	50-75 (d)	1	60-45(d)	50	-	(c)	-	-	-	-	-
– Flandre autres sols	3	150	140	1.5	75	300	-	150 à 225(d) 300	-	-	-	-	-
Danemark		30	40	0.5	15	40	-	100	-	-	-	-	-
Espagne													
- pH < 7	1	100	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
- pH > 7	3	150	210	1.5	112	300	-	450	-	-	-	-	-
Grèce	1 à 3	-	50 à 140	1 à 1.5	30-75	50 à 300	-	150 à 300	-	-	-	-	-
Irlande													
– pH < 7	1	-	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
– pH > 7	1.5	-	175	1.5	45	75	-	225	-	-	-	-	-
Italie	1.5	(e)	100	1	75	100	-	300	-	-	-	-	-

⁸⁸ OTV. 1997. Traiter et valoriser les boues. Collection. Ouvrage collectif OTV. Paris 86240 Ligugé

Luxembourg (f)	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 à 75(a)	50 à 300	-	150 à 300 (a)	-	-	-	-
Pays – Bas	0.8	100	36	0.3	35	85	-	140	29	-	-	-
Royaume Uni												
- Terres labourées (25 cm)	3(h)	40	80(h)	1(h)	50(h)	300(h)	3	200(h)	50	4	500	-
pH 5 à 5.5	3(h)	400	100(h)	1(h)	60(h)	300(h)	3	250(h)	50	4	500	-
pH 5.5 à 6	3(h)	400	135(h)	1(h)	75(h)	300(h)	3	300(h)	50	4	500	-
pH 6 à 7	3(h)	400	200(h)	1(h)	110(h)	300(h)	3	450(h)	50	4	500	-
pH > 7												
Sous pâture (7.5 cm)	3.5(i)	600	130	1.5	80	300	5	300	50	4	500	-
pH 5 à 5.5	3.5(i)	600	170	1.5	100	300	5	420	50	4	500	-
pH 5.5 à 6	3.5(i)	600	225	1.5	125	300	5	500	50	4	500	-
pH 6 à 7	3.5(i)	600	300	1.5	180	300	5	750	50	4	500	-
pH > 7												

(a) valeurs peuvent être augmentées de 50 % si le pH du sol > 7 ;

(b) Si sols sableux ayant une teneur en MO < 5 %, les limites en Cd et en Zn sont de 1 et 150 mg/kg MS, sinon de 1.5 et 200 mg/kg;

(c) Si sols sableux ayant une teneur en matière organique < 5 %, la limite est de 150 mg/kg MS, sinon, elle est de 200 mg/kg MS;

(d) Si le pH du sol est > 7, la teneur limite en Cu, Ni et Zn est respectivement égale à 75, 45 et 225 mg/kg de sol sec ;

(e) Test de Bartlett et James (1988) pour estimer la capacité du sol à oxyder Cr (III) en Cr (VI) : si la quantité mesurée > ou égale à 1*mole de Cr (VI), le sol est déclaré impropre à recevoir les boues;

(f) même que la Directive UE;

(g) Il s'agit de " d'un sol de bonne qualité" très riche en M.O avec au moins 25 % d'argile;

(h) Valeurs réglementaires du S.I n° 1263 (1989);

(i) 3 mg/kg si prairies pâturées, 5 mg/kg si prairies temporaires destinées à la fénaison ou à l'ensilage;

(*) Extrait acide nitrique; (**) extrait nitrate de sodium; (***) Teneur hydrosoluble.

D'autres normes relativement plus anciennes et mettant en exergue l'importance du paramètre pH sont rapportées dans le tableau 17. Ces normes précisent également le taux annuel maximum à ne pas dépasser sur une période de 10 années.

Tableau 17 : Concentrations maximales permises des Éléments Potentiellement Toxiques (EPT) dans le sol après application des boues résiduaires et taux annuel maximum d'addition (Département de l'Environnement, Royaume Uni, 1989)⁸⁹

EPT	Concentration maximale permise (mg/kg matière sèche)				Taux annuel maximum d'addition des EPT au sol durant une période de 10 ans (kg/ha) ³
	pH ¹ 5.0 < 5.5	pH ¹ 5.5 < 6.0	pH 6.0-7.0	pH ² > 7.0	
Zn	200	250	300	450	15
Cu	80	100	135	200	7.5
Ni	50	60	75	110	3
Cd	3 ⁵				0.15
Pb	300				15
Hg	1				0.1
Cr	400				15
*Mo⁴	4				0.2
*Se	3				0.15
*As	50				0.7
*F	500				20

* Ces normes ne sont pas sujettes à la Directive 86/278/EEC

¹ Pour les sols ayant un pH dans la gamme de 5.0 < 5.5 et 5.5 < 6.0 les concentrations permises en Zn, Cu, Ni et Cd seront révisées lorsque leurs effets sur les cultures et les animaux d'élevage sont complètement élucidés

² L'augmentation de la concentration de EPT dans les sols à pH supérieur à 7 est appliquée seulement lorsque la teneur du sol en carbonates de calcium est supérieure à 5 %

³ Le taux annuel d'addition de EPT est déterminée par la moyenne sur une période de 10 ans

⁴ Le niveau de sécurité de Mo est de 4 mg/kg. Dans cette situation, il faut tenir compte de la concentration en molybdène natif du sol

⁵ Pour un pH supérieur ou égal à 5

D'autres normes concernant les principaux éléments traces métalliques rencontrés dans les boues sont adoptées pour l'estimation des doses évitant le dépassement des valeurs seuils (Tableau 18). Au lieu du pH, ces normes considèrent la Capacité d'Échange Cationique (CEC) du sol qui renseigne sur sa capacité d'adsorption et de chélation des métaux lourds dans les complexes organo - minéraux (Complexe argilo-humique).

⁸⁹ Department of the Environment. (1989) Code of Practice for Agricultural Use of Sewage Sludge. Her Majesty's Stationery Office, London.

Tableau 18: Valeurs cumulatives limites pour les principaux métaux lourds applicables aux sols cultivés en fonction de la CEC*(d'après US. EPA, 1977)

Métal	Teneur cumulative dans le sol en Kg/ha) en fonction de la CEC		
	CEC < 5	5 < CEC < 15	CEC > 15
Pb	560	1120	2240
Zn	280	560	1120
Cu	140	280	560
Ni	140	280	560
Cd	5	10	20

*Capacité d'Échange Cationique exprimée en méq/100 g de sol et pour des valeurs de pH du sol maintenues supérieures à 6.5

On en déduit que dans les sols de texture sableuse, ayant généralement une CEC faible, des valeurs cumulatives plus faibles sont tolérées que dans les sols plus argileux de CEC plus élevée et donc de capacité d'adsorption plus importante. Ces normes ne sont valables que dans les sols ayant un pH supérieur à 6.5. En effet, la plupart des métaux lourds sont solubles et donc toxiques à des pH acides. Lorsque le pH est basique, la plupart de ces métaux précipitent et deviennent faiblement réactionnels.

Étant donné le lien existant entre la CEC et la teneur en argile, d'autres normes plus simples sont basées sur la classe texturale du sol (Tableau 19). Toutefois, ces normes demeurent critiquables dans la mesure où la CEC dépend également de la nature minéralogique des argiles.

Tableau 19: Quantités maximales (en kg/ha) pouvant être accumulées dans les sols ((Baker et al., 1984)⁹⁰

Métal	Classe texturale du sol		
	Sablo-limoneux et limon-sableux	Sableux fin – limoneux, sableux très fin limoneux, limoneux	Argilo limoneux, sablo-argilo-limoneux, sablo – argileux et argileux
Cd	0.5	0.5	5
Zn	10	30	60
Cu	5	14	30
Ni	2	6	10
Pb	20	60	110
Cr	20	60	110

⁹⁰ Baker D. F., Bouldin D.R., Elliott H.A., and Miller J.R. (1985). Criteria and recommendation for land application of sludges in the Northeast. Bulletin 851. PA State Univ. Agr. Exp. Stat., University Park, PA. Cardwell, D.H., R.E. Erwin, and H.

6.3.1. Tentatives d'adaptation des normes au Maroc et aux pays de MENA

Selon Soudi et Bazza (2006), il a été recommandé de considérer la notion de Teneur Limite Cumulative (TLC) dans le sol. En effet, la teneur des éléments traces dans les boues est une donnée qui détermine la dose d'application en vue de respecter la norme TLC. Il est clair qu'une boue assez riche en éléments traces rétrécit les possibilités de sa valorisation.

Comme il a été signalé auparavant, les normes présentées ne tiennent pas compte en même temps des facteurs déterminant la bio -disponibilité des métaux lourds. Ces facteurs sont : le pH, la CEC, la texture et la teneur en matière organique. Sachant que la valeur de la CEC est essentiellement déterminée par la texture (principalement la teneur en argile) et la matière organique, les deux seuls paramètres pH et CEC peuvent être considérés dans les tentatives de normalisation (Soudi et Bazza, 2006).

La plupart des sols d'Afrique du Nord et du Moyen Orient, à l'exception de quelques zones isolées, le pH des sols est à dominance neutre à franchement basique. Dans ce contexte, les seuils tolérés peuvent être majorés par rapport à la plupart des valeurs limites des pays du nord de l'Europe où les sols sont relativement plus acides.

Sur base du paramètre pH, les valeurs limites proposées en Espagne (Tableau 16) peuvent être adoptées.

Pour le cas des sols sableux, ces normes peuvent être retenues telles quelles et peuvent être majorées de 25 % à 50 % pour les sols de texture argileuse dotée d'une Capacité d'Échange Cationique (CEC) supérieure à 20 ou 30 méq/100 g de sol. En effet, le tableau 19 montre qu'un accroissement de la CEC d'environ 10 méq/100 g permet de doubler les teneurs cumulatives maximales. En effet, ce paramètre détermine l'intensité d'adsorption des cations métalliques.

Sur la base des normes exposées et des considérations développées plus haut, et compte tenu des lacunes en matière de recherche dans le contexte des régions considérées, les Teneurs Limites Cumulatives (TLC) guides, rapportées dans le tableau 20, ci-dessous, sont proposées par Soudi et Bazza (2006).

Tableau 20: Teneurs limites cumulatives des principaux éléments traces dans les sols recevant les boues séchées et/ou compostées (propositions pour les pays du proche orient et d'Afrique du nord)

Élément trace métallique	TLC (mg/kg de sol) pour des sols à pH > 7	
	CEC inférieure à 20 méq/100 g	CEC supérieure à 20 méq/100 g
Cd	3	6
Cr	150	300
Cu	210	410
Hg	1.5	3
Ni	112	224
Pb	300	600
Zn	450	900

Les valeurs de la première colonne correspondent aux normes espagnoles pour des sols à pH > 7.

Les valeurs de la seconde colonne sont le double de la première colonne selon une interpolation des normes rapportées par US. EPA (1977).

A titre de comparaison, le tableau 21, ci-dessous rapporte les normes tunisiennes enregistrées NT 106.20 (2002), exprimées en termes de concentration totale maximale admissible (CMA) et en termes de flux maximum cumulé (FMC) après 10 années. Ces normes ne considèrent pas le pH des sols tunisiens qui est, comme pour le cas des sols de l'Afrique du Nord, est en moyenne neutre à basique.

Tableau 21 : Normes tunisiennes d'éléments traces métalliques

Éléments traces métalliques	CMA (mg/Kg de MS de boue)	FMC (g/m ²)
Cd	20	0.06
Cr	500	3.00
Cu	1000	3.00
Hg	10	0.03
Ni	200	0.60
Pb	800	3.00
Zn	2000	9.00

Certaines normes signalées dans le tableau 14, notamment celles du Royaume Uni, basées sur des profondeurs fixes du sol ne semblent pas être défendables. En effet, un labour profond, généralement recommandé pour les sols recevant des applications de déchets, permet de diluer les concentrations en métaux lourds dans la masse du sol.

6.4. Normes des Composés Traces Organiques (CTO)

En plus des éléments traces métalliques, il y a des composés traces organiques qui menacent la santé publique ainsi que l'environnement. La réglementation concerne deux

principales familles : les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP et les polychlorobiphényles PCB.

On se propose ici de relater les réglementations française et allemande⁹¹, dans les tableaux 22 et 23.

Tableau 22 : Valeurs limites des CTO dans les boues en France⁹²

Composés de traces organiques	Valeur limite dans les boues (mg/Kg de MS)		Flux maximum cumulé, apporté par les boues en 10 ans (mg/m ²)	
	En cas général	Sur pâturage	En cas général	Sur pâturage
Total des 7 principaux PCB (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)	0.8	0.8	1.2	1.2
Fluoranthène	5	4	7.5	6
Benzo(b)fluoranthène	2.5	2.5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	1.5	3	2

Tableau 23: Les valeurs limites des CTO dans les boues en Allemagne⁹³

Éléments traces organiques	Concentration totale maximale admissible en mg/kg de MS
PCB	0,1 par congénère
Dioxine / furane	30 ng
AOX	400
B(a)P	1
PFT (PFOA + PFOS)	0,1

6.5. Normes des agents pathogènes

Peu de pays européens disposent de réglementations spécifiques aux agents pathogènes pour l'utilisation des boues en agriculture. En Espagne, par exemple, on s'appuie sur les prescriptions concernant les agents pathogènes, de l'arrêté du 28 mai 1998 sur les engrais et les appliquent sur les boues d'épuration (Tableau 22).

Par contre, en France, l'Article 16 de l'arrêté de 8 janvier 1998 relatif aux les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles rapporte les concentrations maximales admissibles (Tableau 24). Aussi, la norme NF U44-095 établit les seuils des agents pathogènes et des impuretés admissibles dans le compost des boues d'épurations (Tableaux 25 et 26).

⁹¹ European Communities 2001. Disposal and recycling routes for sewage sludge.

⁹² Annexe I de l'arrêté de 8 janvier 1998 relatif aux les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles

⁹³ Ghariani. F., et al.. 2006. Plan d'action pour la gestion des boues de stations d'épuration, Tunisie

Tableau 24: Concentrations maximales admissibles dans les boues d'épuration utilisées en agriculture en Espagne, article 10 de l'arrêté du 28 mai 1998 sur les engrais.

Agent pathogène	Concentrations maximales admissibles
Salmonelles	Absence dans 25 g de matière fraîche
Escherichia coli	10^3 NNP/ g

NNP : Nombre le Plus Probable

Tableau 25 : Concentrations des agents pathogènes admissibles dans les boues en France

Agent pathogène	Valeur limite contenue dans les boues
Coliformes	Absence
Salmonelles	<8 NPP/10g MS
Œufs d'Helminthes	<3 NPPUC/10g MS
Entérovirus	$<3/10$ gMS

NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques

Tableau 26: Concentrations maximales des agents pathogènes admissibles dans le compost des boues selon la norme française NF U44-095 (2002)

Agent pathogène	Concentrations maximales admissibles	
	Toutes cultures sauf maraîchères	Cultures maraîchères
<i>Escherichia coli</i>	10^4 /g M.B	10^3 /g M.B
<i>Clostridium perfringens</i>	10^3 /g M.B	10^2 /g M.B
Entérocoques	10^5 /g M.B	10^5 /g M.B
Œufs d'Helminthes (variables)	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B
Salmonelles	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B
Entérovirus	-	-
<i>Listeria monocytogenes</i>	Absence dans 1 g de M.B	Absence dans 25 g de M.B

MB : matière brute

Comme il a été exposé auparavant, les techniques de traitement adaptées aux pays du proche orient et d'Afrique du Nord et permettant une suppression des pathogènes, sont le séchage naturel prolongé et/ou le compostage des boues. Toutefois, pour plus de prudence, il est jugé utile d'associer aux normes des éléments traces métalliques des normes de parasites.

Selon les directives françaises (Arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles), les seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiénisées sont rapportés dans le tableau 27, ci-dessous.

Tableau 27: Seuils de référence pour les teneurs en micro-organismes dans les boues (Directives françaises selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles)

Salmonelles	Entérovirus	Oeufs d'helminthes pathogènes viables
< 8 NPP/10 g MS	< 3 NPPUC/10 g MS	< 3/10 g MS

NPP : Nombre le Plus Probable

NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques

MS : Matière Sèche

• Cas particuliers de modulation des normes dans le contexte des pays arides

Le contexte climatique des régions du proche orient et d'Afrique du nord, généralement semi - aride et aride, demeure favorable à cette pratique. L'espace requis ne fait pas non plus défaut dans ces régions.

Sur le plan sanitaire, il a été montré par des essais réalisés au Maroc et plus précisément à Ouarzazate (Xanthoulis, 1996)⁹⁴, que les oeufs de parasites ont complètement disparus des boues après 8 mois de séjour dans les lits de séchage (figure 20). La connaissance du niveau de contamination helminthique des boues demeure une priorité si on désire les utiliser en agriculture.

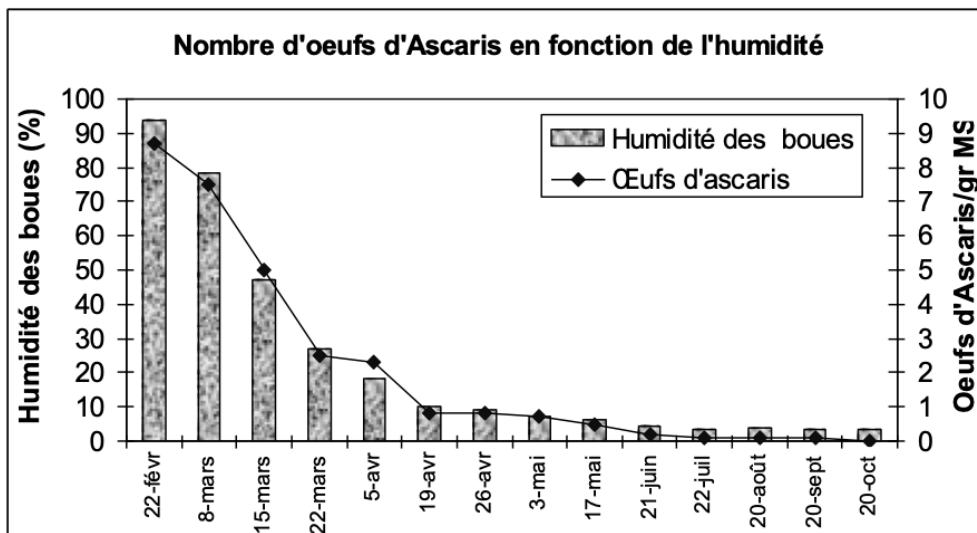


Figure 19: Evolution de l'humidité des boues et du nombre d'oeufs d'Ascaris

⁹⁴ Xanthoulis D. (1996). Rapport de synthèse : Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles, Ouarzazate, Maroc. PNUD, FAO, Département de l'Agriculture – Maroc – Maroc

Il est aussi à signaler que les bactéries et les virus n'ont pas une grande survie dans le sol à cause de leur faible compétitivité (Elliott and Ellis, 1977)⁹⁵. Leur survie dépend également de plusieurs facteurs édaphiques et environnementaux : la température, l'ensoleillement, l'humidité, la matière organique du sol, le pH et la texture du sol (Watson, 1980⁹⁶; Pahren *et al.*, 1979⁹⁷).

Le tableau 16, ci-dessous, relate des ordres de grandeur de la durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante.

Tableau 28 : Durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante (Doran *et al.* 1976⁹⁸)

Organisme	Durée de survie (en jours)	
	Surface de la plante	Dans le sol
Bactéries		
Salmonelle		7-168
Shigella	1-42	
Mycobacterium	1-7	90-450
Leptospira	10-49	15-43
Erysipelothrix		21
Virus		
Entérovirus		27-170
Poliovirus	4	32
Parasites		
Entamoeba histolytica	3	8
Ascaris lumbricoides ova	27-35	2-6 <u>ans</u>

Une tentative de faire le point des travaux sur la survie des bactéries et des virus dans le sol, après application des boues d'épuration, permet d'émettre les principaux constats suivants :

- La période d'application conditionne de manière significative la survie des virus. Le temps de survie varie de quelques jours pour une application estivale, à trois mois pour une application hivernale ;
- Les températures élevées au niveau de la surface du sol et la dessiccation sont des facteurs importants d'élimination des virus et des bactéries ;
- La texture du sol, et par conséquent la surface spécifique ainsi que la CEC, favorisent l'adsorption des virus ce qui augmente leur survie tout en les gardant hors hôtes ;

⁹⁵ Elliot L.F. and Ellis J.R. (1977). "Bacterial and Viral Pathogens Associated with Land Application of Organic Wastes." Journal of Environmental Quality 6:245-51.

⁹⁶ Watson D.C. (1980). "The Survival of Salmonellae in Sewage Sludge Applied to Arable Land." Water Pollution Control 79:11 - 18.

⁹⁷ Pahren H.R., Lucas J.B., Ryan J.A., and Dotson G.K. (1979). "Health Risks Associated with Land Application of Municipal Sludge." Journal of the Water Pollution Control Federation 51 :2588-2601.

⁹⁸ Doran J.W., Ellis J.R. and McCalla T.M. (1976). Microbial concerns when wastes are applied to land. In : Land as waste management alternatives. R.C. Loehr (ed.). Ann. Arbor Sci. Publ., Inc., Ann Arbor, MI. p. 343-361

- La contamination des eaux souterraines par les virus est possible dans les sols de texture très grossière.

On peut déduire de ce qui précède que les conditions climatiques, notamment la température et l'ensoleillement, dans la région d'Afrique, du Nord dont le Maroc et du Proche Orient sont très favorables à l'élimination des bactéries et des virus.

7. Cadre réglementaire et institutionnel au Maroc : analyse de situation et recommandations d'amélioration

7.2. Cadre réglementaire

Les boues issues des stations d'épuration des eaux usées domestiques sont considérées comme déchets non dangereux selon le Catalogue marocain des déchets (CMD), promulgué par le Décret n° 2-07-253 du 14 Rejeb 1429 (18 juillet 2008) portant classification des déchets et fixant la liste des déchets dangereux, et elles sont enregistrées sous le code 190805 dans la rubrique numéro 19 : « **déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel** ».

De ce fait, les boues sont régies par les prescriptions de la loi 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination, qui a pour but la prévention et la protection de la santé humaine et de l'environnement contre les effets nocifs des déchets.

Selon l'article 3 de ladite loi, qui définit les différents types de déchets, les boues ne sont pas évoquées d'une manière claire et précise, leur affectation à une des catégories citées dans ledit article demeure difficile. Aussi, la définition attribuée aux déchets assimilés aux déchets ménagers, dans le même article : « ***tout déchet provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales et qui par leur nature, leur composition et leurs caractéristiques, sont similaires aux déchets ménagers*** », reste vague et générale.

Néanmoins, dans la mesure où ces boues présentent des caractéristiques assez semblables aux déchets organiques des ménages et qu'elles ne devront pas en principe contenir des substances toxiques ou dangereuses (sauf en cas d'intrusion des rejets industriels dans le réseau d'assainissement), celles-ci pourraient être assimilées à des déchets ménagers. Or, ce flux de déchets n'est pas pris en considération dans les plans provinciaux de gestion des déchets ménagers et assimilés, et leur acceptation en décharges municipales n'est pas toujours évidente.

Dans le même sens, et selon l'article 28 de la même loi, le texte juridique incite à la valorisation des déchets biodégradables. Cependant, il ne considère que les déchets agricoles et exclut les boues urbaines.

Les modes de gestion des boues sont régies, directement ou indirectement, par les textes juridiques suivants :

Loi 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination : elle présente un classement des décharges suivant les différentes catégories de déchets, elle propose aussi d'autres voies d'élimination comme la valorisation énergétique ou agricole mais d'une manière générique et sans aucune précision pour les boues d'épuration.

Le Dahir 25 aout 1914 et l'arrêté viziriel du 13 octobre 1933 pris pour son application, portant réglementation des établissements insalubres, incommodes et dangereux, et classe les dépôts de boues et d'immondices dans la première classe en raison des inconvénients qu'ils pourraient engendrer.

La loi 36-15 sur l'eau apporte un renouveau par rapport à l'édition 10-95 en intégrant des dispositions spécifiques pour la gestion des eaux usées et des boues d'épuration. Le chapitre V de cette loi, consacré à la valorisation et à l'utilisation des eaux non conventionnelles, souligne l'importance du traitement des boues d'épuration avant toute utilisation ou élimination. L'article 70 stipule que les boues d'épuration des eaux usées doivent faire l'objet d'un traitement, dont les modalités sont fixées par voie réglementaire en fonction du type, des caractéristiques et des usages des boues. De plus, l'article 71 précise que les gestionnaires ou propriétaires des stations d'épuration qui procèdent au traitement et à la valorisation des boues peuvent bénéficier d'un soutien financier de l'administration et des agences de bassin hydraulique, selon des conditions fixées par voie réglementaire.

Le Dahir n° 1-15-85 du 20 Ramadan 1436 (7juillet 2015) portant promulgation de la loi organique n° 113 -14 relative aux communes : l'assainissement liquide et solide et les stations de traitement des eaux usées, ainsi que le traitement des déchets et leur valorisation, figurent parmi les compétences propres des communes (Article 83). Ils sont aussi une des missions des établissements de coopération intercommunale (article 134).

La fixation des redevances est délibérée par le conseil communal (article 92), mais n'est exécutoire qu'après le visa du gouverneur de la préfecture ou la province (article 118).

Dahir n° 1-20-78 du 18 Hija 1441 (8 août 2020) portant promulgation de la loi n° 49-17 relative à l'évaluation environnementale : cette loi stipule que tout projet d'ouvrage, d'infrastructures dont notamment les installations de stockage ou d'élimination des

déchets quel que soit leur nature et leur mode d'élimination ainsi que les stations d'épuration des eaux usées et leurs ouvrages annexes, doivent faire l'objet d'une Étude d'impact sur l'Environnement.

Bien que la valorisation des boues constitue une option durable et intéressante permettant de donner une deuxième vie aux boues, le cadre réglementaire marocain manque de textes spécifiques en la matière ce qui entrave le développement des filières de valorisation. En effet, en absence de normes valorisation verte (épandage agricole, réhabilitation des sols dégradés, amendement des sols forestiers et des espaces verts, etc.), et face au refus de mise en décharge, les boues s'accumulent dans les STEP ou dans leur environnement immédiat et constituent une source de nuisances olfactives et environnementales pour les riverains⁹⁹.

Ainsi, l'opérationnalisation des voies de valorisation est conditionnée par l'établissement d'un cadre juridique et normatif. A juste titre, il est à signaler qu'en matière de normalisation de l'utilisation des boues comme produit d'amendement organique des sols, l'Institut Marocain de Normalisation (IMANOR) a récemment établi la Norme Marocaine NM ISO 19698 : 2023. Cette norme, qui s'aligne sur la norme internationale ISO 19698 :2020, fournit des recommandations pour l'utilisation bénéfique des boues d'épuration, issues du traitement des eaux usées municipales et industrielles, sur les terres agricoles et dans la réhabilitation des sites dégradés.

La norme met en avant les nombreux avantages de l'utilisation des boues d'épuration, notamment l'amélioration de la qualité du sol, l'apport en nutriments pour les plantes, la séquestration du carbone et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Elle souligne également les nuisances et les risques potentiels associés à cette pratique, tels que les odeurs, l'attraction de vecteurs de maladies, la présence de pathogènes et d'éléments traces, et les impacts environnementaux.

La norme détaille les critères de qualité que doivent respecter les boues d'épuration avant leur utilisation, en les classant en deux groupes en fonction de leur niveau de traitement et de leur teneur en contaminants. Elle insiste sur l'importance du traitement adéquat des boues pour réduire les risques sanitaires et environnementaux, ainsi que sur la nécessité d'une surveillance régulière des boues et des sols récepteurs.

La norme fournit des recommandations spécifiques pour l'utilisation des boues d'épuration dans l'agriculture, en tenant compte des besoins des cultures, des risques de contamination et de la protection des ressources en eau. Elle aborde également

⁹⁹SOUFI Brahim 2015, *Gestion des boues générées par les STEP- ONEE - branche eau : diagnostic de la situation actuelle et ébauche d'une vision d'amélioration des performances.*

l'utilisation des boues d'épuration dans la réhabilitation des sols, en soulignant leur rôle dans la restauration de la fertilité et de la structure des sols dégradés.

Enfin, la norme insiste sur l'importance de l'élaboration et de la gestion de programmes d'utilisation des boues d'épuration, en impliquant les communautés locales et en assurant la transparence et la qualité tout au long du processus. Elle souligne la nécessité d'une évaluation globale des risques et des bénéfices potentiels, ainsi que de la mise en place de mesures d'atténuation appropriées pour protéger l'environnement et la santé publique.

Cette norme constitue certes une avancée intéressante mais il va falloir, tout de même, promulguer un texte juridique qui réglemente cette norme, et qui définit les conditions d'élimination, de traitement et de valorisation des boues notamment en agriculture.

En somme, il est recommandé de clarifier le « statut » de boues dans la loi 28-00 et élaborer des textes juridiques fixant les normes d'élimination, de traitement et des conditions de valorisation des boues et définissant : (i) les conditions de production et de livraison de boues pour différents circuits d'utilisation (ii) le contenu des cahiers de charges qui stipulent et fixent les conditions d'utilisation des boues provenant des ouvrages de traitement des eaux usées ; et (iii) les conditions de stockage, de transport et d'utilisation des boues. Ces textes (Décret et/ou arrêtés conjoints) devront intégrer également le principe de traçabilité des boues. Ces textes capitaliseront en partie sur la NM ISO 19698 : 2023.

Aussi il va falloir accélérer la promulgation du texte d'application relatif à la définition des valeurs limites de rejet dans le réseau public d'assainissement pour éviter l'intrusion des polluants industriels dans les réseaux et les ouvrages d'épuration des eaux usées. A cet effet, l'Article n° 109 de la loi sur l'eau 36-15 stipule que : "Aucun déversement des eaux usées industrielles dans un réseau public d'assainissement ne peut être effectué sans autorisation préalable accordée par le gestionnaire dudit réseau. Cette autorisation, dont la durée ne peut dépasser 20 ans, ne peut être délivrée que si le déversement est conforme aux valeurs limites de rejet dans le réseau public d'assainissement"; et que "l'autorisation de déversement précise, notamment les caractéristiques que doivent présenter les eaux usées industrielles pour être déversées et les conditions de suivi de ces caractéristiques. Elle fixe, également, le cas échéant, les mesures de suivi à prendre en période de forte précipitation, de dysfonctionnement ou d'arrêt momentané du système de traitement, du réseau d'assainissement ou, s'il y a lieu, du dispositif de prétraitement des eaux usées industrielles déversées".

A titre de benchmark, les statuts des boues dans quelques pays est développé ci-après :

La gestion des boues, dépend de leur statut défini par la loi. Ce statut attribué par les textes juridiques permet d'éclaircir les voies d'élimination et de valorisation. Étant des résidus,

sous-produits des procédés d'épuration des eaux usées, les boues sont généralement considérées comme déchets urbains ou municipaux. Leur composition chimique permet de les classer en déchets dangereux ou non dangereux.

Par ailleurs, grâce à leur valeur nutritive, les boues représentent une matière fertilisante potentielle. Afin de pouvoir en profiter en agriculture et de sécuriser leur usage, les boues sont stabilisées et traitées par déshydratation, séchage naturel, compostage, etc. Le tableau 29, ci-dessous, synthétise les statuts attribués aux boues d'épuration dans différents pays.

Tableau 29: Statuts des boues selon les pays

Statut	Pays	Texte réglementaire
Déchets	Union européen	Décision du 03/05/00 de la Commission des Communautés Européennes établissant une liste de déchets, les boues figurant dans la rubrique n° 19 08 05 « <i>boues provenant du traitement des eaux usées urbaines</i> ».
	Allemagne	Étant des déchets, les boues sont soumises à la loi relative aux cycles des matières et à la gestion des déchets, qui stipule trois taches : l'évitement des déchets, la valorisation des déchets et leur élimination ¹⁰⁰ .
Déchets urbains	France	Le statut déchets est confirmé par ces deux textes : L'article R211- 27 du Code de l'environnement, et l'article 2 du Décret 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées, La notion de déchets urbains a été utilisée plusieurs fois en référant aux boues d'épuration des eaux usées urbaines ¹⁰¹¹⁰² .
	Suisse	Loi fédérale sur la protection de l'environnement, article 31b Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED) du 4 décembre 2015, article 10
Déchets particuliers	Tunisie	Loi 96 – 41 du 10 juin 1996, Article 24 en précisant que les modalités de leur gestion seront fixées par des décrets ultérieurs, cas du décret n° 13 du 3 janvier 2007
Supplément d'engrais, matières fertilisantes	Canada	Les boues d'épuration des eaux usées sont traitées et réutilisées comme des amendements fertilisants (biosolides), ou utilisées séchées comme une matière première pour la fabrication des engrais ou amendements fertilisants : biofertilisants ¹⁰³
	France	Code rural, article L255-1, étant une matière qui assure et améliore la nutrition des végétaux.

¹⁰⁰MdE Ministère délégué de l'environnement 2010. Étude pour l'Élaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Épuration des Eaux au Maroc

¹⁰¹Tezcan M. 2013. Élimination des boues d'épuration en Suisse

¹⁰²SOeS (Service de l'observation et des statistiques) 2014. L'épandage des boues de stations d'épuration urbaines et industrielles sur les sols agricoles (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1122/lepandage-boues-stations-depuration-urbaines-sols.html>)

¹⁰³CMM (Communauté Métropolitaine de Montréal), CIRAIG (Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services). 2007. Valorisation des boues d'épuration municipales

7.3. Cadre institutionnel

Les acteurs institutionnels concernés, directement ou indirectement par la problématique des boues sont les suivants :

- **Ministère de l'intérieur** : ce ministère pilote et coordonne la mise en œuvre du Pnam (mise en place des STEP et contrôle et évaluation de leurs performances, conception et réalisation des projets de réutilisation des EUE et projets de valorisation des boues en collaboration avec les acteurs concernés). Aussi, de par leur responsabilité communale en matière d'assainissement liquide et solide, les collectivités territoriales administrées au niveau central par la Direction Générale des Collectivités Territoriales (DGCT) sont aussi parties concernées, au premier plan, par la gestion des boues. En effet, bien que dans la majorité des cas, le service d'assainissement soit soumis au mode de gestion déléguée, les collectivités territoriales demeurent les parties prenantes concernées par l'assainissement et la gestion des déchets produits dans leurs territoires, y compris les boues. Rappelons aussi, qu'étant une institution qui pilote la gestion des déchets ménagers et la mise en place de décharges contrôlées, dans certains cas, et à défaut de réglementation ou d'opportunités des options de valorisation, les opérateurs de l'assainissement, peuvent éliminer les boues vers des décharges contrôlées ou des centres d'enfouissement moyennant des arrangements au cas par cas.
- **Ministère de la transition énergétique et du développement durable/ Département du Développement Durable (DDD)** : de par ses attributions transversales, et notamment en matière d'élaboration des instruments réglementaires pour la protection de l'environnement, ce Département est appelé à élaborer des textes et des normes d'élimination et de valorisation des boues pour atténuer la pression sur les différentes composantes environnementales, et pour sécuriser les usages possibles. Ce Département est également chargé des évaluations environnementales des programmes et projets et de contrôle et d'inspection environnementale.
- **Ministère de l'Équipement et de l'Eau / Direction Générale de l'hydraulique** : ce département est aussi concerné par les boues étant donné que leurs rejets ou leurs dépôts sporadiques peuvent occasionner une dégradation des ressources en eau. Aussi, comme il est mentionné plus haut, la Loi sur l'eau 36-15, apporte des dispositions spécifiques ont été dédiées aux boues. Les Agences des Bassins Hydrauliques (ABHs) sont également concernées de par leur attribution en matière de protection des ressources en eau et de la lutte contre la pollution hydrique.

- **Ministère de la santé** : représenté par la DELM (Direction de l'Épidémiologie et de Lutte contre les Maladies), ce département assure la surveillance sanitaire des usages des boues. L'Institut National d'Hygiène est aussi responsable de la proposition des normes en matière de biologie sanitaire.
- **ONEE-Branche eau, régies, concessionnaires privés et communes** : qui représentent les producteurs de boues dans les différentes stations d'épuration des eaux usées implantées au Maroc.
- **Département de l'Agriculture et ses structures déconcentrées** (Directions Régionales Agricoles (DRAs) et Directions Provinciales de l'Agriculture (DPAs) : ces entités auront des rôles cruciaux à jouer en matière de gestion d'une valorisation sécurisée des boues, d'établissement des plans d'épandage et en matière d'encadrement des usagers. Deux autres entités, relevant de ce département ont des rôles complémentaires importants à jouer : l'Office National de Sécurité Sanitaire des Produits Alimentaires (ONSSA) est chargé entre autres d'analyser les risques que peuvent engendrer les produits alimentaires sur la santé humaine et animale et de contrôler la qualité des intrants agricoles.

Le dispositif de gouvernance mérite ainsi d'être amélioré pour pouvoir, non pas seulement garantir la viabilité des STEP s et de leurs performances et d'atténuer les nuisances sanitaires et environnementales, mais aussi pour réussir une valorisation sûre et durable des boues notamment en agriculture et d'inscrire ces sous-produits d'assainissement (eaux usées et épurées et boues) très précieux dans une approche d'économie circulaire.

Les principales mesures institutionnelles qui peuvent être préconisées sont les suivantes :

- *Mise en place de conventions – cadre réunissant les acteurs et institutions concernées par la gestion des boues dont notamment les communes à travers la Direction générale des Collectivités Territoriales (DGCT) relevant du Ministère de l'Intérieur, les opérateurs de l'assainissement liquide, les structures nationales et décentralisées du Département de l'Agriculture (ONSSA, ONCA, DRAs, DPAs, ORMAVAS, etc.), et le Département du Développement Durable (DDD) avec ses Directions Régionales de l'Environnement (DREs). Ces conventions devront définir, à la lumière des attributions des différents acteurs, les arrangements permettant de planifier et de mettre en œuvre les projets de valorisation des EUE et des boues.*
- *Mise en place d'un partenariat spécifique entre les opérateurs de l'assainissement sous la coupole du Ministère de l'Intérieur et le Département de l'Agriculture pour promouvoir la valorisation agricole des boues. Pour ce faire il va falloir institutionnaliser le rôle du Département de l'Agriculture en matière de préparation des plans régionaux de valorisation des boues. Ces plans devront se baser sur : (i) le potentiel de valorisation agricole des boues ; et (ii) la cartographie régionale de l'aptitude des sols à l'épandage des boues en adoptant l'Indice d'Acceptabilité à l'Épandage (IAE) calculé à partir des analyses des sols (Schwartz et al. 2008)¹⁰⁴.*
- *Élaboration et mise en œuvre d'un plan de renforcement des capacités des cadres et techniciens relevant du Département de l'agriculture (ANEF, DRAs, DPAs, ORMVAs, ONSSA, ONCA, etc.)*

Implication des institutions de recherches et techniques spécialisés à l'échelle nationale et régionale dans le suivi et le développement des capacités techniques, opérationnelles, matériels et managériales des institutions en charge de la production et la valorisation des boues. (INRA, IAV, etc...)

¹⁰⁴ Christian Schwartz, J. Thorette, Stéphane Follain. Représentation cartographique nationale d'un Indice cantonal d'Acceptabilité des sols à l'Épandage agricole de boues de stations d'épuration calculé à partir de la Base de Données nationale d'Analyses de Terre. *Étude et Gestion des Sols*, 2008, 15 (1), pp.37-49. Ffhal-01928668f <https://hal.science/hal-01928668/document>

8. Intégration des boues d'épuration en agriculture : bénéfices et gestion des risques

Après l'analyse du cadre réglementation et normatif de valorisation des boues d'épuration en agriculture, il est essentiel de se concentrer sur les bénéfices spécifiques de cette pratique et les risques qui lui sont associés qui doivent être maîtrisés et gérés en vue de maximiser les avantages et éviter les atteintes aux agrosystèmes, à l'environnement et la santé humaine et animale.

8.2. Bénéfices d'application des boues comme produits d'amendement des sols au Maroc

8.2.1. Effets des boues appliquées au sol sur les propriétés du sol

- *Matière organique*

La dégradation des sols au Maroc est un enjeu critique qui menace la durabilité des terres agricoles et, par conséquent, la sécurité alimentaire nationale. Selon Rahoui et al. (2000)¹⁰⁵, la perte de matière organique dans les sols agricoles marocains est alarmante, avec une diminution annuelle estimée entre 0,2 % et 2 % dans les zones arides et semi-arides. Cette perte est principalement attribuée à l'épuisement des réserves organiques en raison de pratiques agricoles intensives, de la surexploitation des terres, et de l'érosion accélérée. Cette réduction de la matière organique des sols compromet sérieusement la fertilité des terres et leur capacité à retenir l'eau, aggravant ainsi la vulnérabilité des sols à la dégradation.

Les travaux de Soudi et Bouabid (2019)¹⁰⁶ soulignent l'importance cruciale de la matière organique pour la fertilité des sols marocains, en particulier dans les régions arides et semi-arides où les teneurs sont déjà relativement faibles. Ils attribuent la perte de matière organique à plusieurs facteurs, notamment la minéralisation intense, favorisée par les températures élevées, la mauvaise gestion des résidus de cultures, et le travail répété des sols. Ces auteurs notent que les sols marocains, bien que fortement dégradés, possèdent un fort potentiel de stockage de carbone qui correspond à un stockage qui comble le déficit entre la situation actuelle et la teneur en carbone organique stable à l'équilibre. Ce potentiel est actuellement sous-exploité en raison de la perte continue de matière organique, ce qui non seulement compromet la fertilité des sols, mais réduit également leur capacité à séquestrer le carbone.

¹⁰⁵ Rahoui M., Soudi B., Badraoui M., Marcoen J.M. 2000. Situation actuelle de la qualité des sols et des eaux dans le périmètre irrigué des Doukkala. Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000, 13-24

¹⁰⁶ Soudi, B. ; R. Bouabid et M. Badraoui. 2019. The Storage of Organic Carbon in Dryland Soils of Africa: Constraints and Opportunities. In: Advanced Book "Soil degradation and restoration in Africa" Edited by Lal Rattan & B.A. Stewart.

Étant donnée la proportion importante de la matière organique dans les boues, sa teneur dans le sol augmente significativement suite à leur application aux sols. De là, toutes les propriétés en relation avec la matière organique s'en trouvent améliorées : la capacité de rétention de l'eau par le sol, la stabilité structurale, la densité apparente, etc. Ces effets sont largement amplifiés dans les sols de texture grossière à sableuse.

Soulignons que la plupart des effets positifs des boues sur les autres propriétés des sols se fait par le biais de la matière organique comme le montre le schéma relationnel suivant (figure 21, (Soudi, 2000)¹⁰⁷).

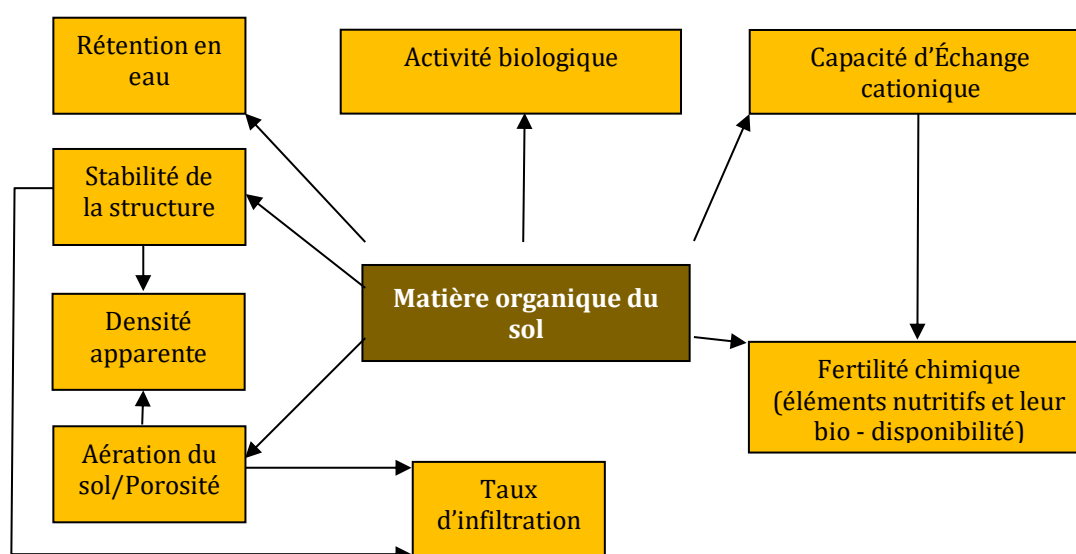


Figure 20 : Effets de la matière organique du sol (les fléchées signifient l'amélioration)

• Le pH du sol

Selon la littérature, l'application des boues aux sols peut induire une diminution (Epstein *et al.*, 1976) ou une augmentation de pH (Silviera and Sommers, 1977)¹⁰⁸. Cet effet semble être lié à la présence dans les boues du carbonate de calcium qui tamponne le pH ou à la production d'acides organiques lors de la première phase de biodégradation des boues. Dans tous les cas, la modification de pH demeure un facteur important qui conditionne la solubilité des métaux lourds.

¹⁰⁷ Soudi B. (2000). *Éléments méthodologiques de mise en place d'un Système de Suivi et d'Évaluation de la qualité des sols sous irrigation : études de cas de Tadla et des Doukkala. Rapport préparé pour la FAO-AGLL.*

¹⁰⁸ Silviera D.J. and Sommers L.E. (1977). "Extractability of Copper, Zinc, Cadmium, and Lead in Soils Incubated with Sewage Sludge." *Journal of Environmental Quality* 6:47-52

- ***La Capacité d'Échange Cationique***

L'addition de doses de boues significativement élevées augmente la capacité d'Échange Cationique du sol (CEC) (Soon, 1981¹⁰⁹ et Epstein *et al.*, 1976¹¹⁰). L'augmentation de la CEC est attribuée à la production de substances humiques chargées négativement qui s'associent avec les colloïdes argileux. Soulignons que l'augmentation de la CEC diminue la biodisponibilité des métaux lourds par leur adsorption sur les sites d'échange.

- ***Les éléments nutritifs***

Les boues, riches en nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore, et le potassium, peuvent jouer un rôle crucial dans l'amélioration du pouvoir alimentaire des sols.

8.2.1. Études de cas

- ***Maroc***

Les essais sur sol argilo-limoneux à Ouarzazate au Maroc (Soudi et Jemali, 1998¹¹¹ et Jemali et Soudi, 1998¹¹²) ont montré que le rendement en matière sèche de Ray Gras d'Italie a augmenté de manière significative suite aux applications des boues séchées. La teneur en matière organique du sol a également augmenté. Le taux de décomposition des boues a été estimé à 60% en moyenne. Le taux apparent de minéralisation de l'azote a été évalué à 44 %.

Les résultats de ces travaux ont aussi révélé que les boues résiduaires issues du lagunage des eaux usées domestiques de la ville d'Ouarzazate possèdent un potentiel significatif en matière de fertilisation agricole. Les études menées, tant en laboratoire qu'en serre, ont démontré que ces boues contiennent une quantité substantielle de matière organique et d'azote potentiellement minéralisable, variant de 74 à 185 mg/kg de sol, qui augmente avec la dose appliquée. Les essais ont également montré que l'incorporation de ces boues dans les sols améliore significativement la production de matière sèche et l'absorption d'azote par le Ray-Grass d'Italie. Les taux de minéralisation de l'azote organique ont été estimés à 51% en conditions optimales de laboratoire et à 49% sous serre, soulignant

¹⁰⁹ Soon Y.K. (1981). "Solubility and Sorption of Cadmium in Soils Amended with Sewage Sludge." *Journal of Soil Science* 32:85-95

¹¹⁰ Epstein E., Taylor J.M., and Chaney R.L. (1976). "Effects of Sewage Sludge and Sludge Compost Applied to Soil on Some Soil Physical and Chemical Properties." *Journal of Environmental Quality* 5:422-26

¹¹¹ Soudi B. et Jemali A. (1998). Valorisation agricole des boues résiduaires : Impact des amendements sur la dynamique de l'azote des sols. In: Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for Small Communities: Mediterranean and European Experiences » Edited by R. Choukr Allah

¹¹² Jemali A. et Soudi B. (1998). Valorisation agricole des boues résiduaires : Valeur fertilisante et efficacité d'utilisation de l'azote par le Ray gras d'Italie. In: Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for small communities: Mediterranean and European Experiences » Edited by R. Choukr Allah

ainsi l'efficacité de ces boues en tant qu'amendement organique pour maintenir et améliorer la fertilité des sols.

- **Algérie**

Les essais conduits sur un sol limono-argileux en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000)¹¹³, ont montré que les boues liquides ont amélioré la stabilité structurale des sols traités grâce aux sucres à métabolisme rapide. Les conductivités hydrauliques saturées les plus élevées sont observées avec les boues liquides (14,2 cm/h) et les boues solides (8,9 cm/h), ce qui traduit des effets bénéfiques sur la structure du sol grâce aux ciments organiques et au calcaire contenus dans ces substrats. Les rendements en blé pour l'ensemble des traitements sont très élevés par rapport à ceux ordinairement enregistrés dans le pays. Les boues solides ont fourni le rendement le plus élevé en paille, ce qui laisse entrevoir, à terme, une augmentation substantielle des résidus de récoltes favorables au statut humique du sol.

- **Tunisie**

Les essais conduits dans la station expérimentale de Cherchef sur sol alluvial calcaire de teneur moyenne en matière organique et de pH basique (Gabteni et Gallali, 1988)¹¹⁴, ont montré que la boue résiduaire de Cherguia constitue une source non négligeable en matière organique facilement minéralisable. Il s'agit là d'une conséquence positive certaine quant à son utilisation dans les sols de la région. La présence des éléments métalliques, cuivre et zinc, dans un milieu enrichi en boue ralentit la minéralisation de la matière organique. Ce ralentissement est d'autant plus important que la concentration en métaux est forte.

On en déduit que l'utilisation des boues en tant qu'amendement organique permet de réaliser une économie en engrais souvent coûteux pour les agriculteurs marocains et de la région.

Les bénéfices de l'application des boues ont été largement documentés dans d'autres contextes arides similaires à celui du Maroc en l'occurrence ceux de l'Espagne et de la Tunisie où des études ont montré que l'ajout de boues peut améliorer significativement le rendement des cultures, y compris des cultures vivrières essentielles telles que le blé

¹¹³ Dridi B. et Zerrouk F. (2000). Apport de boues d'épuration et propriétés d'un sol en Algérie *Cahiers d'Études et de Recherches francophones/agricultures* ; Vol 9, N° 1, p. 68-71

¹¹⁴ Gabteni N. et Gallali T. (1988). Étude expérimentale des interactions entre éléments métalliques et la minéralisation de la matière organique d'une boue résiduaire ajoutée à un sol. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIV, no 3, 1988 : 255-261

et le maïs, en augmentant la matière organique du sol et en fournissant une source durable de nutriments (Antolín et al ; 2005¹¹⁵ ; Diaz, 2013¹¹⁶).

En guise de conclusion on peut dire que l'application des boues d'épuration sur les sols marocains offre une solution prometteuse pour lutter contre la dégradation des terres, notamment la perte de matière organique et la baisse de fertilité, exacerbés par des pratiques agricoles intensives. Les boues, riches en matières organiques et en nutriments essentiels, peuvent améliorer la structure et la capacité de rétention d'eau des sols, ainsi que leur potentiel de stockage de carbone. En plus de soutenir l'agriculture durable, cette pratique contribue à la réhabilitation des sites dégradés, réduit les impacts environnementaux liés à l'élimination des boues et s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire. Alignée sur les politiques environnementales du Maroc, la valorisation des boues d'épuration apparaît comme une stratégie intégrale pour renforcer la résilience des systèmes agricoles et soutenir le développement économique du pays.

Sur le plan environnemental, cette approche de valorisation agricole des boues contribue également à la gestion durable des déchets, en recyclant des matières qui autrement pourraient poser des problèmes environnementaux si elles étaient simplement éliminées dans les décharges (Wiechmann et al. 2013)¹¹⁷. Aussi, l'application des boues peut ainsi jouer un rôle clé dans les efforts nationaux de lutte contre la désertification et de réhabilitation des terres, particulièrement dans les zones où les sols sont les plus vulnérables (Janzen, 2004)¹¹⁸.

Ainsi, dans le cadre de la stratégie nationale "Génération Green" et des autres initiatives de gestion durable des terres au Maroc, l'intégration des boues d'épuration comme amendement des sols pourrait être une approche novatrice pour inverser les tendances actuelles de dégradation des sols, renforcer la résilience des systèmes agricoles, et soutenir la sécurité alimentaire à long terme.

8.2. Risques liés à la valorisation agricole des boues et mesures de leur gestion

Divers types de boues, principalement les boues d'épuration, ont été utilisés comme amendements organiques dans différents pays, que ce soit pour des recherches agro-environnementales ou des productions commerciales. Cependant, les risques environnementaux

¹¹⁵ Antolín, M.C.; Pascual, I.; García, C.; Polo, A.; Sánchez - Díaz, M.J. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crop Res.* 2005, 94, 224–237

¹¹⁶ Lassoued, N.; Bilal, E.; Rejeb, R.; Guénole - Bilal, I.; Khelil, N.; Rejeb, M.; Frédéric, G. Behavior canola (Brassica apus) following a sewage sludge treatment. *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2013, 8, 155–165

¹¹⁷ Wiechmann, B.; Dienemann, C.; Kabbe, C.; Brandt, S.; Vogel, I.; Roskosch, A. *Sewage Sludge Management in Germany; Technical Report; Umwelt Bundesamt (UBA): Bonn, Germany, 2013; 88p.*

¹¹⁸ Janzen, H.H. Carbon cycling in earth systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2004, 104, 397–417

liés à la valorisation agricole des boues ont souvent été moins mis en avant par rapport aux effets agronomiques. En tant que déchet organique à composition chimique complexe provenant du traitement des eaux usées, les principales préoccupations liées à la valorisation des boues comprennent les risques de dégradation des sols, de contamination des cultures et, en fin de compte, des problèmes de santé humaine. Ces problèmes ont généralement été observés dans les sols amendés avec des boues lorsque l'une ou plusieurs des conditions suivantes se produisent : boues de mauvaise qualité (fortement contaminées), taux d'application excessifs, conditions pédoclimatiques défavorables et pratiques agricoles inappropriées (Heaton et Jones, 2008)¹¹⁹.

- **Dégradation physique des sols**

La dégradation physique des sols agricoles est principalement surveillée en examinant les changements de pH du sol et de conductivité électrique (CE), qui reflètent respectivement les risques d'acidification ou d'alcalinisation et de salinisation après l'application des boues (Ramesh, 2019)¹²⁰. Ces paramètres affectent l'adsorption/désorption des produits chimiques, la structure du sol et la stabilité des agrégats, entraînant des sols dispersifs (dispersion physico-chimique) avec une aptitude agricole réduite et un potentiel de contamination élevé lorsqu'ils sont sévèrement affectés. Toutes ces variations sont étroitement liées à la qualité des boues et au taux et à la fréquence des applications (Perkovic et al., 2022)¹²¹.

Selon les conditions dominantes, le taux de minéralisation de la matière organique affecte directement les propriétés physiques du sol. Des diminutions du pH du sol et des augmentations de la CE avec des taux d'amendement des boues ont été précédemment observées dans plusieurs études (UK Health Security Agency, 1989)¹²². En particulier, dans des conditions chaudes, et des sols aérés comme c'est le cas pour les sols marocains, avec des sols légers en surface dans des régions arides et semi-arides, la dégradation microbienne de la matière organique est généralement rapide lorsque l'humidité du sol est adéquate. Le CO₂ libéré réagit avec l'eau de la solution du sol pour former une faible acidité carbonique (H₂CO₃), qui à son tour libère des protons H⁺ par double dissociation, provoquant une diminution progressive du pH du sol au fil du temps (INNPI – Tunisie, 2002)¹²³.

¹¹⁹Heaton, J.C.; Jones, K. Microbial contamination of fruit and vegetables and the behavior of enteropathogenesis in the phyllosphere: A review. *J. Appl. Microbiol.* 2008, 104, 613–626.

¹²⁰ Ramesh, V. *Food Microbiology*; MJP Publishers: Chennai, India, 2019; p.802

https://books.google.co.ma/books/about/Food_Microbiology.html?id=rvCbDwAAQBAJ&redir_esc=y

¹²¹Perkovic, S.; Paul, C.; Vlasic, F.; Helming, K. Human health and soil health risks from heavy metals, micro(nano)plastics, and antibiotic resistant bacteria in agricultural soils. *Agronomy* 2022, 12, 2945

¹²² United Kingdom Health Security Agency. *The Sludge (Use in Agriculture) Regulations No.1263 of 1989*; 1989.

<https://www.legislation.gov.uk/uksi/1989/1263/made>

¹²³ Institut National de la Normalisation et de la Propriété Industrielle (INNORPI). *Fertilizing Materials — Urban Sewage Sludge Reuse Standards NT 106-20*, Tunisia. 2002. <http://innorpi.tn:8080/web/quest/normes>

- **Contamination des sols**

Les métaux lourds (ou éléments traces métalliques) sont connus comme la principale classe de contaminants traces que l'application de boues introduit dans les sols amendés. Pour cette raison, toutes les directives sur la qualité des boues fixent des niveaux maximums de métaux lourds au-dessus desquels les boues ne peuvent être mises en décharge ou réutilisées (Chang et al., 2002)¹²⁴.

Il est généralement admis que les eaux usées urbaines contiennent généralement moins de métaux lourds que les eaux usées industrielles. Comme mentionné précédemment, les métaux toxiques tels que le plomb, le cadmium, le mercure, le nickel et le chrome peuvent être présents dans le flux d'eaux usées municipales en raison de diverses activités urbaines (ménages, stations-service, PME, etc.) et de l'entrée intentionnelle ou accidentelle d'eaux usées industrielles non traitées dans le réseau d'assainissement (Kumazawa, 1997)¹²⁵.

Pendant le processus de traitement des eaux usées, les métaux lourds sont répartis entre les phases solide et liquide en fonction du coefficient de partitionnement du métal. Il a été constaté par exemple que le Mn et le Cu s'accumulent principalement dans la fraction des boues (>70 %), tandis que 47 % à 63 % du Cd, Cr, Pb, Fe, Ni et Zn restent dans l'effluent traité (Duffus, 2002)¹²⁶.

- **Santé humaine et animale**

Des études récentes ont essentiellement estimé le fardeau des maladies associées à l'exposition directe et indirecte des humains aux produits chimiques et aux pathogènes résultant des opérations de gestion des eaux usées et des boues, du traitement à la réutilisation / valorisation (Wang et al., 2010)¹²⁷.

De nombreux risques pour les personnes, l'agriculture et l'environnement posés par l'application de boues sur les terres sont chroniques et peuvent n'être évidents qu'après une exposition à long terme. Par conséquent, les effets nocifs associés directement aux boues sont difficiles à distinguer, mesurer et documenter (Ying et al. (2013)¹²⁸. Mis à part

¹²⁴ Chang, A.C.; Pan, G.; Page, A. L.; Asano, T. *Developing Human Health-Related Chemical Guidelines for Reclaimed Wastewater and Sewage Sludge Applications in Agriculture; Report prepared for the World Health Organization (WHO); WHO: Geneva, Switzerland, 2002; 94p.* [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00449-0](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00449-0)

¹²⁵ Kumazawa, K. Use of Sewage Sludge for Agriculture in Japan. In *Sewage Sludge and Wastewater for Use in Agriculture*; IAEA Proceedings: Vienna, Austria, 1997; pp. 111–128. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/592143>

¹²⁶ Duffus J. H. Heavy metals — A meaningless term? *Pure Appl. Chem.* 2002, 74, 793–807 - <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/pac200274050793/html>

¹²⁷ Wang, F.; Yao, J.; Si, Y.; Chen, H.; Russel, M.; Chen, K.; Qian, Y.; Zaray, G.; Bramanti, E. Short-time effect of heavy metals upon microbial community activity. *J. Hazard. Mater.* 2010, 173, 510–516.

¹²⁸ Ying, S. C.; Masue - Slowey, Y.; Kocar, B.D.; Griffis, S.D.; Webb, S.; Marcus, M.A.; Francis, C.A.; Fendorf, S. Distributed microbially - and chemically-mediated redox processes controlling arsenic dynamics within Mn-/Fe-oxide constructed aggregates. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2013, 104, 29–41.

l'ingestion accidentelle directe d'aliments ou fourrages contaminés, les risques les plus élevés d'infection du public par l'application de boues sur les terres sont associés à l'exposition aérienne.

8.2.1. Mesures et recommandations de gestion des risques

Les mesures possibles de gestion de ces risques sont récapitulées dans le tableau 30, ci-dessous.

Tableau 30: Mesures et recommandations de gestion des risques associés à l'épandage des boues (US-EPA, 1995¹²⁹ ; Mininni et al., 2014¹³⁰ ; OMS, 2006¹³¹)

Catégorie de Risques	Mesures de Gestion Recommandées
Dégradation physique des sols	Effectuer une surveillance régulière des variations de pH et de la conductivité électrique (CE) des sols pour prévenir l'acidification, l'alcalinisation et la salinisation.
	Appliquer des doses boues en fonction des recommandations agronomiques spécifiques pour éviter la surcharge de sels, ce qui pourrait nuire à la structure du sol.
	Utiliser des amendements complémentaires, tels que du calcaire pour les sols acides, afin de neutraliser les effets acidifiants des boues et stabiliser les propriétés physico-chimiques du sol.
Contamination des sols par les métaux lourds	Utiliser uniquement des boues conformes aux normes de qualité fixées pour les métaux lourds. Contrôler la teneur en métaux lourds avant l'application des boues.
	Effectuer une surveillance continue des niveaux de métaux lourds dans les sols amendés pour éviter l'accumulation de contaminants au-delà des seuils critiques.
	Pratiquer une rotation des cultures qui sont moins susceptibles d'absorber les métaux lourds, et favoriser l'utilisation de plantes qui peuvent aider à séquestrer ces métaux sans les transférer dans la chaîne alimentaire.
Risques pour la santé humaine	Mettre en œuvre des protocoles stricts d'hygiène et de sécurité pour les travailleurs et les populations locales, notamment l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI) lors de la manipulation et de l'application des boues.
	Limitier l'application des boues à des conditions météorologiques appropriées pour minimiser la dispersion des particules dans l'air.
	Former les agriculteurs et le personnel aux bonnes pratiques de gestion des boues et sensibiliser les communautés locales aux risques potentiels pour la santé et les mesures de prévention à suivre.
	Contrôler régulièrement les résidus de contaminants dans les cultures récoltées pour assurer leur sécurité pour la consommation humaine et animale.

¹²⁹ U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1995). A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule. EPA/832-B-93-005

¹³⁰ Mininni, G., Blanch, A.R., Lucena, F. et al. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. Environ Sci Pollut Res **22**, 7361–7374 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3132-0>

¹³¹ World Health Organization (WHO) (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 4: Excreta and Greywater Use in Agriculture. WHO.

9. Note conceptuelle pour la promotion de la valorisation agricole des boues au Maroc

9.2. Construction d'une Théorie de Changement

L'adoption d'une Théorie du Changement (TdC) pour le développement et le déploiement des projets de valorisation agricole des boues d'épuration au Maroc présente plusieurs avantages essentiels en termes de planification, de mise en œuvre et de suivi des résultats. Elle permet de structurer de manière logique et cohérente l'ensemble des étapes nécessaires pour surmonter les barrières existantes et atteindre des objectifs ambitieux en matière de viabilité des projets de valorisation agricoles des boues au Maroc.

La logique adoptée est illustrée par la figure 22, ci-dessous.



Les obstacles et barrières : barrières critiques, caractérisant le contexte actuel qui sont susceptibles d'entraver la réalisation des Résultats outcomes ;

Les activités/interventions ou intrants représentent les actions concrètes qui doivent être entreprises pour lever les barrières et pour aboutir à des outputs opérationnels ;

Les outputs/extrants représentent les résultats directs à des interventions/intrants et constituent des préalables aux outcomes/résultats

Les outcomes/résultats représentent les résultats intermédiaires nécessaires pour atteindre les impacts souhaités. Ils permettent d'évaluer les changements à moyen terme résultant des extrants

Figure 21: Logique de transformation adoptée pour la construction de la TdC « développement et déploiement des projets de valorisation agricoles des boues au Maroc »

La TdC offre un cadre permettant de lier les actions entreprises aux résultats attendus à chaque étape du processus, formant ainsi une chaîne logique de cause à effet et de moyens-fins. Elle renforce ainsi la cohérence des analyses en identifiant clairement les relations entre les barrières, les solutions proposées et les résultats attendus.

En plus de structurer les résultats attendus, la TdC sert également de base pour une planification efficace. Elle permet d'identifier les actions à prioriser (Plan d'action prioritaire) en fonction de leur impact potentiel sur les résultats. Comme il sera mentionné plus loin, la TdC présente un grand atout en fournissant un cadre robuste pour le suivi – évaluation à travers des indicateurs de performance et pour l'évaluation continue et la gestion des risques susceptibles d'entraver l'atteinte des résultats et la réalisation des impacts.

Ainsi, comme base de départ, les principales barrières identifiées, susceptibles d'entraver le développement de la valorisation agricole des boues au Maroc, sont les suivantes :

▪ **Barrières institutionnelles**

Les barrières institutionnelles constituent un obstacle majeur à la gestion efficace des boues d'épuration et à leur valorisation agricole :

1. **Les rôles et responsabilités des acteurs concernés ne sont pas clairement définis**, ce qui crée une confusion sur qui est responsable de quoi, que ce soit pour la production, la gestion ou la valorisation des boues. Cette absence de clarté rend difficile la mise en œuvre d'une stratégie cohérente et concertée de valorisation.
2. **Les capacités institutionnelles en matière de gestion des boues sont insuffisantes**, notamment en termes de ressources humaines, de formation, et d'expertise technique. Cela limitera la capacité des acteurs à planifier, coordonner et surveiller correctement les initiatives liées aux boues. Signalons aussi que l'expertise est chétive dans le domaine de gestion des boues. Ainsi, il est temps de combler les lacunes en information et en compétences techniques et managériales de gestion des boues. L'expérience initiée en matière de valorisation agricole des boues et les échanges avec les cadres et techniciens relevant des entités hautement concernées (ORMVAs, ONSSA, ONCA, etc.), montrent un grand déficit en matière de la valeur ajoutée d'une valorisation agricole, sécurisée, surtout dans notre contexte marocain caractérisé par des sols pauvres en matières organiques et souvent dégradés, au moment toutes les stratégies des pays convergent vers la logique de valorisation.
3. **Une déconnexion entre les producteurs de boues (opérateurs de STEP), les usagers potentiels (agriculteurs) et les gestionnaires de déchets**, ce qui crée des obstacles à la mise en place de partenariats efficaces pour la valorisation des boues. La fragmentation des acteurs concernés rend aussi la communication et la coopération difficiles, ralentissant les progrès vers une gestion plus durable.

▪ **Barrières réglementaires**

Sur le plan réglementaire, plusieurs lacunes freinent la valorisation agricole des boues :

- 1) **L'absence de textes réglementaires fixant les normes de valorisation des boues et définissant les conditions précises et sécurisées de leur épandage** est une barrière fondamentale. En effet, sans cadre légal clair, il est difficile pour les opérateurs d'adopter des pratiques de valorisation sûres et conformes.

- 2) **L'ambiguïté du statut des boues dans la loi 28-00** (qui régle les déchets au Maroc) crée des incertitudes juridiques pour les producteurs et utilisateurs des boues, en particulier en ce qui concerne leur classification et leur traitement en tant que déchet ou ressource valorisable.
- 3) **Les études d'impact environnemental (EIE) réalisées pour les projets des stations d'épuration formulent souvent des mesures d'atténuation génériques pour la gestion des boues**, sans tenir compte des spécificités locales, du type de boues produit, ni des options disponibles pour leur valorisation. Cette approche généralisée empêche la conception de solutions adaptées et efficaces à la zone d'exploitation.

▪ **Barrières techniques**

Les défis techniques sont nombreux et constituent des freins importants à la valorisation agricole des boues :

- 1) **Le manque de référentiels techniques spécifiques à la valorisation agricole des boues**, empêche les parties prenantes d'avoir une base solide sur laquelle s'appuyer pour déployer des solutions adaptées. Cela inclut des directives claires sur les meilleures pratiques, les équipements nécessaires et les exigences spécifiques pour l'épandage des boues.
- 2) **L'absence de retours d'expérience de projets pilotes en valorisation agricole** constitue un manque d'exemples concrets pour encourager l'adoption de cette pratique à grande échelle.
- 3) **La typologie des boues et leur caractérisation restent insuffisantes**, ce qui limite la capacité à définir les meilleures méthodes de traitement et d'utilisation en fonction du type boue et du type de sol.
- 4) **La faible maîtrise de la caractérisation des aptitudes des sols à l'épandage** risque d'aggraver le problème, car sans une compréhension approfondie des sols récepteurs, il est difficile d'assurer un épandage optimisé et sécurisé.
- 5) **La gestion de la filière "eau usée" est dissociée de celle des boues dans les STEPs**, ce qui crée une gestion fragmentée des deux sous-produits d'un même processus, empêchant une approche intégrée et optimisée de la gestion des boues. Dans certaines STEPs au Maroc, le manque des débouchés des boues et l'exiguïté des aires de stockage posent parfois les opérateurs à laisser les boues dans les bassins ce qui réduit leur performance épuratoire.

▪ **Barrières socio-culturelles chez les usagers agricoles**

Les barrières sociales et culturelles peuvent limiter également la valorisation des boues en agriculture :

- 1) **Le manque d'information et de sensibilisation sur les bénéfices agronomiques des boues** réduit la motivation des agriculteurs à utiliser ces sous-produits dans leurs pratiques agricoles. Une sensibilisation accrue sur la valeur fertilisante des boues, lorsqu'elles sont correctement traitées, est nécessaire pour surmonter ces résistances.
- 2) **Scepticisme quant à l'innocuité des boues**, même lorsqu'elles sont conformes aux normes, notamment en ce qui concerne leur qualité hygiénique et leurs impacts potentiels sur la santé des sols et des cultures. Ce scepticisme est exacerbé par le manque d'essais et de démonstrations locales prouvant l'efficacité et la sécurité des boues valorisées. Ce type de réticence a été rencontré dans un essai de démonstration mené à Dar El Gueddari au Gharb.

▪ **Barrières financières**

Les contraintes financières représentent un obstacle important à la valorisation des boues :

- 1) **Le coût élevé des technologies de traitement** (telles que la déshydratation, le séchage ou le compostage) constitue une barrière majeure pour les opérateurs qui souhaitent investir dans des solutions durables de valorisation. Ces technologies nécessitent des investissements importants en équipements et en maintenance, ce qui rend leur adoption difficile pour de nombreuses STEPs. Cela représente un surcoût significatif d'exploitation des STEPs.
- 2) **Les coûts de transport des boues depuis les stations d'épuration jusqu'aux sites d'épandage ou de valorisation peuvent être élevés**, surtout lorsque les distances sont longues.
- 3) **Les coûts d'épandage** (notamment en termes de main-d'œuvre et d'équipements spécifiques) constituent une autre barrière financière à prendre en compte. Ces coûts cumulés freinent les efforts de valorisation agricole, en particulier pour les exploitants disposant de budgets limités.

Etudes de cas :

Les ordres de grandeur des coûts tirées de l'étude réalisée pour la FAO par Soudi et al. (2016)¹³² au niveau de Nador et Al Hoceima, sont les suivants :

Option	Coût d'investissement	Coût d'exploitation	Coût total
Épandage direct	1 280 DH/tonne de MS	126 DH/tonne de MS	1 406 DH/tonne de MS
Co-compostage*	1 160 DH/tonne de MS	200 DH/tonne de MS	1 360 DH/tonne de MS

* : De par leur faible C/N, les boues ne peuvent pas être composées seules, un agent carboné et structural doit être ajouté pour équilibrer le C/N à 30 ou 35.

Le coût de transport par kilomètre aller-retour a été estimé à **3 DH/km**. Ce coût est estimé en considérant un transport en vrac dans les camions-bennes (une consommation de 54 L de Diesel/100 km pour une capacité de transport de 8 m³. Le carburant était de 8 MAD/L).

Le coût de transport devient élevé à force que les boues sont humides et augmente encore davantage avec la distance. Toujours selon cette étude, le coût de transport des boues humides est comparé sur la figure 5, ci-dessous, suivante au coût énergétique du séchage (coût d'exploitation hors amortissement de la technologie THERMO-SYSTEM) ajouté au coût de transport des boues à 85% de siccité.

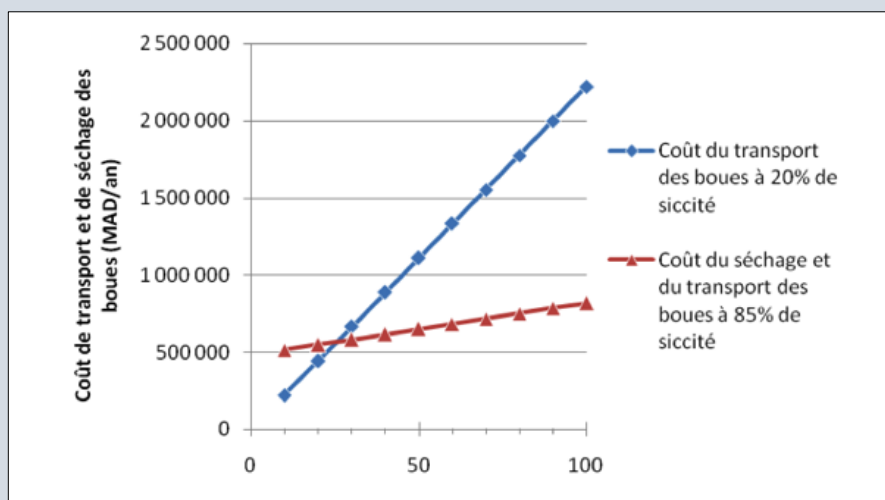


Figure 22: Coût de transport et de séchage des boues humides et séchées

Le coût de transport des boues humide augmentes de façon linéaire avec la distance parcourue, tandis qu'à cause du coût énergétique du séchage, le transport des boues sèches revient plus cher pour les faibles distances mais augmente moins vite. Les courbes se croisent à la distance de 25,6 km : au-delà de cette distance, il est plus rentable de sécher les boues avant de les transporter.

¹³² Soudi, B., F. Poncelet et R. Grela. 2016 (Pour la FAO-ONEE) – Maroc. Étude d'opportunités de valorisation des boues des STEP-ONEE : plan prioritaire d'intervention pour les STEPs d'al Hoceima et de Nador

Cas particulier des petites STEPs (assainissement autonome ou semi-collectif) en milieu rural

Dans ce cas, il serait utopique et économiquement non-justifiable de sécher les très faibles quantités de boues générées. Leur séchage revient à évaporer 98% d'eau par exemple dans des lits de séchage. Selon Soudi (2017)¹³³, il est très difficile d'admettre Cette solution de séchage dans des zones arides à grand déficit hydrique. Il est plutôt recommandé dans ce cas, d'utiliser les boues liquides exactement comme s'il s'agit des eaux usées (eau usée épurée + boues) mais à condition qu'elles soient hygiénisées par stabilisation chimique.

L'arrosage des arbres fruitiers comme l'olivier pourrait être commandé en utilisant des petites citernes. Cette option permet de gagner l'eau, la matière organique et les éléments nutritifs. La valorisation se fera sur u rayon inférieur à 2 km.

Partant de ces barrières et défis, la TdC a été élaborée selon la logique de transformation décrite et illustrée par la figure 22.

Le tableau 31, ci-dessous, illustre l'ébauche de TdC pour développement et le déploiement des projets de valorisation agricole des boues au Maroc.

¹³³ Soudi, B. 2017. Pour GIZ/Projet CESAR. Traitement et valorisation des boues issues de la STEP du douar Chouirij - region de Marrakech - Safi

Tableau 31: Théorie de Changement « développement et déploiement de la valorisation agricole des boues au Maroc

Barrières	Outputs (Produits immédiats)	Outcomes (Résultats intermédiaires)	Impacts (Résultats finaux)
Institutionnelles : - Rôles et responsabilités non définis. - Capacités institutionnelles insuffisantes en matière de gestion des boues. - Déconnexion entre producteurs de boues, usagers agricoles, et gestionnaires de déchets.	- Clarification des rôles et responsabilités des acteurs concernés (STEPS, agriculteurs, gestionnaires). - Renforcement des capacités techniques et managériales à travers des formations pour les acteurs institutionnels. - Mise en place de comités de concertation et partenariats entre producteurs de boues et usagers agricoles. - Relancer les activités du Comité National de Réutilisation et de Valorisation des sous-Produits d'assainissement CB-REVAL¹³⁴ et l'institutionnaliser (qui a été mis en place par la DRPE avec l'Appui de la GIZ)	- Coordination améliorée entre les acteurs institutionnels. - Capacité des acteurs à planifier et gérer efficacement les boues d'épuration renforcée. - Partenariats viables entre producteurs et usagers des boues mises en place et opérationnel. - Le CN-REAVL se réunit régulièrement et émis des rapports de réflexions sur les stratégies de réutilisation des eaux usées épurées et la valorisation des boues.	- Gouvernance pour la valorisation agricole des boues améliorée. - Utilisation accrue des boues dans les pratiques agricoles durables. - Dépendance aux intrants chimiques dans l'agriculture et économie d'engrais.
Réglementaires : - Absence de textes réglementaires clairs pour la valorisation des boues. - Ambiguïté du statut des boues dans la loi 28-00. - Études d'impact environnemental génériques et non adaptées au contexte des STEPs.	- Élaboration de textes réglementaires spécifiques pour l'épandage et la valorisation des boues (normes et conditions d'utilisation) en tenant compte des types de boues (boues séchées, boues déshydratées, boues liquides, boues co-composées). - Clarification du statut des boues dans la loi 28-00 (déchet ou	- Un décret fixant les normes réglementaires de valorisation agricole des boues et définissant les conditions de leur utilisation est promulgué - Des Clause juridiques dudit Décret sont dédiées à la régulation des relations entre les opérateurs de l'assainissement et les usagers agricoles ou leurs associations	- Utilisation sécurisée et légale des boues en agriculture. - Meilleure conformité aux normes et réduction des risques d sanitaires et de contamination cumulée des sols. - Pratiques agricoles d'épandage des boues

¹³⁴ Le CN-REVAL était constitué des Départements suivants : DGH/DRPE et ABHs, Ministère de l'Intérieur, D. Agriculture, Ministère de la Santé, l'ONSSA.

Barrières

Techniques :

- Manque de référentiels techniques pour la valorisation agricole des boues.
- Absence de retours d'expérience de projets pilotes.
- Typologie et caractérisation des boues insuffisantes.
- Faible maîtrise des aptitudes des sols à l'épandage.
- Gestion dissociée de la filière "eau usée" et des boues.

Outputs (Produits immédiats)

- ressource valorisable ou biofertilisant).
- Intégration dans les EIE des mesures d'atténuation /bonification adaptées à chaque contexte local en s'inspirant des futurs chantiers (Schéma Directeur, carte d'aptitude, caractérisation des boues, ...).
- Mise en place d'un registre d'épandage des boues au niveau des exploitations agricoles qui sera évalué et contrôlé par les entités concernées dont l'ONSSA.

- Développement de référentiels techniques pour la valorisation agricole des boues.
- Élaboration d'un manuel de Bonnes Pratiques de valorisation agricole des boues
- Lancement de projets pilotes de démonstration pour tester différentes options de valorisation.
- Mise en place d'un système de caractérisation des boues et des sols.
- Élaborer des cartes d'aptitude de l'épandage des boues.
- Intégration de la gestion des boues avec celle des eaux usées dans les STEPs.
- Formation des conseillers agricoles sur les pratiques de la valorisation des boues.
- Élaborer un arbre décisionnel pour le choix du système de traitement des boues en fonction de leur

Outcomes (Résultats intermédiaires)

(qualité des boues, livraison aux parcelles, etc.).

- Des clauses juridiques sur l'épandage des boues intégrées dans la future loi sur les sols
- Les mesures d'atténuation ou de bonification plus spécifiques et pertinentes dans les EIE.

- Des référentiels techniques (manuel de BP, évaluation de la valeur fertilisante, , élaboration des cartes d'aptitude à l'épandage, ...) sont établis.
- Les projets pilotes sont répliqués et/ou mis à l'échelle selon les préconisations du futur Schéma Directeur. à plus grande échelle.
- Les pratiques d'épandage sont améliorées et appropriées par les agriculteurs.
- Les sous-produits des STEPs sont gérées de manière intégrée.

Impacts (Résultats finaux)

durables et respectueuses de l'environnement.

- La Valorisation agricole des boues est techniquement optimisée et adaptée aux contextes locaux.
- La qualité des sols est améliorée (fertilité physique et chimique).
- La productivité agricole est améliorée.
- Les boues sont efficacement gérées dans un cadre intégré aux processus des STEPs.

Barrières	Outputs (Produits immédiats)	Outcomes (Résultats intermédiaires)	Impacts (Résultats finaux)
Socio-culturelles et de perception : - Manque d'information et de sensibilisation sur les bénéfices agronomiques des boues. - Scepticisme quant à l'innocuité des boues même conformes aux normes.	- qualité et leur siccité teneur en matière sèche) – modalités de valorisation. - Élaborer des analyses Coût-bénéfices des projets de valorisation agricole des boues dans chaque contexte. - Campagnes de sensibilisation ciblées sur les avantages de la valorisation agricole des boues. - Réalisation d'essais de démonstration locaux pour prouver l'efficacité et la sécurité des boues valorisées. - Un système de surveillance de la qualité des sols, des eaux et des produits agricoles est mis en place dans les périmètres de valorisation des boues.	- La Connaissance et l'acceptation des boues comme amendement agricole sont rétablies. - Le scepticisme est anéanti grâce à des résultats démontrés.	- La valorisation agricole des boues est effectivement intégrée dans les pratiques agricoles au niveau des zones ayant une aptitude à l'épandage. - La productivité agricole est augmentée tout en respectant les normes de sécurité.
Financières : - Coût élevé des technologies de traitement des boues notamment le séchage contrôle sous serre compacte (option qui s'impose dans les zones de sensibilité de voisinage et dans les grandes STEPs, sinon un séchage naturel est suffisant pour les petites et moyennes STEPs). - Coût de transport élevé. - Coût d'épandage élevé.	- Identification de mécanismes de financement (partenariats publics-privés, subventions). - Mutualisation des coûts de transport et d'épandage via des coopératives de service ou des plateformes régionales. - Optimiser les coûts de transport en améliorant la teneur en matière sèche des boues et en considérant un rayon de la zone d'épandage économiquement viable en termes de coûts de transports.	- Les coûts pour les producteurs et les agriculteurs grâce à des solutions financières adaptées (subventions dans le cadre du FDA, crédit carbone selon le potentiel de séquestration de carbone, autres mesures de financement dans le cadre du Pnam, etc.) - Meilleure accessibilité financière aux technologies de valorisation des boues.	- Des technologies de traitement des boues économiquement viables sont adoptées. - La rentabilité économique des STEPs et des exploitations agricoles est assurée.

9.3. Hypothèses et risques conditionnant la réalisation des outcomes et l'atteinte des impacts

Le développement et la mise en œuvre effective des projets de valorisation agricole des boues au Maroc dépendent de plusieurs hypothèses critiques qui conditionnent l'achèvement de l'objectif et la réalisation des outcomes et des impacts. Comme dans toute théorie de changement, ces hypothèses sont des éléments importants car elles permettent d'identifier les risques potentiels et les facteurs qui pourraient influencer / conditionner le succès de cheminement vers les résultats et impacts escomptés. Elles permettent également de développer des stratégies de gestion des risques et de plaider pour la création d'un environnement favorable à la réalisation des impacts.

Le tableau 32, ci-dessous, relate les hypothèses et risques avec une appréciation du niveau de risque et les mesures possibles de leur gestion.

Tableau 32: Hypothèses et risques conditionnant la logique de transformation incarnée par la TdC

Hypothèses / Risques	Intensité du risque	Mesures de gestion
Manque de coordination entre les acteurs institutionnels.	Élevé	✓ Organiser des réunions régulières de coordination. ✓ Impliquer toutes les parties prenantes dès le début du projet. ✓ Opérationnaliser le CN-REVAL et les comités de concertation au niveau des territoires.
Capacités techniques limitées des acteurs locaux	Modéré	✓ Développer un programme de formation spécifique adapté aux besoins des acteurs. ✓ Assurer des formations continues et des échanges d'expériences entre les régions.
Délais dans la promulgation de textes réglementaires pour l'épandage des boues.	Élevé	✓ Pression continue des parties prenantes pour accélérer la promulgation des textes. ✓ Inclusion des parties prenantes dans le processus législatif pour garantir l'adhésion.
Ambiguïté du statut des boues dans la loi 28-00	Modéré	✓ Développer un cadre juridique clair et précis sur le statut des boues. ✓ Assurer un dialogue constant avec les législateurs pour clarifier les incertitudes.
Absence de référentiels techniques adaptés.	Élevé	✓ Collaborer avec des instituts de recherche pour développer des guides techniques basés sur les meilleures pratiques. ✓ Tester les référentiels techniques dans le cadre de projets pilotes avant de les généraliser et les documenter dans des manuels ou fiches techniques.
Absence de projets pilotes réussis pour prouver la faisabilité	Modéré	✓ Mettre en œuvre le plus rapidement possible, des projets pilotes bien conçus et documentés. ✓ Assurer un suivi rigoureux des résultats et leur diffusion à grande échelle.
Faible acceptation sociale des boues comme amendement agricole	Élevé	✓ Intensifier les campagnes de sensibilisation et d'information auprès des agriculteurs et des populations locales.

		✓ Multiplier les essais de démonstration avec des résultats concrets et accessibles au public.
Scepticisme sur la sécurité sanitaire des boues	Modéré	✓ Mettre en œuvre un suivi scientifique rigoureux et transparent des impacts des boues sur les sols et les cultures. ✓ Communiquer régulièrement les résultats des études pour réduire les réticences.
Financières : Coûts élevés des technologies de traitement et de transport des boues.	Élevé	✓ Développer des partenariats avec des institutions financières pour soutenir les investissements. ✓ Encourager l'adhésion à des coopératives pour mutualiser les coûts de transport et d'épandage.
Délais dans l'obtention de financements publics ou privés	Modéré	✓ Établir des partenariats les premières phases du projet. ✓ Inclure des options de financement à long terme dans les plans/schéma directeurs de valorisation agricole des boues nationaux de développement agricole

Ce tableau relate une série de défis à gérer dans le cadre du déploiement des projets de valorisation agricole des boues au Maroc. Ces risques, variant en intensité de modéré à, élevé, nécessitent une stratégie claire et des mesures concrètes afin de garantir la réussite des projets.

Le manque de coordination entre les acteurs institutionnels s'affiche en premier. Pour gérer ce risque, il est essentiel d'organiser des réunions régulières de coordination entre les parties prenantes et d'impliquer ces dernières dès la conception des projets de valorisation agricole des boues. L'opérationnalisation du CN-REVAL ainsi que des comités de concertation au niveau territorial permettra de renforcer cette coordination et d'assurer une meilleure fluidité dans l'exécution des activités et une collaboration plus étroite entre les différents acteurs.

Aussi, les insuffisances des capacités techniques des acteurs présentent un risque modéré. Pour y remédier, il est recommandé de développer un programme de formation adapté aux besoins spécifiques des acteurs impliqués dans la valorisation agricole des boues. Des formations continues, accompagnées d'échanges d'expériences entre les régions, permettront aux acteurs de mieux maîtriser les techniques de gestion des boues et d'améliorer leurs compétences dans ce domaine.

Un autre défi majeur réside dans le délai dans la promulgation de textes réglementaires pour l'épandage des boues. Afin de l'atténuer, une pression continue de la part des parties prenantes est nécessaire pour accélérer le processus de promulgation du Décret fixant les normes et les conditions d'utilisation des boues en agriculture.

L'ambiguïté du statut des boues constitue un autre risque, mais de nature modérée. Il est important de clarifier leur statut des boues, qu'elles soient considérées comme un déchet à ou un biofertilisant.

Par ailleurs, l'absence de référentiels techniques adaptés est un risque élevé. Pour pallier cette lacune, il est nécessaire de collaborer avec des instituts de recherche (INRA, ENAM, IAV Hassan II, ...) et des universités afin de développer des guides techniques basés sur les meilleures pratiques. Ces référentiels devront ensuite être testés dans le cadre de projets pilotes, documentés et diffusés sous forme de manuels ou fiches techniques pour garantir leur adoption à grande échelle.

Toujours dans le cadre de développement des référentiels, il est recommandé de mettre en œuvre des projets pilotes bien conçus, le plus rapidement possible, tout en assurant un suivi rigoureux de leurs résultats. La diffusion de ces résultats à grande échelle encouragera l'adoption de solutions viables pour la valorisation agricole des boues.

Un autre risque important réside dans la non-acceptabilité sociale des boues comme amendement agricole. Ce risque nécessite une intensification des campagnes de sensibilisation et d'information à destination des agriculteurs et des communautés locales. En parallèle, des essais de démonstration doivent être multipliés pour prouver l'efficacité des boues et rendre leurs bénéfices concrets et visibles au public.

Le scepticisme sur la sécurité sanitaire des boues est également présent, mais avec une intensité modérée. Pour le gérer, il est jugé indispensable de mettre en œuvre un suivi scientifique rigoureux des impacts des boues sur les sols et les cultures. La communication régulière des résultats des études menées aidera à dissiper les craintes et à encourager l'adoption de pratiques sécurisées.

Enfin, en ce qui concerne les barrières financières, il est impératif de mettre en place des subventions dans le cadre d'un fonds dédié comme le Fonds de développement Agricole (FDA) et de développer des partenariats avec des institutions financières pour soutenir les investissements nécessaires. Aussi, il va falloir encourager la création de coopératives notamment de services pour mutualiser les coûts liés au transport et à l'épandage.

10. Élaboration d'un plan d'action prioritaire 2030

10.1. Ébauche du plan d'action prioritaire - 2030

La mise en place d'un Plan d'Action Prioritaire 2030 (PAP-Boues 2030) est une étape clé pour assurer le succès des initiatives de valorisation agricole des boues au Maroc. Ce plan est d'autant plus pertinent qu'il permet de répondre de manière structurée et progressive aux défis institutionnels, techniques, financiers et socio-culturels identifiés dans la TdC. Ce Plan d'action consiste en fait à transformer les obstacles en opportunités et aboutir à des résultats concrets.

De prime abord, il a fallu formuler un objectif global clair qui donne une direction stratégique à l'ensemble des parties prenantes. Cet objectif vise non seulement à améliorer la gestion des boues d'épuration, mais également à maximiser leur valorisation comme amendement agricole, contribuant ainsi à la fertilité des sols et à la durabilité des pratiques agricoles. En fixant un horizon temporel à 2030, ce plan assure une vision à long terme, tout en restant aligné avec les politiques nationales et internationales sur le développement durable.

L'une des principales forces de ce PAP-Boues réside dans sa capacité à décliner des résultats intermédiaires (outcomes) en actions concrètes. Signalons que ces résultats, constituent des jalons vers l'atteinte de l'objectif globale et de là vers la contribution à la réalisation des impacts. La finalité de la démarche de structurer les efforts autour de réalisations mesurables et atteignables. Chaque outcome (ou résultat intermédiaire) est directement lié aux actions à entreprendre.

Un autre élément clé de l'élaboration d'un plan d'action prioritaire est la prise en compte des hypothèses et des risques décrits auparavant. Chaque résultat attendu est associé à un certain nombre d'hypothèses qui peuvent influencer sa réalisation, comme le soutien des parties prenantes ou l'obtention de financements adéquats. L'élaboration du plan permet donc d'anticiper ces risques et de définir des mesures de gestion appropriées faisant partie intégrante du PAP.

L'une des autres particularités de ce PAP-Boues est qu'il devra s'inscrire dans une logique de suivi et d'évaluation continue permettant de mesurer régulièrement les progrès réalisés, d'ajuster les stratégies si nécessaire et de capitaliser sur les succès pour les répliquer à plus grande échelle. Pour ce faire deux batteries d'indicateurs sont proposées : une batterie d'indicateurs de suivi des actions (Outputs), et une batterie d'indicateurs de performance du PAP-2030 qui seront adoptés pour le Plan Directeur 2035. Ce PAP-2030 constitue une phase cruciale pour stabiliser et sécuriser la valorisation agricole des boues.

Le tableau 33, ci-dessous, détaille le PAP-Boues – 2030.

Tableau 33. Plan d'action prioritaire - Valorisation des boues au Maroc – Horizon 2030

Objectif Global : Optimiser la gestion durable des boues d'épuration au Maroc en les valorisant comme amendement agricole, tout en garantissant leur utilisation sécurisée, légale et bénéfique pour la fertilité des sols et la productivité agricole d'ici 2030

Outcomes (Résultats intermédiaires)	Actions concrètes	Échéance	Responsables et partenaires de mise en œuvre	Indicateurs de suivi	Hypothèses / Risques	Budget estimé en Millions de Dirhams marocains
01. Gouvernance et Coordination améliorée	A11. Clarifier les rôles et responsabilités des acteurs à travers des conventions autour des projets de valorisation agricole des boues. A12. Opérationnaliser le CN-REVAL et les comités au niveau territorial. A13. Élaborer un Plan Directeur de Valorisation Agricole des Boues (PDV-AB) pour la période 2025-2035, avec une déclinaison territoriale (voir TdRs plus loin). Ce plan devra être budgétisé avec un plan de financement.	2024-2026	✓ Ministère de l'Intérieur. ✓ Département de l'Agriculture. ✓ DGH/DRPE. ✓ Département du Développement Durable. ✓ Ministère de l'Économie et des Finances (MEF) ✓ Collectivités territoriales. Impliquer le CN-REVAL.	✓ Nombre de conventions signées. ✓ Nombre de réunions organisées. ✓ PD-VAB élaboré et adopté.	Manque de coordination persistante entre les acteurs.	3 5(plan directeur)
02. Utilisation sécurisée et légale des boues en agriculture.	A21. Élaborer et promulguer des textes réglementaires sur A22. Mettre en place un registre d'épandage au niveau des exploitations agricoles usagères.	2024-2027	✓ Département du Développement Durable. ✓ DGH/DRPE. ✓ Département de l'Agriculture avec ONSSA ✓ SGG	✓ Textes réglementaires publiés. ✓ Statut des boues clarifié. ✓ Système de suivi opérationnel.	Retard dans la promulgation des textes réglementaires.	1 (études)

Outcomes (Résultats intermédiaires)	Actions concrètes	Échéance	Responsables et partenaires de mise en œuvre	Indicateurs de suivi	Hypothèses / Risques	Budget estimé en Millions de Dirhams marocains
O3. Adoption des référentiels techniques à grande échelle.	A31. Développer des référentiels techniques spécifiques à la valorisation des boues. A32. Réaliser des projets pilotes dans toutes les régions pour démontrer la faisabilité. A33. Mettre en place des projets pilotes de co-compostage des boues et de valorisation du compost dans toutes les régions. A34. Développer un guide de bonnes pratiques pour la valorisation agricole. A35. Établir une procédure d'intégration des boues dans les processus des STEPs dès leur planification et leur design.	2024-2028	✓ Établissements de recherche ✓ Ministère de l'Intérieur. ✓ Département de l'Agriculture. ✓ Opérateurs de l'assainissement. Impliquer le CN-REVAL.	✓ Nombre et type de référentiels publiés dont le guide de BP. ✓ Nombre de projets pilotes réalisés. ✓ Nombre d'unités pilotes de co-compostage opérationnelles.	Absence de référentiels et de projets pilotes réussis.	3
O4. Bonne perception de la valorisation des boues auprès des agriculteurs et consommateurs	A41. Organiser des campagnes de sensibilisation auprès des agriculteurs et communautés locales autour des projets pilotes. A42. Réaliser des essais de démonstration dans chaque région agricole.	2024-2029	✓ Département de l'Agriculture /ONSSA/ONCA et structures déconcentrées. ✓ Département du Développement Durable. ✓ Communes. Impliquer le CN-REVAL.	✓ Nombre de campagnes réalisées. ✓ Nombre d'essais de démonstration. ✓ Programme de surveillance opérationnel.	Faible acceptation des boues par les agriculteurs et scepticisme sur la sécurité sanitaire.	3

Outcomes (Résultats intermédiaires)	Actions concrètes	Échéance	Responsables et partenaires de mise en œuvre	Indicateurs de suivi	Hypothèses / Risques	Budget estimé en Millions de Dirhams marocains
	A43. Mettre en place un programme de surveillance des sols.					
05. Adoption de technologies de traitement économiquement viables.	A51. Développer des partenariats publics-privés pour financer les technologies. A52. Mettre en place des coopératives de service pour mutualiser les coûts de transport et d'épandage. Adapter les technologies de séchage (séchage naturel, séchage contrôlé sous serre ventilée, etc.) pour réduire le volume à transporter à chaque contexte et à chaque taille de la STEP.	2024-2030	✓ Ministère de l'Intérieur. ✓ Département de l'Agriculture. ✓ Collectivités territoriales. ✓ Opérateurs de l'assainissement liquide	✓ Partenariats établis. ✓ Nombre de coopératives créées. ✓ Technologies de séchage déployées de manière adaptée.	Coûts élevés des technologies de traitement et de transport.	10 (projets de séchage solaire)
06. Réduction des coûts liés au traitement et à la gestion des boues.	O61. Réaliser pour chaque contexte de valorisation une étude d'optimisation des de transport en fonction de la teneur en matière sèche des boues. (Siccité) et en tenant compte d'une distance kilométrique économiquement viable entre la STEP et les parcelles d'épandage.	2026-2027	✓ Ministère de l'Intérieur. ✓ Département de l'Agriculture. ✓ Communes. ✓ Coopératives agricoles	✓ Taux de réduction du coût de transport et d'épandage.	Délais dans l'obtention de financements publics ou privés.	2

10.2. Suivi et rapportage des progrès de mise en œuvre du Plan d'Action Prioritaire – 2030 avec anticipation pour le Plan – Directeur 2035

Le suivi et le rapportage des progrès de mise en œuvre du Plan d'Action Prioritaire 2030 pour la valorisation agricole des boues sont des composantes essentielles pour garantir l'atteinte des objectifs fixés et permettre une gestion efficace des actions à tous les niveaux. Ces processus doivent non seulement permettre de suivre le progrès de mise en œuvre, mais aussi d'assurer une réévaluation régulière des priorités et de l'efficacité des mesures adoptées. Une attention particulière sera accordée à l'adaptation de ces mécanismes aux réalités territoriales des 12 régions administratives du Maroc, dans le cadre des orientations stratégiques nationales.

10.2.1. Mécanismes de suivi à l'échelle nationale et régionale

Le suivi sera assuré à deux niveaux : au niveau national par un Comité de Suivi National, et au niveau régional par des Comités Régionaux de Suivi (CRS) qui seront constitués dans chacune des 12 régions administratives du Maroc et qui réuniront les représentants des structures déconcentrées des Départements ministériels concernés (Intérieur, Agriculture, Ministère de la Santé, les Agences des Bassins Hydrauliques (ABH), etc.

Le Comité National qui pourrait être el CN-REVAL aura pour mission de :

- i. Superviser la mise en œuvre du PAP-Bouse 2030 et du Plan Directeur qui sera déclenché dès 2027. Rappelons que le Plan Directeur 2035 s'appuiera sur les résultats du PAP-2030 et consistera en fiat à une réplication et une mise à l'échelle de la valorisation agricole.
- ii. Centraliser les données et de coordonner les actions entre les régions.
- iii. Assurer l'harmonisation des pratiques entre les différentes régions et de garantir que les actions entreprises sont alignées avec les orientations nationales et notamment des préconisations du Plan Directeur 2035.

Ce comité se réunira deux fois par an pour évaluer l'avancement global du plan et identifier les éventuels besoins d'ajustement ou de redéfinition des priorités.

Comme il est mentionné auparavant, chaque région administrative du Maroc mettra en place CRS piloté par les autorités locales en collaboration avec les ORMVAs (Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole), les Structures déconcentrées du Département de l'Agriculture, les Directions Régionales de l'Environnement DREs), les coopératives agricoles. Et tout autre acteur concerné.

10.2.2. Indicateurs de performance (KPIs)

En plus des indicateurs de suivi des réalisations des actions (Cf. Tableau n°23), il a été jugé utile de formuler des indicateurs associés aux outcomes (résultats) et aux impacts (résultats ultimes).

Ci-après, sont relatés les KPIs proposés :

- **Indicateur 1. Part du gisement total des boues générés annuellement au niveau national qui est valorisé (en %)**

Cet indicateur est désagrégué par région : **Part des gisements des boues générés annuellement au niveau régional qui est valorisé (en %) (12 indicateurs)**

- **Indicateur 2. (Gisement des boues valorisés en agriculture par région en tonnes) / Potentiel réalisable^{\$} de résorption des boues par la valorisation agricole (en Tonnes) * 100**

Ces indicateurs permettent de mesurer le pourcentage de boues d'épuration produites chaque année et effectivement valorisées en agriculture. Il montre la capacité des régions à transformer les boues en ressources fertiles, tout en comparant ce volume avec les gisements totaux générés.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur. Exemples :

- ✓ **Cible nationale** : x% et y% des gisements de boues (potentiel réalisable) valorisés en agriculture d'ici 2030 et d'ici 2035
- ✓ **Cible régionale** : Les objectifs seront adaptés aux réalités régionales, avec des cibles minimales de x % à y % selon la capacité des infrastructures et la demande agricole.

\$: Ce potentiel sera estimé par le Plan Directeur. Rappelons que tous les gisements générés ne peuvent être valorisés pour diverses raisons qui seront clairement définis dans le plan Directeur et en conformité avec le Décret définissant les conditions d'utilisation: aptitude des sols à l'épandage, conformité aux normes, capacité des STEPs à traiter les boues, conformité aux conditions d'utilisation car les boues peuvent être proscrites dans certaines zones dont par exemples : (i) les zones d'agriculture d'export à cause des difficultés de certification Global-GAP et aussi car certaines chaînes de distribution étrangères ne veulent pas avoir des produits ayant été fertilisés avec des intrants non conventionnels ; (iii) zones situées des terrains des bassins versants vulnérables à l'érosion et qui sont à l'amont des retenues de barrages exploitées pour l'eau potable (pour limiter les risques d'eutrophisation et de pollution organique) ; etc.

▪ **Indicateur 3. Superficie des sols agricoles touchée par l'épandage des boues (% de la SAU totale du pays)**

Cet indicateur est désagrégué par région : **Superficie des sols agricoles touchée par l'épandage des boues (% de la SAU de la région r) (12 indicateurs)**

On peut désagréger cet indicateur en considérant les terres agricoles et les terres de pâturages. Cet indicateur évalue la superficie agricole bénéficiant des boues épandues, démontrant l'extension de l'utilisation des boues en tant qu'amendement organique.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur. Exemples :

- ✓ **Cible nationale** : x milliers d'hectares d'ici 2030 et y milliers d'hectares à l'horizon 2035
- ✓ **Cible régionale** : Objectif à ajuster en fonction de la superficie agricole et des besoins régionaux

▪ **Indicateur 4 : Nombre de projets réussis de valorisation agricole des boues**

Cet indicateur permet de suivre le nombre de projets pilotes et initiatives réussies dans la valorisation des boues. Il donne une vision du dynamisme régional dans l'innovation et la mise en œuvre des projets.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur. Exemples :

- ✓ **Cible nationale** : x projets de valorisation réussis d'ici 2030 et y projets à l'horizon 2030
- ✓ **Cible régionale** : Minimum de 3 à 5 projets par région, selon le niveau d'infrastructures et la capacité à accueillir des projets pilotes.

▪ **Indicateur 5 : Superficie des sols de pâturage dégradés réhabilités (en hectares)**

Cet indicateur évalue la contribution des boues à la réhabilitation des pâturages et des sols dégradés. Il est particulièrement pertinent pour les régions de l'Oriental, de Fès – Meknès, des zones de la Chaouia, de Benguerir, de Rhamna, etc.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur. Exemples :

- ✓ **Cible nationale** : x milliers d'hectares de pâturages dégradés réhabilités d'ici 2030 et y milliers à l'horizon 2035
- ✓ **Cible régionale** : Objectif à ajuster en fonction des surfaces dégradées disponibles dans chaque région (la région de l'Oriental pourrait fixer des cibles plus élevées).

▪ **Indicateur 6. Quantité de boues transformées en compost ou en biofertilisants (en tonnes) au niveau national**

Cet indicateur permet de suivre la quantité de boues transformées en amendements organiques de qualité, une des formes les plus durables de valorisation agricole. Il mesure l'efficacité du traitement des boues et leur transformation en biofertilisants.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur. Exemples :

- ✓ **Cible nationale** : x milliers de tonnes de boues compostées ou transformées en biofertilisants d'ici 2030 et y milliers à l'horizon 2035.
- ✓ **Cible régionale** : Objectif ajusté selon les capacités de traitement par région, avec des cibles variant de x milliers de tonnes à y milliers de tonnes selon la densité démographique et la taille des infrastructures.

▪ **Indicateur 7 : Montant d'investissements financiers dans les technologies de valorisation des boues (en dirhams)**

Cet indicateur évalue les investissements publics et privés réalisés dans les technologies de traitement et de valorisation des boues.

Cibles à déterminer lors de l'élaboration du Plan Directeur.

▪ **Indicateur 8 : Taux d'accroissement de la teneur en matière organique des sols (séquestration de carbone)**

Cet indicateur mesure le niveau de redressement du niveau de matière organique dans les sols marocains qui connaissent un appauvrissement significatif de leur teneur en cette matière (pilier de la fertilité chimique, biochimique et physique du sols). Il s'agit d'une contribution au stockage du carbone dans les sols et donc une contribution à la compensation des émissions de GES. Toutefois, seul un bilan – carbone global pourrait permettre de se prononcer sur le niveau de compensation. En effet il va falloir établir un bilan qui considère tout le système de traitement des boues- de transport – d'épandage, etc. Les experts en Sciences des sols disposent des méthodes de calcul de ce type d'indicateur.

▪ **Indicateur 9. Quantité d'engrais économisée/évitée suite à l'application des boues (par hectare et par la superficie totale amendée).**

Comme il a été développé auparavant, les boues ont une valeur fertilisante organique mais aussi une valeur fertilisante minérale (apports des éléments majeurs, N, P et K). Cet indicateur peut être évalué en valeur monétaire basée sur les prix des unités fertilisants

apportées par les engrais chimiques commerciaux. Il pourrait être aussi évalué en termes d'évitement des émissions de GES générés par la fabrication des engrais.

10.2.3. Modalités de rapportage

Le rapportage des progrès se fera à une cadence annuelle sous format narratif (évaluation qualitative sommaire) ou quantitatifs. En effet certains indicateurs ne peuvent être mesurés qu'après minimum 3 ou 5 ans. Dans tous les cas, un rapport annuel détaillé sera produit chaque année. Il comprendra une évaluation des résultats atteints par rapport aux objectifs fixés, une revue des indicateurs de réalisation et ceux de performance et des recommandations pour l'année suivante. Ce rapport sera transmis aux instances gouvernementales et aux partenaires financiers pour évaluer les progrès réalisés à l'échelle nationale et apporter des ajustements si nécessaire.

11. Élaboration des Termes de références pour l'élaboration du Schéma ou Plan Directeur de gestion des boues

11.2. Contexte et Objectifs

Les stations d'épuration produisent chaque année d'importantes quantités de boues, dont la gestion constitue un enjeu environnemental et sanitaire majeur. La valorisation de ces boues en agriculture représente une solution innovante pour transformer un déchet en ressource, permettant d'améliorer la fertilité des sols tout en réduisant la dépendance aux engrais chimiques. Toutefois, cette valorisation doit se faire dans un cadre strict et planifié, tenant compte des réglementations, des normes de sécurité, et des spécificités locales. Le présent projet vise à élaborer un Plan Directeur national pour organiser et promouvoir cette valorisation de manière durable. Il a pour objectifs de :

- Créer un cadre stratégique national pour la valorisation des boues d'épuration en agriculture.
- Optimiser l'utilisation des boues comme ressource renouvelable dans les sols agricoles tout en garantissant la sécurité environnementale et sanitaire.
- Proposer un plan d'action sur 10 ans pour organiser les projets de valorisation.
- Élaborer une boîte à outils pour accompagner les parties prenantes dans l'adoption des bonnes pratiques.

11.3. Organisation des Missions

Le projet s'articule autour de quatre missions principales. Chaque mission sera subdivisée en sous-tâches et se conclura par des livrables spécifiques. Ces missions sont décrites comme suit :

MISSIONS	DESIGNATION	DELAI DE REALISATION
MISSION 1	État des lieux de la production et gestion des boues	3 mois
MISSION 2	Évaluation du potentiel de valorisation des boues	6 mois
MISSION 3	Classification des projets de valorisation et plan d'action décennal	4 mois
MISSION 4	Élaboration de la boîte à outils et suivi	3 mois

11.4. Détails des Missions

11.4.1. Mission 1 : État des lieux de la production et gestion des boues

- **Objectif:**

Recueillir et analyser les données sur la production et la gestion actuelle des boues au niveau national, en identifiant les STEPs valorisant déjà les boues en agriculture.

- **Sous-tâches**

1. Collecte de données auprès des ministères, ONEE, STEPs, régions, communes, et concessionnaires privés (quantités produites, types de traitement, qualité des boues).
2. Analyse des méthodes actuelles de gestion des boues en comparant les techniques utilisées entre les différentes STEPs.
3. Identification des contraintes logistiques, réglementaires, et normatives freinant la valorisation des boues.

11.4.2. Mission 2 : Évaluation du potentiel de valorisation agricole des boues

- **Objectif:**

Évaluer le potentiel agronomique des boues et leur utilisation dans les sols agricoles en fonction des types de sols et des cultures.

- **Sous-tâches**

1. Caractérisation des boues (matières sèches, nutriments, contaminants, pathogènes) pour évaluer leur compatibilité avec les pratiques agricoles.
2. Cartographie régionale sommaire des zones adaptées à l'épandage des boues selon le modèle français.
3. Évaluation des besoins en épandage selon les types de cultures et sols locaux.

11.4.3. Mission 3 : Classification des projets de valorisation et plan d'action décennal

- **Objectifs**

Établir une classification des projets de valorisation et élaborer un plan d'action sur 10 ans pour le déploiement progressif.

- **Sous-tâches :**

1. Analyse multicritère des projets de valorisation (critères techniques, économiques, environnementaux, et sociaux) pour prioriser les initiatives selon :

- Emplacement géographique des STEPs
- Proximité des terres agricoles
- Qualité des boues
- Coût de transport et d'investissement
- Compatibilité avec les cultures locales

2. Élaboration d'un plan d'action décennal, phasé en étapes claires, avec calendrier, coûts estimés, et parties prenantes identifiées (exemple de feuille de route sur 10 ans).

3. Évaluation des coûts et bénéfices de chaque projet, incluant une analyse coût-bénéfice pour évaluer les impacts économiques pour les agriculteurs et les STEP.

ANNEXE : LISTE DES STEPs

Région	Préfecture/Province	Commune	Milieu	Opérateur de gestion de la STEP	Données STEP			
					Procédé	Niveau de traitement	Date d'achèvement ou de mise en service	Capacité m3/j
Béni Mellal - Khénifra	Azilal	Azilal	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2012	2800
Béni Mellal - Khénifra	Azilal	Ouaouizeght	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2015	541
Béni Mellal - Khénifra	Béni Mellal	Aghbala	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2016	740
Béni Mellal - Khénifra	Béni Mellal	Béni Mellal	Urbain	RADEET	Lits bactériens combiné au lagunage anaérobie	Tertiaire	1995 - 2016	27500
Béni Mellal - Khénifra	Béni Mellal	El Ksiba	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2016	1500
Béni Mellal - Khénifra	Béni Mellal	Zaouiat Cheikh	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2013	1354
Béni Mellal - Khénifra	Khénifra	Khénifra	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2014	12000
Béni Mellal - Khénifra	Khénifra	M'Rirt	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2003 - 2021	4265
Béni Mellal - Khénifra	Khouribga	Bejaad	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2010	3300
Béni Mellal - Khénifra	Khouribga	Bni Zrantel	Rural	Commune	Lagunage naturel	Tertiaire	2016	820
Béni Mellal - Khénifra	Khouribga	Hattane	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2018	750

Béni Mellal - Khénifra	Khouribga	Khouribga + Boulanouar + Ouled Abdoune	Urbain et Rural	OCP	Boues activées	Tertiaire	2010	18200
Béni Mellal - Khénifra	Khouribga	Oued Zem	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2011	5600
Casablanca - Settat	Benslimane	Benslimane	Urbain	Commune	Lagunage naturel	Tertiaire	1997	5600
Casablanca - Settat	Benslimane	Bouznika	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2010 - 2019	9365
Casablanca - Settat	Benslimane	Sidi Bettache	Rural	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2021	391
Casablanca - Settat	Berrechid	Berrechid	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2008	16000
Casablanca - Settat	Berrechid	Deroua	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2010	3000
Casablanca - Settat	Berrechid	El Gara	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2004	1384
Casablanca - Settat	Berrechid	Had Soualem (+Sahel Oulad H'riz)	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2007	3000
Casablanca - Settat	Berrechid	Sidi Rahal Chataii	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2014	3000
Casablanca - Settat	Casablanca	Casablanca, Ain Harrouda et Mohammedia (EAUCEAN)	Urbain	LYDEC	Prétraitement + Emissaire Est (Eaucéan)		2015	950400
Casablanca - Settat	Casablanca	Casablanca, Mechouar de Casablanca, Bouskoura et Dar Bouazza (EL HANK)	Urbain	LYDEC	Prétraitement + Emissaire Ouest (El Hank)		1994	907200

Casablanca - Settat	El Jadida	El Jadida + Mly Abdellah	Urbain	RADEEJ	Prétraitement + Emissaire en mer		2012	95040
Casablanca - Settat	El Jadida	Ouled Frej	Urbain	RADEEJ	Lagunage naturel	secondaire	2013	2004
Casablanca - Settat	El Jadida	Sidi Smail	Urbain	RADEEJ	Lagunage naturel	secondaire	2022	630
Casablanca - Settat	Médiouna	Médiouna	Urbain	LYDEC	Boues activées	Tertiaire	2013	3800
Casablanca - Settat	Médiouna	Sidi Hajjaj Oued Hassar	Rural	ONEE	boues activées SBR		2023	400
Casablanca - Settat	Mohammadia	Echellalate	Rural	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2015	2800
Casablanca - Settat	Nouaceur	Bouskoura (Ville verte)	Urbain	GIE	Boues activées	Tertiaire	2020	8000
Casablanca - Settat	Nouaceur	Nouaceur	Urbain	LYDEC	Boues activées	secondaire	2013	3600
Casablanca - Settat	Settat	Ben Ahmed	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2004	1830
Casablanca - Settat	Settat	El Borouj	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2015	1285
Casablanca - Settat	Settat	Guisser	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2017	250
Casablanca - Settat	Settat	Oulad Said	Urbain	RADEEC	Fosse Imm-Hoff puis Lagunage naturel	Tertiaire	2011	250
Casablanca - Settat	Settat	Ras Al Ain	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2015	300
Casablanca - Settat	Settat	Settat	Urbain	RADEEC	Lagunage naturel	Tertiaire	2006	13500
Casablanca - Settat	Settat	Sidi El Aidi	Urbain	RADEEC	Fosse Imm-Hoff puis	Tertiaire	2010	100

					dispositif compact			
Casablanca - Settat	Sidi Bennour	Loualidia	Urbain	RADEEJ	Lagunage aéré	Secondaire	2012	2500
Casablanca - Settat	Sidi Bennour	Zemamra	Urbain	RADEEJ	Lagunage naturel	Secondaire	2014	1728
Casablanca - Settat	Sidi Bennour	Sidi Bennour	Urbain	RADEEJ	Lagunage aéré	Tertiaire	2023	6000
Dakhla - Oued Ed-Dahab	Aousserd	Bir Gandouz	Rural	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2022	500
Dakhla - Oued Ed-Dahab	Oued Ed-Dahab	Dakhla	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2016	10000
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Arfoud	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2018	2900
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Boudnib	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	553
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Errachidia	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2012	7520
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Et-Taoues (Merzouga et Hassi Labyad)	Rural	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2019	900
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Goulmima	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2022	3280
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Mly Ali Cherif (Er-Rissani)	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2004	1180
Drâa - Tafilalet	Errachidia	Tinejdad	Urbain	Commune	Lagunage naturel	Secondaire	2006	600
Drâa - Tafilalet	Midelt	Midelt	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	4100
Drâa - Tafilalet	Ouarzazate	Ouarzazate+Tarmigt	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2005 - 2023	12700

Drâa - Tafilalet	Tinghir	Boumalen Dades	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	800
Drâa - Tafilalet	Tinghir	Kalaat M'Gouna	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2004	620
Drâa - Tafilalet	Tinghir	Tinghir	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2015	3000
Drâa - Tafilalet	Zagora	Agdz	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2022	560
Drâa - Tafilalet	Zagora	Zagora	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2014	3200
Fès - Meknès	Boulemane	Imouzzar Marmoucha	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2014	950
Fès - Meknès	Boulemane	Missour	Urbain	ONEE	lagunage naturel	secondaire	2021	2340
Fès - Meknès	Boulemane	Outat El Haj	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2006 - 2012	880
Fès - Meknès	El Hajeb	Ain Taoujdate	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2004	1500
Fès - Meknès	El Hajeb	El Hajeb	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2018	3106
Fès - Meknès	Fès	Fès et Mechouar - Fès El Jadid	Urbain	RADEEF	Boues activées à moyenne charge	Secondaire	2014	179112
Fès - Meknès	Ifrane	Azrou	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2017	4635
Fès - Meknès	Ifrane	Ifrane	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2015	8900
Fès - Meknès	Meknès	Meknès + Mechouar Stinia + Toulal + Ouislane	Urbain	RADEM	Lagunage naturel	Primaire	2009	95040
Fès - Meknès	Meknès	M'Haya	Urbain	ONEE	Lagunage aéré (OXYLAG)	Tertiaire	2010	301

Fès - Meknès	Sefrou	Ribate El Kheir	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	secondaire	2023	1485
Fès - Meknès	Taounate	Rhafsaï	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2021	666
Fès - Meknès	Taounate	Kariat Ba Mohamed	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2018	900
Fès - Meknès	Taounate	Taounate	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2015	2500
Fès - Meknès	Taza	Oued Amlil	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2020	1261
Fès - Meknès	Taza	Tahla	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2013	2100
Guelmim - Oued Noun	Assa - Zag	Assa	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2015	1350
Guelmim - Oued Noun	Assa - Zag	Zag	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	600
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Abaynou	Rural	ONEE	FS+ épandage à culture bactériennes fixées	Secondaire	2023	101
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Bouizakarne	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2010	1016
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Fask	Rural	ONEE	Lagunage naturel	secondaire	2023	134
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Guelmim	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2004	7848
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Tagante	Rural	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2022	186
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Taghjijt	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2023	600
Guelmim - Oued Noun	Guelmim	Timoulay	Rural	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2023	372

Guelmim - Oued Noun	Sidi Ifni	Lakhsas	Urbain	ONEE	Lits bactérien	Secondaire	2018	331
Guelmim - Oued Noun	Sidi Ifni	Mirleft	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2022	804
Guelmim - Oued Noun	Sidi Ifni	Sidi Ifni	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2011	1617
Guelmim - Oued Noun	Tan-Tan	El Ouatia	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2017	721
Guelmim - Oued Noun	Tan-Tan	Tan Tan	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2016	7870
Laâyoune - Sakia El Hamra	Boujdour	Boujdour	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2012	6500
Laâyoune - Sakia El Hamra	Es-Semara	Es Semara	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2019	6900
Laâyoune - Sakia El Hamra	Laâyoune	El Marsa	Urbain	ONEE	Infiltration percolation	Secondaire	2013	1200
Laâyoune - Sakia El Hamra	Laâyoune	Foum El Oued	Rural	ONEE	Lagunage aéré	secondaire	2020	180
Laâyoune - Sakia El Hamra	Laâyoune	Laâyoune	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2019	18600
Laâyoune - Sakia El Hamra	Tarfaya	Tarfaya	Urbain	ONEE	lagunage aéré	tertiaire	2010 - 2022	873
Marrakech - Safi	Al Haouz	Amizmiz	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2018	850
Marrakech - Safi	Al Haouz	Tameslohte	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2010	864
Marrakech - Safi	Chichaoua	Chichaoua	Urbain	ONEE	lagunage aéré	Secondaire	2009 - 2023	3360
Marrakech - Safi	Chichaoua	Imintanout	Urbain	ONEE	Lits bactérien	Secondaire	2017	1720
Marrakech - Safi	Chichaoua	Sid L'Mokhtar	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2006	408
Marrakech - Safi	El Kelâa des Sraghna	Kelaât Sraghna	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Tertiaire	2014	8400
Marrakech - Safi	El Kelâa des Sraghna	Laattaouia	Urbain	Commune	Chenal algual	Secondaire	2003	2673

Marrakech - Safi	Essaouira	Essaouira	Urbain	ONEE	boues activées	tertiaire	2008	10000
Marrakech - Safi	Essaouira	Tamanar	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2019	812
Marrakech - Safi	Marrakech	Marrakech et Mechouar - Kasba	Urbain	RADEEMA	traitement aérobic	Secondaire et Tertiaire	2012	143000
Marrakech - Safi	Marrakech	Tnine Loudaya	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2019	800
Marrakech - Safi	Marrakech	Al ouidane (chwitter)	Rural	ONEE	boues activées	tertiaire	2023	1440
Marrakech - Safi	Rehamna	Ben Guerir	Urbain	OCP	Boues activées	Tertiaire	2016	7000
Marrakech - Safi	Rehamna	Skhour Rehamna	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	secondaire	2023	500
Marrakech - Safi	Youssoufia	Echemmaia	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2018	1452
Marrakech - Safi	Youssoufia	Youssoufia	Urbain	OCP	Boues activées	Tertiaire	2018	7400
Oriental	Berkane	Ahfir	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2021	1900
Oriental	Berkane	Berkane et Sidi Slimane Echraa	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2006 - 2021	16586
Oriental	Berkane	Rislane	Rural	Commune	Lagunage aéré	Secondaire	2014	
Oriental	Berkane	Saidia	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2013	20400
Oriental	Berkane	Tafoughalt	Rural	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2004	180
Oriental	Berkane	Laatamna + Madagh	Rural	ONEE	lagunage aéré	Terataire	2023	1456
Oriental	Driouch	Ben Taieb	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2014	560

Oriental	Driouch	Driouch	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2018	1500
Oriental	Driouch	Midar	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	1700
Oriental	Figuig	Bouarfa	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	secondaire	2004 - 2023	3060
Oriental	Figuig	Talsint	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	220
Oriental	Guercif	Guercif	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2015	5400
Oriental	Jerada	Ain Bni Mathar	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	1549
Oriental	Jerada	Jerada	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2016	2030
Oriental	Jerada	Touissit	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	460
Oriental	Nador	Al Aaroui	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	tertiaire	2004 - 2021	6575
Oriental	Nador	Arekmane (Kariat Arekmane)	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2013	1500
Oriental	Nador	Bni Ansar/Atalayoune	Urbain	ONEE	Boues activées	tertiaire	2023	7000
Oriental	Nador	Nador + Bni Bouifrour + Ihaddadene + Taouima + Zaghanghane + Selouane	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2010	20600
Oriental	Nador	Ras El Ma	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Tertiaire	2017	5500
Oriental	Nador	Zaio	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Secondaire	2016	2454

Oriental	Oujda - Angad	Bni Drar	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2015	860
Oriental	Oujda - Angad	Oujda	Urbain	RADEEO	Lagunage aéré	Tertiaire	2011 - 2018	65000
Oriental	Taourirt	Debdou	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	1700
Oriental	Taourirt	El Aioun Sidi Mellouk	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2022	2400
Oriental	Taourirt	Melg El Ouidane	Rural	ONEE	Filtres plantés	Secondaire	2021	155
Oriental	Taourirt	Taourirt	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2006 - 2022	12118
Rabat - Salé - Kénitra	Kénitra	Arbaoua	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2021	270
Rabat - Salé - Kénitra	Kénitra	Kénitra + Mehdiya + Sidi Taibi	Urbain	RAK	Boues activées à moyenne charge	Secondaire	2020	53900
Rabat - Salé - Kénitra	Kénitra	Lalla Mimouna	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2022	1186
Rabat - Salé - Kénitra	Kénitra	Souk El Arbaâ	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	7000
Rabat - Salé - Kénitra	Kénitra	Sidi Allal Tazi et Ben Mansour (centre Had Oulad Jelloul)	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	secondaire	2023	1228
Rabat - Salé - Kénitra	Khémisset	Ain Johra + Tiflet	Urbain	SRRA	LIT BACTERIEN	Tertiaire	2023	11700
Rabat - Salé - Kénitra	Khémisset	Ezzhiliga	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2022	320
Rabat - Salé - Kénitra	Khémisset	Khémisset	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2017	12200

Rabat - Salé - Kénitra	Khémisset	Rommani	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2022	1120
Rabat - Salé - Kénitra	Khémisset	Sidi Abderrazak (*)	Rural	ONEE	Lagunage naturel	Primaire	2004	87
Rabat - Salé - Kénitra	Rabat	Rabat, Touarga, Témara, Harhoura, Ain Attig et Mers El Kheir	Urbain	REDAL	Prétraitement + Emissaire		2011	518400
Rabat - Salé - Kénitra	Salé	Salé, Sidi Bouknadel, Sidi Allal Bahraoui et Shoul (Al Arjat)	Urbain	REDAL	Prétraitement + Emissaire		2020	99360
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Kacem	Dar El Gueddari	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2007	700
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Kacem	Had Kourt	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2018	550
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Kacem	Machraa Bel Ksiri	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	2790
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Kacem	Sidi Kacem + Zirara	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2016	7600
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Slimane	Sidi Slimane	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2018	15205
Rabat - Salé - Kénitra	Sidi Slimane	Sidi Yahya El Gharb	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2014	2250
Rabat - Salé - Kénitra	Skhirate - Témara	Aïn El Aouda	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2019	9900
Rabat - Salé - Kénitra	Skhirate - Témara	El Menzeh	Urbain	ONEE	Boues activées	Secondaire	2010	452
Rabat - Salé - Kénitra	Skhirate - Témara	Skhirate	Urbain	REDAL	Boues activés	Tertiaire	2003 - 2023	10000
Rabat - Salé - Kénitra	Skhirate - Témara	Sidi Yahya Zaer et Tamesna	Urbain	ONEE	Lits bactériens	Tertiaire	2015 - 2022	6000

Souss - Massa	Agadir - Ida-Ou-Tanane	Agadir	Urbain	RAMSA	Emissaire en mer (STEP ANZA + Emissaire Nord)		2016	31000
Souss - Massa	Agadir - Ida-Ou-Tanane et Inezgane - Ait Melloul	Grand Agadir (Agadir, Inezgane, Ait Melloul, Dcheira El Jihadia)	Urbain	RAMSA	Infiltration percolation sur sable (STEP M'ZAR +emissaire en mer)	Tertiaire	2002	75000
Souss - Massa	Agadir - Ida-Ou-Tanane	Aourir (y compris centre Tamraght) + Taghazout	Urbain	RAMSA	Boues activées	Tertiaire	2017	7600
Souss - Massa	Agadir - Ida-Ou-Tanane	Drargua (*)	Urbain	ONEE	Infiltration Percolation	Tertiaire	2000	1180
Souss - Massa	Agadir - Ida-Ou-Tanane	Tamri (Centre Imi Ouaddar *)	Rural	ONEE	Disques Biologiques	Tertiaire	2021	576
Souss - Massa	Chtouka - Aït Baha	Aït Baha	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2010	398
Souss - Massa	Chtouka - Aït Baha	Biougra	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	secondaire	2007 - 2022	4935
Souss - Massa	Inezgane-Ait Melloul	Lqliaa et Temsia	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2022	9390
Souss - Massa	Taroudannt	Aït Iaaza	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2012	1039
Souss - Massa	Taroudannt	El Guerdane	Urbain	ONEE	lagunage aéré	secondaire	2021	934
Souss - Massa	Taroudannt	Oulad Berhil	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2017	1530
Souss - Massa	Taroudannt	Ouled Teima	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2011	6020
Souss - Massa	Taroudannt	Taliouine	Urbain	ONEE	lagunage aéré	tertaire	2023	413

Souss - Massa	Tata	Akka	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Primaire	2010	380
Souss - Massa	Tata	Foum El Hisn	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2008	400
Souss - Massa	Tata	Foum Zguid	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Primaire	2008	210
Souss - Massa	Tata	Tata	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Secondaire	2008	980
Souss - Massa	Tiznit	Tafraout	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2007 - 2022	661
Souss - Massa	Tiznit	Tiznit	Urbain	ONEE	Lagunage naturel	Tertiaire	2006	4900
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	Al Hoceima (*)	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2004 - 2011	9600
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	Bni Bouayach + Imzouren + Ajdir + Izemmouren + Aït Kamra + Mnoud + Sidi Bouafif	Urbain et Rural	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2007 - 2019	10800
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	Targuist	Urbain	ONEE	Lagunage aéré	Secondaire	2008 - 2019	1549
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	Bni boufrah	Rural	commune	Monobloc		2023	
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Al Hoceima	bni hadifa	urbain	ONEE	Filtre plantés de roseaux	Secondaire	2023	129
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Chefchaouen	Chefchaouen	Urbain	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2015	10000
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Fahs Anjra	Mellousa + usine renault	Rural	ONEE	Boues activées	Tertiaire	2011 - 2013	700
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Fahs Anjra	Anjra	Rural	commune	lagunage naturel		2021	321
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Fahs Anjra	Taghramt	Rural	commune	lagunage naturel		2022	23

Tanger - Tétouan - Al Hoceima	M'Diq - Fnideq	Belyounech	Rural	AMENDIS	Boues activées moyenne charge + microfiltration + désinfection au chlore	Tertiaire	2023	618
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	M'Diq - Fnideq	M'Diq + Fnideq (Tamouda Bay)	Urbain	AMENDIS	Boues activées moyenne charge + microfiltration + désinfection au chlore (Tamouda Bay)	Tertiaire	2011	31000
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tanger - Assilah	Assilah + Gueznaia + Aquass Briech + Had Lgharbia + Hjar Ennhel + Laaouama (STEP Boukhalef)	Urbain et Rural	AMENDIS	Boues activées	Tertiaire	2016 - 2021	42700
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tanger - Assilah	Assilah	Urbain	AMENDIS	Boues activées		2015	2000
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tanger - Assilah	Dar Chaoui	Urbain	ONEE	Lit bactérien	Tertiaire	2020	270
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tanger - Assilah	Tanger	Urbain	AMENDIS	Prétraitement + Emissaire (SPRET TANGER)		2008	86400

Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tétouan	Tétouan + Martil + M'Diq + Azla + Mellalienne + Sadina + Zaitoune	Urbain et Rural	AMENDIS	Prétraitement + Emissaire en mer (SPRET Tétouan)		2011	128200
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tétouan	Ouad Laou	Urbain	AMENDIS	Boues activées moyenne charge + microfiltratio n + désinfection au chlore	Tertiaire	2015	3200
Tanger - Tétouan - Al Hoceima	Tétouan	Zaouiat Sidi Kacem (centre Amsa)	Rural	AMENDIS	Boues activées moyenne charge + microfiltratio n + désinfection au chlore	Tertiaire	2023	622