

TRAITEMENT ET VALORISATION DES BOUES ISSUES DE LA STEP DU DOUAR CHOUIRIJ - REGION DE MARRAKECH - SAFI

Rapport préparé par Brahim SOUDI

Mai, 2017

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux.....	3
Liste des figures	3
Liste des encadrés.....	3
I. Contexte et motivation	4
II. Présentation du douar Chouirij	5
II.1. Données générales.....	5
II.2. Situation de l'assainissement.....	7
II.2.1. Production des eaux usées.....	7
II.2.2. Composition des eaux usées brutes.....	7
II.2.3. Production des boues.....	7
III. Options préconisées pour le traitement et la valorisation des boues.....	8
III.1. Séchage solaire sous-serre	9
III.1.1. Principe de fonctionnement et performances.....	9
a. Technologies performantes permettant un contrôle des conditions de séchage et un gain en termes de durée de séchage.....	9
b. Technologie simple basée sur un séchage dans des serres de type agricole et horticole	11
III.1.2. Bases de dimensionnement du dispositif de séchage sous serre.....	12
III.1.3. Caractéristiques de la serre.....	13
III.1.3. Etapes de séchage.....	14
III.2. Co-compostage des boues.....	15
III.2.1. Principe du compostage.....	15
III.2.2. Co-compostage des boues.....	16
III.2.3. Déchets à composter	17
III.2.4. Gisement et disponibilité des déchets.....	18
III.2.5. Choix de la technologie de compostage.....	19
III.2.6. Equipements et matériel requis	21
III.2.7. Conception et dimensionnement de la plate-forme.....	22
III.2.8. Production prévue du compost et valeur agronomique.....	23
III.2.9. Lombricompostage.....	25
III.3. Valorisation des boues par épandage direct	25
III.4. Epandage direct des boues liquides.....	27
III.4.1. Scénario 1 : Epandage des boues stabilisées avec l'eau épurée.....	27
III.4.2. Scénario 2 : Epandage des boues liquides seules	28
III.5. Déshydratation des boues dans des lits de séchage plantés de roseaux	30
III.5.1. Principe de fonctionnement des lits de séchage plantés de roseaux (LSPR)	30
III.5.2. Bases de dimensionnement des LSPR	31

III.6. Déshydratation des boues liquides par une unité mobile et co-compostage avec les déchets verts agricoles	36
IV. Estimatif des coûts de réalisation des ouvrages de traitement et de valorisation des boues ...	37
IV.1. Coût d'implantation du dispositif de séchage solaire sous-serre	37
IV.2. Coût d'implantation de la plateforme de compostage.....	38
IV.3. Coût relatif à l'épandage des boues à l'état liquide	39
IV.4. Coût du dispositif de séchage sur des lits plantés de roseaux.....	39
V. Evaluation globale de la pertinence des options proposées et de leur adaptabilité au contexte du site du projet.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Production des eaux usées des deux systèmes de traitement	7
Tableau 2. Caractéristiques des eaux usées du douar Chouirij	7
Tableau 3. Production prévisionnelle des boues de la STEP Chouirij (2016-2030).....	8
Tableau 4. Durée de séchage des boues	15
Tableau 5. Les agents structurants et les rapports C/N correspondant (Soudi, 2003)	17
Tableau 6. Production de fumier par différentes espèces animales (Corpon, 1988)	18
Tableau 7. Récapitulatif des déchets compostables et leurs caractéristiques	19
Tableau 8. Equipements et matériel requis pour le compostage	21
Tableau 9. Valeur agronomique des boues compostées (ADEME, 2014).....	24
Tableau 10. Volume des boues et eaux usées produites au sein de la STEP Chouirij.....	28
Tableau 11. Superficie potentielle irrigable par le mélange de boues brutes et eaux épurées.....	28
Tableau 12. Volume de boues produites, journalier et annuel (en m ³).....	29
Tableau 13. Nombre d'arbres irrigables par les boues brutes	29
Tableau 14. Charge surfacique à appliquer lors des différentes phases de fonctionnement des LSPR....	35
Tableau 15. Coût d'investissement et de fonctionnement du dispositif de séchage de Chouirij.....	38
Tableau 16. Coût d'investissement de l'installation de la plateforme de compostage de Chouirij....	38
Tableau 17. Coût de fonctionnement de l'installation de la plateforme de compostage de Chouirij.....	38
Tableau 18. Classement des options économiquement et techniquement faisables et adaptées au contexte agro-climatique du douar Chouirij.....	0

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude	5
Figure 2. L'évolution de la population du douar Chouirij (2020-2030).....	5
Figure 3. Rose des vents de Marrakech	6
Figure 4. Options de valorisation des boues du douar Chouirij.....	8
Figure 5. Schéma de principe de fonctionnement de la serre de séchage.....	10
Figure 6. Séchage solaire des boues dans des serres de type agricole.....	12
Figure 7. Vue transversale des lits de séchage couverts avec des ouvrants (CEAMGREF, 1990)	14
Figure 8. Ajout de l'agent de conditionnement au point d'alimentation des lits de séchage en boues épaissies (FNDAE, 1990).....	14
Figure 9. Principe de fonctionnement du compostage (Soudi, 2005)	15
Figure 10. Principe du co-compostage des boues de la STEP Chouirij.....	17
Figure 11. Technique du compostage en andains retournés (photo à droite) et en tas retournés (photo à gauche).....	20
Figure 12. Schéma de la plateforme de compostage du douar Chouirij.....	22
Figure 13. Schéma synoptique du compostage des déchets de Chouirij.....	23
Figure 14. Coupe schématique d'un LSPR.....	31
Figure 15. Configuration des LSPR, a) délai-remblai b) casier béton.....	33
Figure 16. Schéma des différentes couches du massif filtrant.....	33
Figure 17. Principales phase du fonctionnement des LSPR	35
Figure 18. Comportement de l'ensemble des lits lors des différentes phases de fonctionnement....	36

LISTE DES ENCADRES

Encadré 1. Expériences internationales dans le séchage sous serre des boues	11
Encadré 2. Calcul de la superficie requise au séchage	13
Encadré 3. Les paramètres contrôlant le processus de compostage.....	16
Encadré 4. Ordres de grandeur d'estimation de fumier.....	18
Encadré 5. Calcul des quantités de déchets des cultures et de fumier.....	19
Encadré 6. Rôles et avantages agro-environnementaux du compost.....	24
Encadré 7. Bonne pratiques d'épandage des boues (Soudi, 2003)	26
Encadré 8. Calcul de la superficie requise pour les LSPR	32

I. CONTEXTE ET MOTIVATION

Le projet CESAR fait partie du pôle eau de la coopération Maroc-Allemand et a pour objectif la création des opportunités d'emploi dans le secteur de l'assainissement rural au Maroc. Il vise la réduction de la pauvreté dans les zones rurales, l'amélioration du cadre de vie de la population et l'augmentation des revenus, la contribution à l'adaptation aux changements climatiques et la création des conditions favorables au démarrage du Plan National d'Assainissement Rural (PNAR).

Pour une durée de quatre ans, le projet est axé sur les cinq thématiques suivantes :

- L'amélioration de la qualification professionnelle des personnes (femmes et hommes) à la recherche d'emploi, jeunes, ouvriers, techniciens et ingénieurs
- L'établissement des centres de démonstration servant à la présentation des approches de l'assainissement écologique et durable rural
- La mise en relation des chercheurs d'emploi dans le secteur avec des employeurs potentiels
- L'amélioration de l'offre des services et produits dans l'assainissement rural.
- La création de la demande de la population rurale des services et produits de l'assainissement

C'est à ce titre que le douar Chouirij situé au niveau de la commune rurale de Sidi Badhaj, Province d'Al Haouz, a fait l'objet d'une étude d'assainissement rural. Par ailleurs, quel que soit le type de traitement adopté pour le traitement des eaux usées, les boues produites doivent trouver une voie de recyclage ou d'élimination. Dans ce cadre, une étude de de traitement valorisation des boues du douar s'est avérée nécessaire.

En effet, la présente prestation porte sur les principales options possibles pour le traitement et la valorisation des boues de la STEP Chouirij.

II. PRESENTATION DU DOUAR CHOUIRIJ

II.1. Données générales

Le douar Chouirij, site de la présente étude, se situe dans la commune rurale de Sidi Badhaj relevant de la région de Marrakech-Safi. Plus exactement, il est à 5 km environ du barrage de Lalla Takerkoust et 39 km de la ville de Marrakech.

La **Figure 1** montre la situation géographique du douar Chouirij.



Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude

Le douar compte 656 habitants pour l'année 2014¹, répartis sur 161 ménages. La population projetée à l'horizon 2030 est estimée à 798 habitants avec un taux d'accroissement de 1,23% (**Figure 2**)².

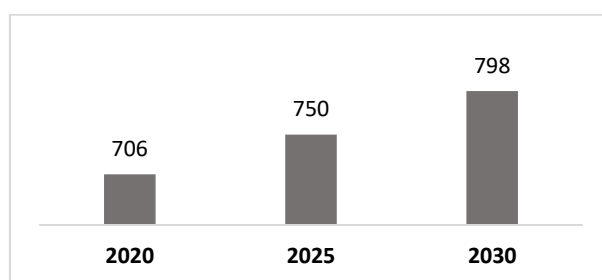


Figure 2. L'évolution de la population du douar Chouirij (2020-2030)

¹ Recensement par l'équipe de la GIZ

² GIZ. 2015. Etude d'assainissement rural de Douar Chouirij - Province d'Al Haouz. Mission II : Etablissement de l'Avant-Projet Détaillé (APD). Partie réseau

En ce qui concerne les conditions météorologiques, et d'après les données étayées dans le rapport d'étude d'assainissement du douar, Chouirij se trouve dans une zone à climat semi-aride avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec.

En effet, la période la plus sèche et chaude se situe entre mai et septembre. Elle reçoit 10 à 15% des précipitations totales durant cette période. La température moyenne enregistrée au mois de juillet est de 29°C. Le mois le plus froid de l'année est janvier (12°C) et le mois le plus sec est juillet (29°C, moins de 5 mm/an).

L'évaporation moyenne dans la zone varie entre 1800 et 2600 mm dont près 50% est enregistrée pendant la période chaude allant de juin à septembre. Elle atteint son minimum pendant le mois de janvier.

Ces données permettent de constater que cette zone se caractérise par un déficit climatique aigu, ce qui justifie pleinement le recours à la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation.

L'humidité relative de l'air varie entre 46 et 67%. La période la plus humide se situe entre novembre et janvier.

Pour le vent, la **Figure 3** présente une rose des vents de Marrakech.

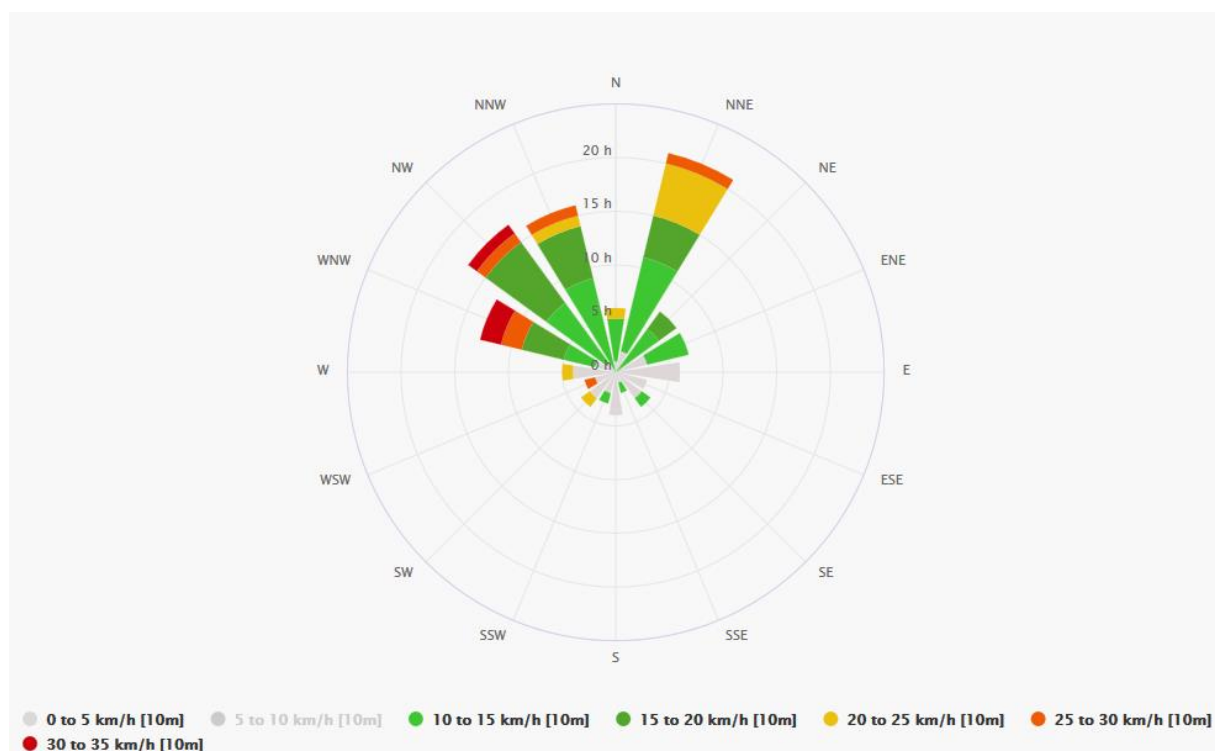


Figure 3. Rose des vents de Marrakech³

A l'instar des autres douars de la région, Chouirij est à vocation agricole avec une prédominance de l'olivier, les vignes, les grenadiers et les cultures céréalières.

³https://www.meteoblue.com/fr/meteo/archive/windrose/marrakech_maroc_2542997

II.2. Situation de l'assainissement

II.2.1. Production des eaux usées

Les eaux usées produites par la population et équipements du douar sont estimées à 64 m³/j en 2016 et s'élèveront à 84 m³/j à l'horizon 2030.

La STEP est dimensionnée pour une capacité journalière de 50,04 m³. Le procédé d'épuration prévue est celui du réacteur anaérobie à flux ascendant à deux étages (RAFADE). Le débit de pointe journalier du douar Chouirij est de l'ordre de 63,69 m³/j.

Il est à rappeler que six ménages seront raccordés au système RAC (réacteur anaérobie compartimenté) dont la production est estimée à 1,7 m³/j en 2016 et à 2,3 m³/j en 2030.

Le **Tableau I** rapporte la production des eaux usées à traiter par les deux systèmes (RAFADE et RAC).

Tableau I. Production des eaux usées des deux systèmes de traitement

Système de traitement			2016	2020	2025	2030
Système RAFADE	Consommation domestique (m ³ /j)		67	73	81	89
	Autres consommations (m ³ /j)	Mosquée	1,25	1,25	1,25	1,25
		Ecole primaire	1,1			
		Ecole coranique	0,3			
		Hammam	15	16	18	20
	Consommation totale (m ³ /j)		85	92	101	111
	Production des eaux usées (m³/j)		64	69	76	84
Système RAC	Consommation totale (m ³ /j)		2,3	2,5	2,8	3,0
	Production des eaux usées (m³/j)		1,7	1,9	2,1	2,3

II.2.2. Composition des eaux usées brutes

Les eaux usées produites sont à 100% domestiques dont les caractéristiques sont relatées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2. Caractéristiques des eaux usées du douar Chouirij

Paramètre	2016	2020	2025	2030
Débit (m³/j)	65,57	70,81	77,97	85,88
DBO₅ (kg/j)	22,95	24,78	27,29	30,06
DCO (kg/j)	62,29	67,27	74,07	81,59
MES (kg/j)	26,23	28,32	31,19	34,35
NTK (kg/j)	4,72	5,10	5,61	6,18
P total (kg/j)	0,52	0,57	0,62	0,69

II.2.3. Production des boues

Le volume des boues liquides prélevées quotidiennement du clarificateur est estimé à 2.52 m³/j avec une teneur de matière sèche de 2 %, soit près de 920 m³/an.

La production prévisionnelle des boues de la STEP de Chouirij (boues liquides à la sortie du clarificateur et boues sèches) est rapportée dans le **Tableau 3**.

Tableau 3. Production prévisionnelle des boues de la STEP Chouirij (2016-2030)

Année	Production moyenne de boues liquides (m³/j)	Production moyenne (kg boues sèches/j)	Production annuelle (kg boues sèches/an)
2016	2.52	11.8	4309
2020	2.52	12.7	4651
2025	2.52	14.1	5138
2030	2.52	15.5	5663

III. OPTIONS PRECONISEES POUR LE TRAITEMENT ET LA VALORISATION DES BOUES

Pour le traitement et la valorisation des boues issues de la STEP du douar Chouirij, deux options peuvent être adoptées (

Figure 4) :

Option 1 : Traitement des boues par séchage solaire sous serre (séchage partiel) + Valorisation agricole des boues par co-compostage (boues et déchets verts agricoles et d'élevage)

Option 2 : Traitement des boues par séchage solaire prolongé + valorisation agricole et/ou réhabilitation des terres dégradées par épandage direct

Option 3 : Stabilisation chimique des boues + épandage à l'état liquide

Option 4 : Séchage des boues sur des lits de séchage plantés de roseaux + valorisation agricole

Option 5 : Déshydratation des boues par unité mobile + valorisation agricole par co-compostage

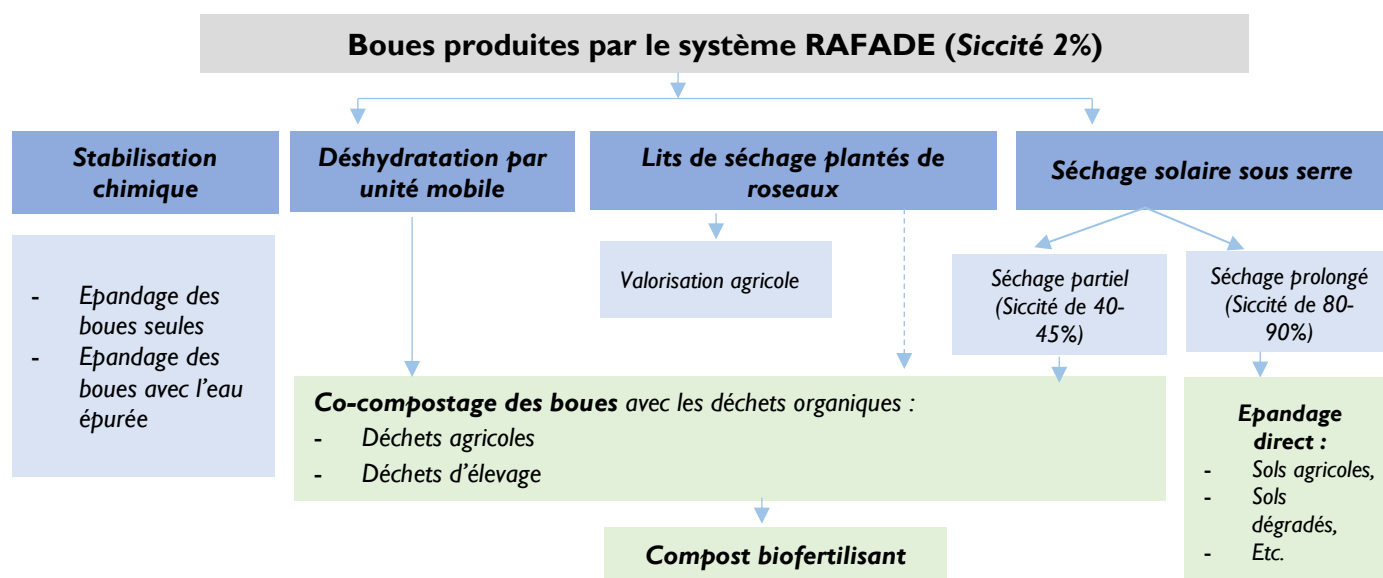


Figure 4. Options de valorisation des boues du douar Chouirij

La filière de valorisation verte des boues est conforme avec celle recommandée par la Stratégie nationale de gestion des boues⁴ et par les études récentes menées par l'ONEE-Branche Eau avec l'appui de la FAO⁵.

Il est important d'attirer l'attention sur les différentes opportunités identifiées au niveau du douar Chouirij pouvant être en faveur des options préconisées. D'ailleurs, la STEP se trouve dans une région agricole qui semble être très favorable à la valorisation des boues par compostage. En effet, les déchets agricoles (bois de taille des arbres, déchets des cultures, etc.) et les déchets d'élevage peuvent être utilisés comme agents structurants étant donné que les boues ne sont pas compostables seules car leur rapport C/N est relativement faible.

Aussi, d'après les enquêtes menées par l'équipe RESING, les agriculteurs se sont montrés favorables à la réutilisation des eaux usées épurées dans l'irrigation des parcelles agricoles. Ainsi, après une sensibilisation sur l'innocuité des boues, les produits finaux (compost biofertilisant et boues séchées à 80-90 %) peuvent être épandus dans les sols agricoles et pour la réhabilitation des sols dégradés du douar.

Eu égard aux conditions météorologiques de la région (rayonnement solaire favorable, capacité évaporatoire élevée, etc.), les technologies du séchage proposées s'avèrent être adaptées pour le traitement des boues.

III.1. Séchage solaire sous-serre

III.1.1. Principe de fonctionnement et performances

Le séchage solaire sous-serre(ou séchage solaire en conditions semi-contrôlées) consiste en l'élimination de l'eau contenue dans les boues en profitant de l'énergie solaire et de l'effet serre.

Cette technique a été développée comme alternative aux méthodes de séchage thermique qui sont très énergivores.

Différentes technologies sont adoptées pour le séchage solaire. On peut considérer deux grandes catégories :

a. Technologies performantes permettant un contrôle des conditions de séchage et un gain en termes de durée de séchage

Cette technologie est représentée par le Thermo-System, actuellement en plein essor dans les pays développés dont notamment l'Allemagne, l'Autriche et la France.

Cette technologie est en cours d'établissement au Maroc. En effet, il est prévu actuellement dans les STEP d'Al Hoceima, de l'OCP-Benguerir, de Dakhla, de Nador et de Marrakech. Cette dernière connaîtra la plus grande installation de séchage sous serre au monde avec une surface de 40 320 m² et une production annuelle de boues de l'ordre de 75 000 tonnes. Des données de

⁴ Département de l'Environnement. 2010. Etude pour l'Elaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Epuración des Eaux au Maroc

⁵ - ONEE/FAO. 2015. Gestion des boues générées par les STEP- ONEE -Branche eau. Mission I : diagnostic de la situation actuelle et Ebauche d'une vision d'amélioration des Performances

- ONEE/FAO. 2016. Assistance technique au programme de développement de l'alimentation en eau potable rurale et de l'assainissement- phase ii. Résultat 7.2 : Etude d'opportunités de valorisation des boues des STEP-ONEE : plan prioritaire d'intervention pour les STEP d'Al Hoceima et de Nador

dimensionnement et de faisabilité technico-économique de cette technologie sont étayées dans l'étude menée pour les STEPs d'Al Hoceima et de Nador⁶.

La **Figure 5** explique le principe de fonctionnement du séchage solaire sous-serre.

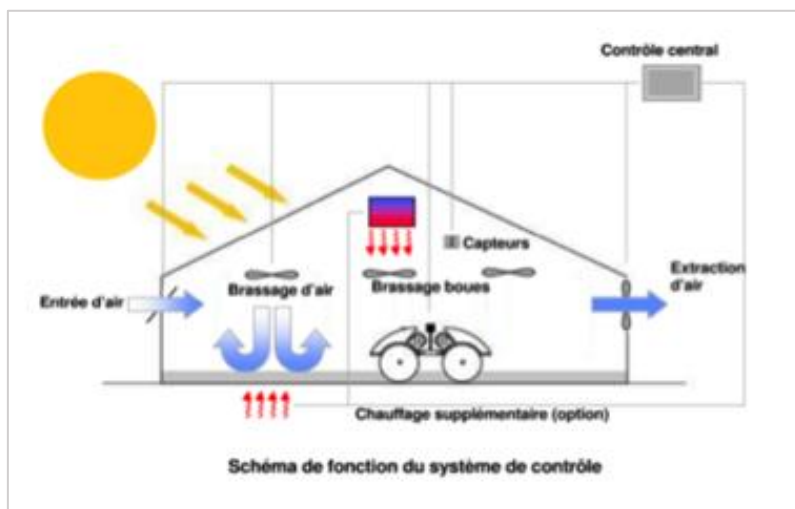


Figure 5. Schéma de principe de fonctionnement de la serre de séchage

En termes de déshydratation, la technique du séchage sous serre permet de réduire le volume des boues jusqu'à atteindre une siccité de plus de 80% ce qui est en faveur à toutes les voies de valorisation. Elle permet aussi de réduire significativement les coûts de transport.

Cependant, le taux de séchage reste influencé par certains facteurs dont : la quantité d'eau que l'air peut stocker, l'architecture de la serre, l'épaisseur du lit de boues, la disposition des boues (lits ou andains) et la température, la vitesse et le mouvement du vent (pour les serres semi-ouvertes)⁷.

Il importe de signaler également que, le séchage solaire des boues se positionne comme un procédé intermédiaire, qui préserve l'ensemble des possibilités d'élimination ou de valorisation des boues.

En termes d'expériences internationales en matière de séchage solaire, l'**Encadré I** rapporte une revue concise de la littérature.

⁶ ONEE/FAO. 2016. Assistance technique au programme de développement de l'alimentation en eau potable rurale et de l'assainissement- phase ii. Résultat 7.2: Etude d'opportunités de valorisation des boues des STEP-ONEE : plan prioritaire d'intervention pour les STEPs d'Al Hoceima et de Nador

⁷ AMORCE. 2012. Boues de Station d'Épuration : Techniques de traitement, Valorisation et Élimination-Série technique.

Encadré 1. Expériences internationales dans le séchage sous serre des boues

Selon les données de la littérature (Bux et Bauman, 2003)⁸, le nombre des installations de séchage solaire sous serre dépassait 48,65%, situés principalement en Allemagne, en Autriche et en Suisse. Ce chiffre, a surement grimpé, étant donné l'évolution continue de la production des boues et l'obligation d'exploitation des techniques en faveur du développement durable.

Les performances du séchage solaire sous serre sont prouvées partout dans le monde. En effet, par rapport aux techniques conventionnelles de séchage thermique, la consommation en énergie et les coûts sont réduits de moitié. Aussi, les émissions de CO₂ sont réduites d'un facteur de sept (Bux, 2012).

Quant aux performances d'évaporation, et d'après une étude évaluant 25 installations de séchage sous serre des boues en Europe, la capacité d'évaporation varie entre 0.6 et 1.0 tonnes d'eau évaporée/m². Dans le cas d'un chauffage supplémentaire, 3,5 tonnes d'eau peuvent être évaporées par la même unité de surface (Bux, 2003).

Dans le cas du séchage des boues préalablement déshydratées, la même étude a montré que la quantité d'eau à évaporer varie entre 0,5 et 1,1 tonne/ m², indépendamment de la taille des sites (le cas d'Allemagne, d'Autriche et de la Suisse). Pour la France, la capacité évaporatoire est de l'ordre de 0,8 tonne/m² et varie entre 1,7 et 2 tonnes dans le cas d'un chauffage supplémentaire (Brison et al., 2012⁹).

En ce qui concerne la superficie requise pour le séchage, il a été démontré dans le Sud de l'Allemagne, qu'elle peut aller de 0,3 à 0,5 m²/ tonne de boues, et varie entre 0,8 à 1,2 m²/tonne de boues humides pour le cas des boues déshydratées mécaniquement sans chauffage d'appoint avec une siccité finale de 60-70%(Bux, 2003).

Un projet pilote de séchage sous serre des boues a été réalisé en Grèce sur une surface de 66 m². Il a montré qu'une durée de 9 à 18 jours entre les mois de Mai et Septembre est suffisante pour atteindre une siccité de 95%, et que la teneur en éléments traces métalliques était conforme à la Directive 86/278/EEC (Mathioudakis et al. 2010)

Il est important de souligner que cette technologie se justifie pour les grandes localités dont la production des boues dépasse 20 m³/j de boues à siccité de 20% et aussi dans les zones où les STEPs se situent dans un environnement sensible (proximité des habitations urbaines, zones touristiques, et zones limitrophes des sites légalement protégés).

b. Technologie simple basée sur un séchage dans des serres de type agricole et horticole

Cette technologie est nettement moins coûteuse et s'adapte aux petits centres notamment en zones rurales. Elle consiste à installer des serres de type agricole sur les lits de séchage comme le montre la **Figure 6**. Les conditions d'ensoleillement favorables de la région dont fait partie le douar Chouirij (340 jours) rendent cette option technologique plus appropriée pour la déshydratation des boues.

⁸Bux M. ve Baumann R. (2003) Performance, Energy Consumption and Energetic Efficiency Analysis of 25 Solar Sludge Dryers. Water EnvironmentFederation, WEFTEC, ABD.

⁹Brison C., Le séchage solaire des boues : État actuel de l'art et retours d'expérience, [en ligne] disponible sur <www.fndae.fr/documentation/PDF/fndae_36_chap_1_2.pdf>, consulté le 20/04/2012

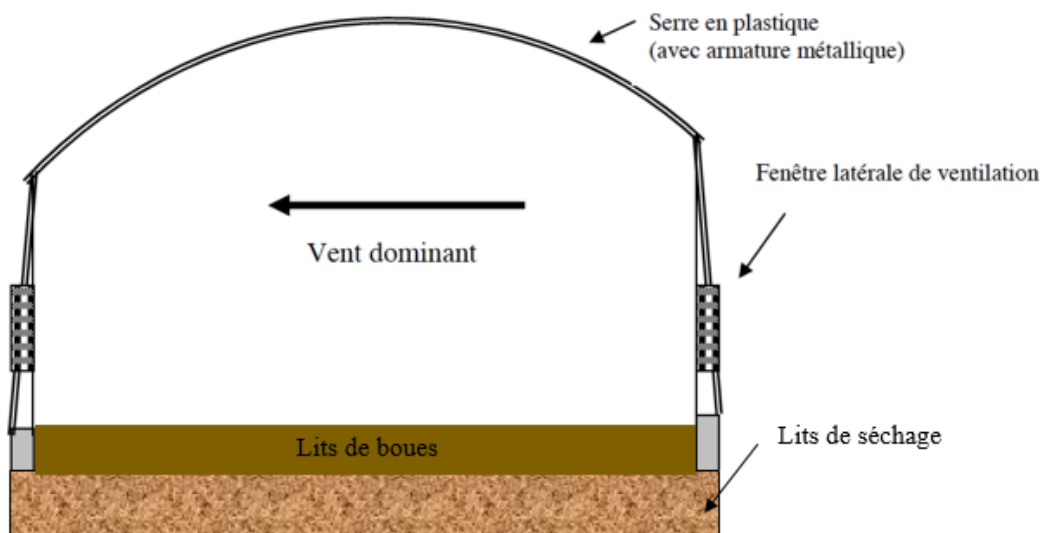


Figure 6. Séchage solaire des boues dans des serres de type agricole

En ce qui concerne les parois de la serre, plusieurs matériaux, disponibles sur le marché, peuvent être utilisés tels que le plastique, le verre ou le polycarbonate. Le matériau utilisé doit permettre la transmission de la lumière avec conservation de la chaleur à l'intérieur de la serre. Le toit de la serre peut être soit sous forme arrondie soit sous forme de chapelle.

III.1.2. Bases de dimensionnement du dispositif de séchage sous serre

La superficie totale des lits de séchage disponible sur la STEP est de près de 120 m², conçue pour 6 lits avec 20 m² chacun. Cependant, compte tenu des bases de dimensionnements relatées dans la littérature et du fait que la plateforme de compostage doit être juxtaposée au dispositif de séchage, on s'est proposé de refaire le calcul tenant compte de l'introduction de la technique de séchage sous serre et de la sous-option de co-compostage (**Encadré 2**).

Encadré 2. Calcul de la superficie requise au séchage

Bien qu'il n'existe pas de règle générale de conception, on peut retenir que la surface utile de séchage est calculée sur la base de la capacité d'évaporation des boues, paramètre qui dépend essentiellement de la saison et de la localisation géographique (UVED, 2013).

Sur la base des données de la littérature¹⁰, la capacité évaporatoire moyenne en France est de l'ordre de 0,8 tonne d'eau évaporée/m².an.

En tenant compte des conditions météorologiques locales de la STEP de Chouirij, on se propose de corriger ce ratio en tenant compte du rayonnement solaire et de l'évaporation.

Le rayonnement solaire en France est de l'ordre de 1 100 à 1900 Kwh/m².an. Pour le cas du Marrakech¹¹, il est de 5 à 5,5 Kwh/m².j soit 2010 Kwh/m².an.

Quant à l'évaporation, elle est de l'ordre de 660 à 700 mm/an en France et d'en moyenne 2300 mm/an à Marrakech.

Donc, la capacité d'évaporation est de :

- $0,8 \times \frac{2010}{1100} = 1,46$ tonnes d'eau/m²
- $0,8 \times \frac{2300}{700} = 2,62$ tonnes d'eau/m²

Ainsi, la capacité évaporatoire moyenne des lits de séchage pour le cas de Marrakech est estimée à 2 tonnes d'eau/m².an.

Dans le cas d'installation des dispositifs de ventilation, l'évaporation augmente de 30%¹².

En se référant à la formule de calcul ci-après, la superficie de séchage requise est de **100 m²**.

$$S [m^2] = M_{\text{boues}} \times \frac{\frac{52}{S_i/100} - \frac{52}{S_f/100}}{\text{Capacité évaporatoire}} = \text{où :}$$

S : Surface de la serre en m²

M_{boues} : quantité de boues, en tonnes de matière sèche par semaines

S_i et S_f : % de matière sèche de la boue à son état initial (S_i) et final (S_f)

C : capacité évaporatoire, en tonnes d'eau par m² et par an

D'après les données de la littérature, la superficie requise pour les lits de séchage des boues est 4 000m² pour chaque 1 000 tonnes MS/an. Ainsi, **24 m²** est la superficie utile pour le cas des boues du douar Chouirij.

A partir des deux calculs, la superficie moyenne requise pour le cas de la STEP de Chouirij est de 60m².

III.1.3. Caractéristiques de la serre

Pour assurer un séchage optimal, les lits doivent être couverts avec des serres démontables avec des fenêtres de ventilation latérales (des ouvrants). Ces dernières permettent l'introduction de l'air extérieur dans la serre qui sera chargé de l'eau évaporée des boues grâce à l'effet de serre et sera par la suite envoyé à l'extérieur par l'effet de la ventilation latérale naturelle ou forcée (**Figure 7**).

¹⁰ CEMAGREF. Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours d'expériences

¹¹ Bardai.2008. Energies renouvelables au Maroc : le développement de la photovoltaïque, vision 2020. Workshop Méditerranéen

¹² CEMAGREF. Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours d'expériences

Ajoutons que ce dispositif de séchage permet de réduire le risque de réhydratation par les pluies et de protestation par le voisinage.

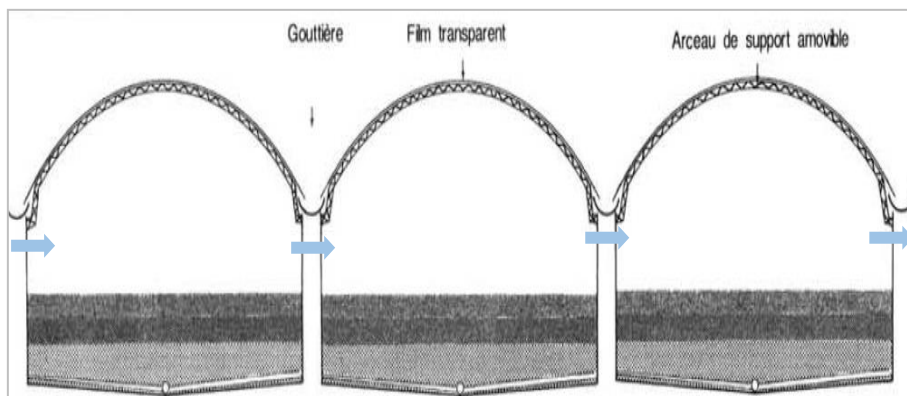


Figure 7. Vue transversale des lits de séchage couverts avec des ouvrants (CEAMGREF, 1990)

Pour accélérer le processus de séchage et assurer un renouvellement optimal de l'air, les serres doivent être latéralement ventilées. Selon la littérature¹³, la ventilation permet d'augmenter l'évaporation jusqu'à 30%.

III.1.3. Etapes de séchage

Les boues liquides (à 2% MS) doivent être introduites directement dans les lits de séchage sous-serre, sans stockage temporaire pour éviter tout risque de nuisances olfactives liées au processus de dégradation anaérobie.

Pour assurer une bonne structure des boues et donc une bonne porosité et un bon drainage, un apport de floculant, simultané à l'épandage des boues dans les lits de séchage, s'avère nécessaire. Un schéma de principe est illustré par la **Figure 8**.

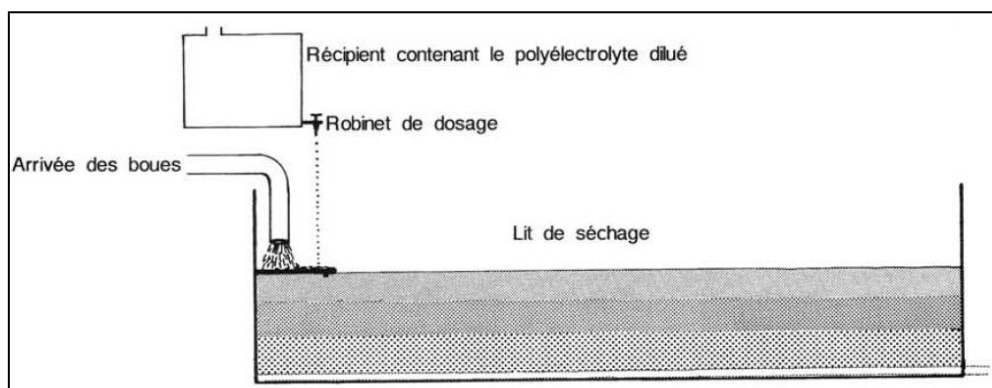


Figure 8. Ajout de l'agent de conditionnement au point d'alimentation des lits de séchage en boues épaissies (FNDAE, 1990)

Des mesures rapides d'hygiène devront être prises et consistent à : i) traiter périodiquement l'environnement de la STEP par un insecticide homologué par l'ONSSA et conformément aux doses prescrites, et ii) pulvériser la chaux autour des serres sans le mélanger avec les boues. En effet, étant donné que les sols sont majoritairement basiques, on se propose que les lits soient traités avec des chlorures ferriques ou des nitrites.

¹³CEMAGREF. Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours d'expériences

Selon la finalité d'utilisation des boues et la siccité finale requise, le séchage peut être soit partiel ou prolongé (**Tableau 4**).

Tableau 4. Durée de séchage des boues

Quantité de boue (m ³ /j avec 2% MS)	Siccité requise	Durée de séchage
Séchage partiel	40-45%	7 à 8 mois
Séchage prolongé	85-90%	1 an

Dans le cas d'un séchage partiel, après 8 mois de séjour, les boues sont évacuées des lits de séchage et sont soit provisoirement stockées dans le lit dédié ou transportées dans la plate-forme de compostage.

S'agissant du séchage prolongé, et après 12 mois de séjour, les boues sont évacuées des lits de séchage et sont stockés pour qu'elles soient épandues directement sur des parcelles agricoles ou des sols dégradés.

III.2. Co-compostage des boues

III.2.1. Principe du compostage

Le compostage est un procédé naturel de conversion biochimique, par biodégradation aérobie, des matières organiques carbonées et azotées en un produit appelé compost qui est hygiénique, de composition stable et riche en substances humiques.

La **Figure 9** illustre le principe de fonctionnement du compostage.

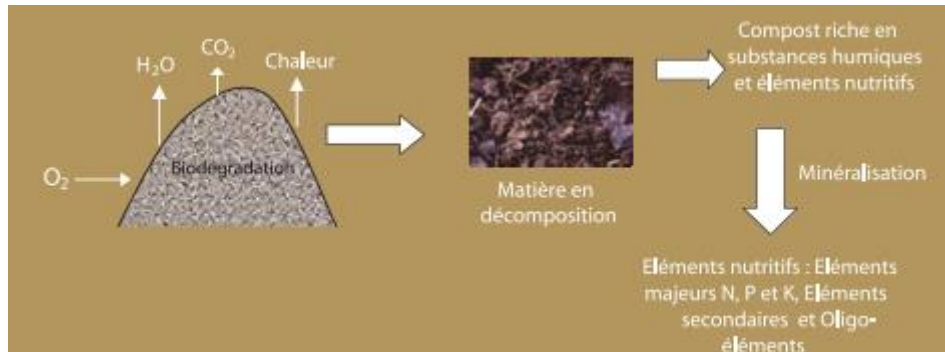


Figure 9. Principe de fonctionnement du compostage (Soudi, 2005)

Les matières organiques compostables peuvent être des déchets agricoles, des déchets d'élevage, des boues, ou autres.

Le processus de compostage se caractérise par une phase dite thermophile, qui est une phase de biodégradation intense, pendant laquelle la température peut atteindre jusqu'à 65°C ce qui permet de supprimer totalement les germes pathogènes. La durée de cette phase dépend étroitement des conditions de démarrage du compostage et de la fréquence de retournement du compost.

Les principaux paramètres qui contrôlent le compostage sont le rapport C/N, l'humidité, l'aération et la température (**Encadré 3**).

Encadré 3. Les paramètres contrôlant le processus de compostage

Le rapport C/N

Le rapport C/N représente un paramètre clé à la réussite du processus de compostage. Il doit être compris entre 25 et 35. En effet, un rapport C/N inférieur à 20 induit à une émanation des mauvaises odeurs suite à la perte d'azote et la production d'ammoniaque. Dans le cas où il dépasse 40, le processus de biodégradation se ralentit.

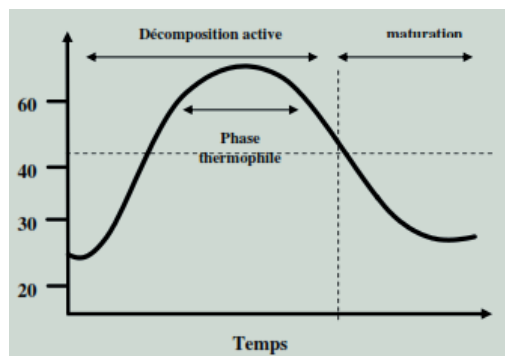
Ainsi, en absence de possibilité d'analyse des déchets en matière de carbone et azote, les ratios 2/3 de matières carbonées et 1/3 de matières azotées sont recommandés.

L'humidité

L'humidité est un facteur nécessaire pour l'activité métabolique des micro-organismes. La teneur en eau optimale est comprise entre 50 et 60%. Si le compost est trop sec, le processus de décomposition se ralentit, alors qu'une humidité élevée favorise l'anaérobiose et l'émanation de mauvaises odeurs.

La température

Le compostage passe généralement par deux phases : une phase mésophile (44-45°C) et une phase thermophile (60-65°C). Au cours de cette dernière phase, l'élévation de la température permet d'assainir le compost où tous les pathogènes et les graines d'adventices sont détruits.



La régulation de la température au cours du processus peut être effectuée par le retournement et l'aération.

L'aération

L'aération est considérée comme un facteur primordial pour le processus de compostage. En effet, la circulation de l'air dans le compost permet une bonne oxygénation et une évacuation normale de CO₂.

L'insuffisance d'oxygène se traduit par une croissance limitée des micro-organismes décomposeurs et une production des mauvaises odeurs. Aussi, une forte circulation d'air favorise l'évaporation et donc les pertes en eau.

Le contrôle de la qualité physique des déchets et la taille du compost associé à un retournement adéquat permet une bonne oxygénation du compost.

III.2.2. Co-compostage des boues

Etant donné leur faible ratio C/N (5 à 10), les boues doivent être co-composées avec des déchets organiques, plus ligneux, qui jouent le rôle d'agents carbonés et structurants (**Figure 10**).

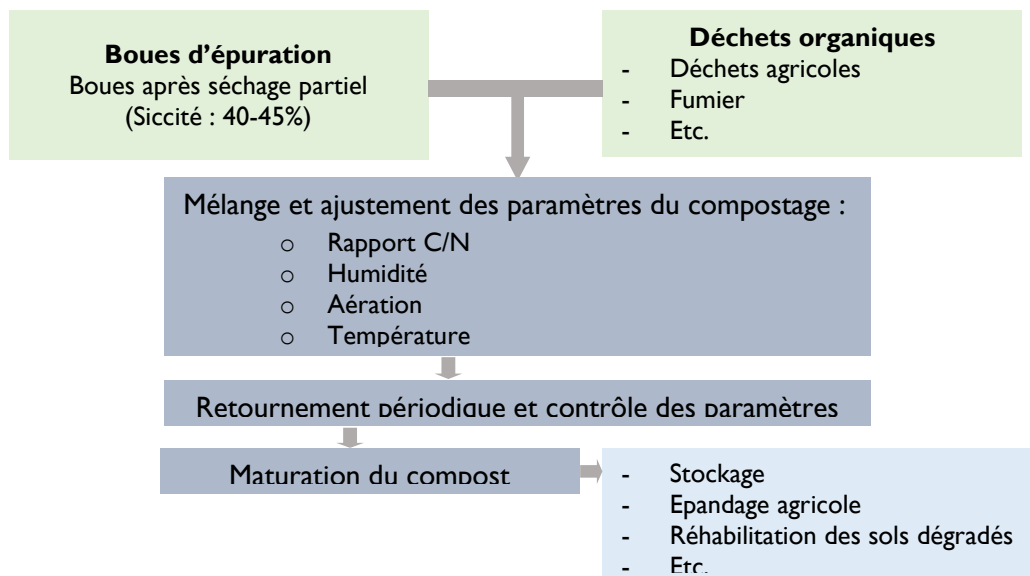


Figure 10. Principe du co-compostage des boues de la STEP Chouirij

De par sa phase thermophile, le compostage se présente comme une voie de stabilisation et d'hygiénisation des boues et permet de faciliter leur usage en agriculture.

III.2.3. Déchets à composter

III.2.3.1. Boues résiduelles d'épuration

Les boues produites au sein de la STEP du douar Chouirij sont issues à 100% des eaux usées domestiques et se prêtent à la valorisation par compostage.

En ce qui concerne leur pouvoir pathogène, l'impact du traitement anaérobie (dont fait partie le système RAFADE) sur la viabilité des œufs d'helminthes notamment ceux d'*Ascaris* (les plus résistantes) montre qu'en grande majorité des œufs avaient perdu leur viabilité. En outre, la phase de compostage permet une stabilisation biologique très efficace.

III.2.3.2. Déchets agricoles

Etant donné que le douar se trouve dans une région à vocation agricole, on se propose que le co-compostage des boues s'effectue avec les déchets agricoles qui se trouvent en quantités appréciables dans la zone qui sont principalement les restes des cultures et les feuilles et bois de tailles des arbres (l'olivier, le grenadier, vigne).

Le **Tableau 5** rapporte les apports C/N de quelques agents structurants.

Tableau 5. Les agents structurants et les rapports C/N correspondant (Souidi, 2003)

Matière Additive	N (en % de Matière sèche)	C/N
Tiges de maïs	0,6-0,8	60-73
Paille	0,3-1,1	48-150
Ecorce de bois de feuillus (arbres à feuillage caduc)	0,1-0,4	116-436
Ecorce de bois de résineux	0,04-0,39	131-1285
Sciure de bois	0,06-0,8	200-750
Copeaux de bois	0,04-0,23	212-1313
Feuilles	0,5-0,13	40-80

III.2.3.3. Fumier d'élevage

Les déchets d'élevage, notamment bovin, constituent une matière intéressante pour le compostage à cause du bon équilibre du rapport C/N et de son effet structurant grâce à la présence des brins de paille généralement utilisés dans l'alimentation des animaux et aussi comme litière.

A ce niveau, Il est important de rappeler qu'il est nécessaire de sensibiliser les agriculteurs de l'importance du co-compostage du fumier et des désavantages de son utilisation à l'état frais (dissémination des agents phyto-pathogènes et des graines de plantes adventices) et de son entreposage sur des sols non imperméables (risque de pollution des eaux souterraines).

L'**Encadré 4** relate les ordres de grandeur de la production de fumier, utilisés à l'échelle internationale.

Encadré 4. Ordres de grandeur d'estimation de fumier

En effet, ils sont très variables et dépendent des conditions d'élevage, l'espèce animale, l'âge des animaux et le mode de stabulation. Pour une estimation à long terme, il faut adopter que les animaux sont adultes et que les conditions d'élevage sont assez favorables pour produire les meilleures quantités possibles de fumier.

Le **Tableau 6** relate la production de fumier par les principales espèces d'élevage.

Tableau 6. Production de fumier par différentes espèces animales (Corpon, 1988)

Espèces	Production de fumier
Bovin	15 tonnes/an/UGB
Ovins	1.0 tonne/an/animal
Caprins	1.3 tonne/an/animal
Equins	13.0 tonnes/an/animal

III.2.4. Gisement et disponibilité des déchets

Les boues produites au sein de la STEP du douar Chouirij sont estimées à 5 512 kg de boues sèches/an. Pour une siccité de l'ordre de 45%, le gisement est estimé à 4,3 T/an.

Le gisement de déchets agricoles et des déchets d'élevage, estimé sur la base du ratio de 1 part de boues pour 2 à 2,5 parts d'autres déchets est évalué à 11 T/an.

Ainsi, sous l'hypothèse que toute la quantité de boues produite sera destinée au compostage et pour un dimensionnement à long terme, le total de déchets à composter s'élève à près de 15,3 T/an.

L'**Encadré 5** présente le détail de calcul des deux types de déchets à composter avec les boues.

Encadré 5. Calcul des quantités de déchets des cultures et de fumier
Le gisement de déchets à co-composter avec les boues, estimé sur la base du ratio 1 part de boues pour 2 à 2,5 parts des autres déchets, est évalué à près de 11 tonnes/an. Selon les quantités de fumier disponibles, le mélange déchets agricoles-fumier peut se faire selon deux proportions : Cas 1 : Fumier disponible en quantité suffisante Dans ce cas, on peut adopter le ratio 1 :1 (1 part de déchets agricoles et 1 part de déchets d'élevage). Ainsi, on aura besoin de 5,5 tonnes/an de fumier et 5,5 tonnes/ an de déchets des cultures. Cas 2 : Quantité faible de fumier Dans ce cas, on adopte le ratio 4:1 (4 parts de déchets agricoles et 1 part de fumier ; ce qui est très recommandé). Ainsi, la quantité requise de déchets est de l'ordre de 9 tonnes/an de déchets agricoles et 2 tonnes/an de fumier.

Il y a le lieu de signaler que la quantité de boues produites (après séchage solaire) et de déchets d'élevage montrent une régularité de variation au cours de l'année tandis que la disponibilité des déchets agricoles reste variable en fonction de la saison.

Le **Tableau 7** rapporte, d'une manière approximative, les principaux déchets disponibles, leur période de disponibilité, teneur en eaux et ratio C/N correspondant.

Tableau 7. Récapitulatif des déchets compostables et leurs caractéristiques

Déchets / matières organiques	Disponibilité durant l'année	Teneur en eau au moment du compostage (%)	C/N
Boues résiduaires	Chaque 8 mois	45% (après séchage partiel)	5 à 10
Fumier bovin laitier	Toute l'année	30 à 35%	25 à 35 (selon la proportion de paille de litière)
Fumier pailleux d'ovin	Toute l'année	25 à 35%	15-20
Fientes de volaille	Toute l'année	25 à 35%	10-15
Sous-produits de taille des oliviers (feuilles, bois, etc.)	Printemps (Mars, Avril et Mai)	30 à 40%	40 à 80 (selon la proportion de bois broyé)
Autres déchets agricoles et déchets verts (fanés de cultures maraîchères en plein champ)	Toute l'année	30 à 45%	20 à 40

III.2.5. Choix de la technologie de compostage

En ce qui concerne les technologies de compostage appropriées et adaptées au contexte de la zone d'étude, deux techniques sont possibles, à savoir le compostage en andains retournés et le lombricompostage.

Le compostage en andains (ou tas) retournés est la technologie la plus adaptée aux conditions marocaines et plus particulièrement aux conditions locales du site.

Le principe de cette technologie consiste à placer un mélange de matières premières dans de longs tas allongés appelés « andains » qui sont retournés de façon régulière (**Figure 11**). L'aération des andains a pour objectif l'approvisionnement en exogène pour assurer une fermentation aérobique ainsi que l'homogénéisation du compost pour une hygiénisation suffisante.



Figure 11. Technique du compostage en andains retournés (photo à droite) et en tas retournés (photo à gauche)

Les principales étapes de compostage sont les suivantes :

- Broyage des matières premières ligneux avec un broyeur mécanique. La taille requise est comprise entre 1,3 et 2 cm.
- Mélange des matières premières à savoir les boues, les déchets d'élevages et les déchets agricoles (1 volume de boues pour 2,5 volumes d'autres déchets). Le rapport C/N doit être d'environ 30 au démarrage du processus de fermentation et l'humidité du mélange d'environ 55%.
- Une fois les paramètres de mélange sont optimaux, on procède à la mise en place des andains ou des tas dont la forme dépend de la quantité de matériaux disponibles. Une largeur de 3,5 m et une hauteur de 1,8-2,2 sont recommandées pour les andains (Soudi, 2005). La mise en andains peut se faire manuellement vu que l'espace ne permet pas une mécanisation du processus. Pour le cas du compostage en tas, une hauteur de minimale de 2 mètres avec une surface basale de 3 ou 4 mètres, est recommandée.
- Retournement des andains ou des tas pour assurer une aération convenable et donc une biodégradation optimale. La fréquence de retournement dépend de la température et l'aération. Un retournement d'une fois par semaine pendant le premier mois et une fois toutes les 2 semaines après, est recommandé. La durée de fermentation peut aller de 8 à 12 semaines selon les conditions du compostage.
- Humectation des andains. L'humidité doit être supérieure à 35% mais ne doit pas excéder 55%.
- Criblage et tamisage du compost une fois la fermentation est achevée.
- Mise en maturation pendant 6 à 8 semaines

La température peut être contrôlée à l'aide d'une sonde – thermomètre qu'on introduit dans les andains ou tas à une profondeur de 0.5 m de profondeur. Afin d'enrichir davantage le compost en azote, il conviendrait d'ajouter à l'eau d'arrosage l'équivalent d'environ 1 kg de nitrate d'ammonium $[(NH_4) NO_3]$ pour 100 litres d'eau.

Pour contrôler les conditions de compostage en périodes pluvieuses et pour éviter le problème de lixiviats et des mauvaises odeurs, la plateforme doit être couverte par des bâches respirantes (permettant l'échange gazeux et évitant la pénétration de l'eau de pluie), actuellement disponibles sur le marché. Aussi, on peut confectionner une serre ouverte latéralement. .



L'aire de maturation et l'aire de stockage du compost doivent être isolées autant que possible de l'aire de réception et de fermentation pour éviter la contamination du compost.

Aussi, les eaux de lixiviats doivent être traitées avec les eaux usées.

III.2.6. Equipements et matériel requis

Le niveau de technologie adopté est moyen mais requiert un aménagement de la plateforme et un équipement minimal. Le **Tableau 8** relate les principaux équipements et matériel requis pour réussir le compostage.

Tableau 8. Equipements et matériel requis pour le compostage

Equipements	Variantes	Fonction
Equipements importants		
Broyeur	Broyeur à couteaux 	Broyage et réduction de la taille des déchets à composter (bois de taille, branches d'arbres, etc.). La taille requise pour le compostage varie de 1 à 3 cm.
Tamiseur	Tamis rotatif Différentes mailles 	Criblage et tamisage du compost
Autres équipements		
Ensacheur	Mise en sacs, emballage (option facultative mais envisageable) Pour un usage dans les exploitations à proximité de la STEP, l'épandage du compost en vrac est plutôt recommandée)	
Petit matériel et outillage		
Sonde-thermomètre		Contrôle de la température du compost
Sonde de mesure d'oxygène lacunaire	Matériel de monitoring du processus (facteurs à contrôler en priorité : Température, humidité, oxygène lacunaire)	
Autres (pelle, brouette, arrosoir, etc.)	Matériel d'entretien du processus de compostage	

III.2.7. Conception et dimensionnement de la plate-forme

Sur la base des ordres de grandeurs et ratios préconisés, gisements de déchets à composter, taille de tas (option recommandée étant donnée le faible tonnage à co-composter et pour l'économie de la superficie), durée de fermentation, durée de maturation, etc.)), on calcule une superficie de 60 m² pour l'ensemble de la plateforme.

Les principales composantes de l'unité de compostage sont les suivantes :

- Aire de réception (15 m²)
- Aire de fermentation (25 m²)
- Aire de maturation (15 m²)
- Aire de conditionnement et de stockage

La

Figure 12 illustre un plan de la plateforme de compostage.

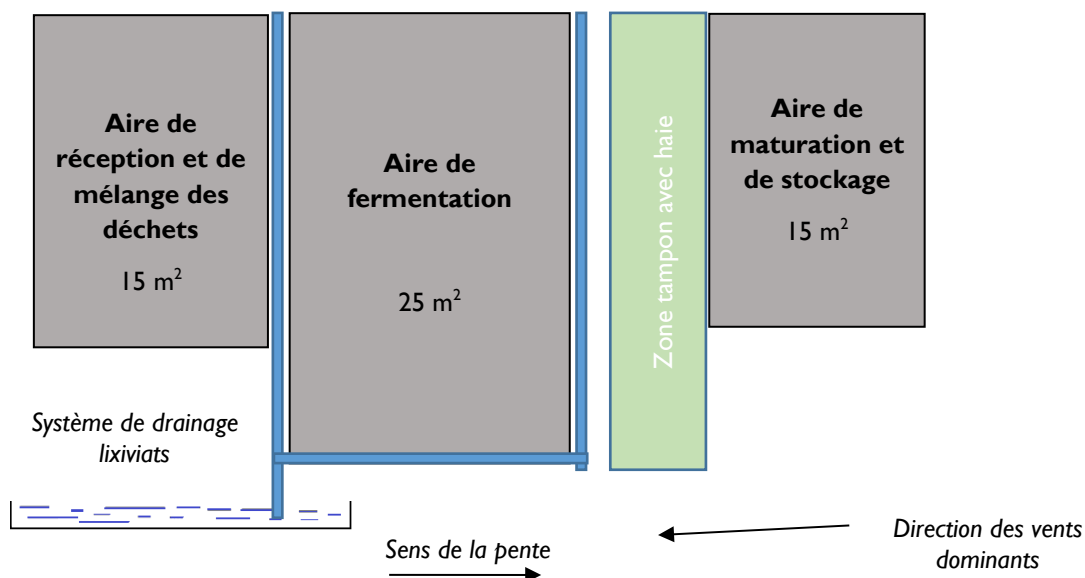


Figure 12. Schéma de la plateforme de compostage du douar Chouirij

La **Figure 13** résume les principales étapes du compostage des déchets de Chouirij.

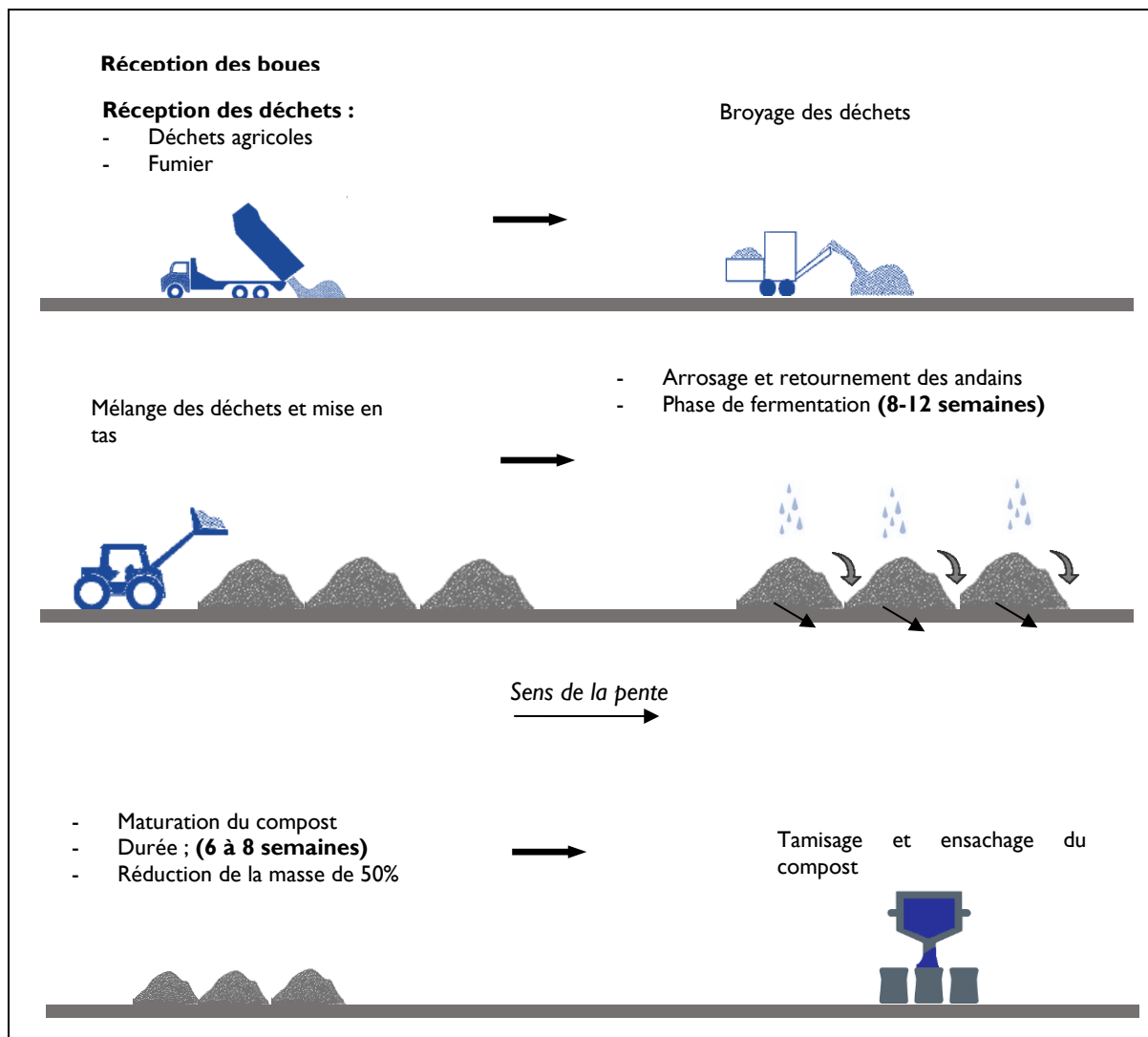


Figure I3. Schéma synoptique du compostage des déchets de Chouirij

III.2.8. Production prévue du compost et valeur agronomique

III.2.8.1. Production prévue

Sur la base du bilan de masse du compostage qui correspond à une réduction biochimique d'environ 40% à 50% du tonnage initial de déchets organiques mis en compostage, la production potentielle annuelle du compost issu des déchets du douar est estimée à près de 8 tonnes annuellement. Ce tonnage est relativement faible et ne peut couvrir qu'une superficie agricole ne dépassant pas les deux hectares. Mais, le caractère pilote du compostage en cette zone rurale, associé à une technologie d'épuration également adaptée, constituera à la fois un référentiel technique intéressant et une plateforme pédagogique.

III.2.8.2. Avantages agro-environnementaux du compost

La filière du compostage des boues est avantageuse du point de vue environnemental et sanitaire. En effet, les boues se dotent d'un pouvoir fertilisant et organique important (**Tableau 9**).

Tableau 9. Valeur agronomique des boues compostées (ADEME, 2014)¹⁴

Paramètres agronomiques	Boues compostées
Teneur en matière sèche (%)	40 à 60
Teneur en matière organique (% de la MS)	80 à 90
pH	6 à 7
Azote * (Kg N/tonnes de boue brute)	5 à 9
Phosphore (Kg P ₂ O ₅ /tonnes de boue brute)	6 à 8
Potassium (Kg K ₂ O/tonne de boue brute)	1 à 2

* à 80-90 % sous forme organique et 10-20 % sous forme ammoniacale, si la boue est liquide ;

En ce qui concerne le niveau de concentration en éléments indésirables (éléments traces métalliques, polluants organiques, pathogènes), les boues sont issues des eaux usées à 100% domestiques, ainsi qu'en plus du procédé de traitement mis en œuvre qui permet de détruire les pathogènes dont les œufs d'helminthes, le processus du compostage permet une hygiénisation et une stabilisation totale des boues.

Il est à rappeler que la minéralisation de la matière organique des boues, dans le sol, libère des substances inorganiques nutritives. Le taux de minéralisation varie généralement en fonction du pH, la température et de l'humidité du sol. Dans les conditions des zones de l'étude, ces facteurs sont jugés favorables.

L'**Encadré 6** rapporte les principaux rôles et avantages du compost.

Encadré 6. Rôles et avantages agro-environnementaux du compost

Le compost présente des avantages agro-environnementaux importants. En effet, il participe à l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques du sol et l'amélioration de sa structure, l'augmentation des rendements de cultures et la réhabilitation des sols dégradés :

Amélioration des propriétés physiques du sol :

- Augmentation de la capacité de rétention de l'eau
- Stabilité de la structure du sol
- Effet mulch (si appliqué en surface) : diminution de l'évaporation de l'eau

Amélioration des propriétés physico-chimiques du sol :

- Augmentation de la capacité d'échange cationique CEC (rétention des actions)
- Augmentation de la solubilité des éléments nutritifs (ex : Phosphore)
- Complexation des éléments traces métalliques

Amélioration des rendements de cultures :

- Fourniture progressive des éléments nutritifs
- Amélioration de l'absorption des éléments nutritifs
- Stimulation du développement des racines et de la partie aérienne par les acides humiques
- Inhibition des agents phyto-pathogènes (biofumigation)

Réhabilitation des sols dégradés et lutte contre la désertification :

- Amélioration de la teneur en matière organique
- Amélioration de la structure et atténuation de l'érosion
- Amélioration de l'activité biologique
- Amélioration des sols de parcours
- Amélioration des sols forestiers

¹⁴ADEME. 2014. Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture -Valeur Agronomique des boues

III.2.9.Lombricompostage

III.2.9.1. Principe du lombricompostage

Le lombricompostage est une technique qui exploite les vers de terres pour transformer les déchets organiques en un produit appelé « lombricompost » ou « vermicompost ». Il a l'avantage d'être plus rapide que le processus conventionnel de compostage ainsi qu'il a une valeur agronomique supérieure.

Les principales espèces de vers de terre utilisées dans le lombricompostage sont : *Eisenia fetida* (le ver de terreau ou de fumier), *Eisenia andrei* (le ver rouge), *Dendrobaena veneta*, *Eudrilus eugeniae* et *Lumbricus rubellus*.

III.2.9.2. Facteurs de réussite du lombricompost

La réussite du lombricompostage dépend d'un certain nombre de facteurs :

- Une litière favorable. La litière idéale a un rapport C/N élevé, une bonne qualité de gonflement (surtout les déchets pailleux d'élevage) et une bonne capacité de rétention de l'eau.
- Une source de nourriture pour les vers de terre dont principalement les déchets d'élevage
- Une humidité optimale (70-90%). Elle ne doit pas être inférieure à 50%.
- Une aération favorable au déplacement des vers dans la litière ou le tas de compostage.
- Une température optimale (20%).
- Une quantité de vers entre 2,5 Kg/m² et 5 Kg/m²

III.2.9.3. Le lombricompostage dans le cas du Chouirij : variante complétant le compostage en tas

Etant donnée l'absence de la phase thermophile dans le processus de lombricompostage, on se propose, dans notre cas, qu'il remplace la phase de maturation dans le processus traditionnel. En effet, après mélange des déchets organiques et mises en andains qui vont être retournées progressivement pour favoriser la montée de la température, les déchets, après l'achèvement de la phase de fermentation, vont être déposés en tas bas et êtreensemencés avec des vers de terre.

A l'instar du compostage conventionnel, la valorisation des boues par lombricompostage permet de détruire les pathogènes et de produire un excellent amendement organique de sol. Quelques études ont indiqué que le lombricompost est plus riche en élément fertilisants (surtout en azote et phosphore) que le simple compost et stimule davantage l'activité microbienne dans les sols¹⁵.

III.3. Valorisation des boues par épandage direct

Dans le cas du séchage prolongé aboutissant à une siccité de 80 à 90%, les boues peuvent être épandues directement sur les sols agricoles ou pour la réhabilitation des sols dégradés.

Sous l'hypothèse que toutes les boues produites, d'une siccité de 80 à 90%, seront destinées à l'épandage agricole, la quantité de boues est estimée entre 6 et 6,6 T/an.

D'ailleurs, l'épandage direct des boues, même sans traitement préalable, est une pratique ancienne connue par les agriculteurs. A titre d'exemple, au niveau de Skhirat, étant donné que la région est à vocation agricole, les agriculteurs utilisent les boues en tant qu'amendement organique et

¹⁵ TOGNETTI C., LAOS F., MAZZARINO M.J., HERNANDEZ M.T., 2005. Composting VS. Vermicomposting: a comparison of end product quality. Compost Science and Utilization, Vol. 13, n° 1, pages 6-14

affirment la qualité du produit résultant. De même pour la STEP d'El Attaouia, les agriculteurs les prélèvent régulièrement et les utilisent comme fumure sur leurs parcelles¹⁶. Rappelons à ce niveau, qu'in ne dispose pas encore au Maroc d'un cadre réglementaire et normatif sur la valorisation des boues.

Cependant, un séchage prolongé des boues avant l'épandage s'avère nécessaire et présente de nombreux intérêts dans la mesure où il permet de les stabiliser et de les hygiéniser.

En effet, les intérêts du séchage prolongé peuvent se présenter comme suit :

- Réduction du volume des boues et donc les frais de stockage (les boues granulées sont faciles durant le stockage) et de transport ;
- Concentration des éléments fertilisants ;
- Stabilisation et hygiénisation des boues (inhibition du développement des agents pathogènes) ;
- Facilité d'épandage par rapport aux boues pâteuses.

Dans le cas d'épandage agricole, et bien que la quantité de boues produites soit faible, il est nécessaire d'élaborer un plan dit « plan d'épandage », actuellement obligatoire dans certains pays (la France, la Jordanie, la Tunisie, etc.). Ce document doit comprendre :

- Une liste des parcelles agricoles concernées par l'épandage ;
- Une caractérisation des boues (teneur en matière organique, éléments fertilisants, pouvoir pathogène, etc.)
- Une caractérisation des sols concernés par l'épandage portant sur l'ensemble des paramètres ;
- Un calendrier prévisionnel d'épandage (dose maximale des boues à appliquer par hectare selon leur qualité agronomique, parcelle, période, délai à respecter entre deux épandages excessifs...etc.)

Les quantités de boues à épandre sont calculées sur la base des besoins agronomiques des parcelles qui varient en fonction du type de culture, type de sol, précédent cultural et caractéristiques des boues.

Vu la faible quantité de boues produites par la STEP de Chouirij, on se propose que les agriculteurs pratiquent eux-mêmes l'épandage en utilisant leurs propres matériels.

L'**Encadré 7** relate un certain nombre de bonnes pratiques d'épandage.

Encadré 7. Bonnes pratiques d'épandage des boues (Soudi, 2003)

L'épandage agricole des boues requiert un ensemble de bonnes pratiques :

- Adaptation de la quantité de boue aux besoins du sol ;
- Incorporation des boues au sol d'une manière uniforme ;
- Analyse des boues produites tous les six mois (matières sèches, matières organiques, pH, N, P, ETM, Etc.) pour s'assurer de son innocuité ;
- Epandage des boues sur les cultures qui ne sont pas consommées à l'état cru ;
- Prévention d'un délai de six mois entre l'épandage des boues et la mise en place de la culture ;
- Eviter l'usage des boues sur des terrains accidentés ;
- Eviter l'utilisation des boues pour les cultures à tubercules.

¹⁶ Projet de Renforcement des Capacités sur l'Utilisation sans danger des Eaux Usées en Agriculture. Rapport National du Maroc. Décembre 2011

III.4. Epandage direct des boues liquides

Les boues liquides issues de la STEP Chouirij sont constituées à environ 98% d'eau, de matière organique et de matière minérale. Ainsi, sous condition qu'elles ne présentent pas de risque pathogène et qu'elles soient préalablement stabilisées chimiquement, les boues peuvent être épandues à l'état brut (sans dispositif de séchage). Une campagne d'analyses sur les boues issues du même procédé d'épuration installé à l'IAV Hassan II, mérite d'être réalisée pour s'assurer de l'innocuité des boues en termes de teneurs de pathogènes.

Dans ce cas, deux scénarios sont envisageables :

Stabilisation chimique + épandage direct des boues liquides avec l'eau épurée : Dans ce cas, le mélange, répondant aux normes de qualité, peut être épandu directement sur les sols agricoles ou les sols dégradés du douar

Stabilisation chimique + épandage direct des boues liquides seules : Dans ce cas, les boues liquides préalablement stabilisées, répondant aux normes de qualité, peuvent être épandues directement sur les parcelles avoisinantes ou les sols dégradés.

III.4.1. Scénario I : Epandage des boues stabilisées avec l'eau épurée

Pour réduire voire supprimer, si possible, les mauvaises odeurs, une stabilisation de la matière organique des boues est nécessaire. Et ce pour limiter la fermentation ultérieure des boues, susceptibles de générer des odeurs et d'altérer leur composition.

Plusieurs agents chimiques sont utilisés dont le plus largement employé est la chaux (éteinte ou vive). Toutefois, il convient de rappeler que si l'épandage des boues chaulées est largement employé et justifié, cette pratique ne semble pas être très justifiée dans le cas du Maroc, à l'instar des pays du Proche-Orient, dont la majorité des sols sont naturellement riches en carbonates de calcium et se caractérisent, dans la majorité des cas, par un pH neutre à franchement basique. L'épandage des boues chaulées risque d'augmenter excessivement le pH et changer les conditions physico-chimiques des sols¹⁷.

Ainsi, on se propose d'utiliser d'autres flocculants comme les chlorures ferriques ou les nitrites. Il importe d'assurer un mélange intime du flocculant avec les boues pour atteindre de bons résultats de stabilisation.

Une fois stabilisées, les boues sont mélangées avec l'eau épurée et sont transportées par citernes jusqu'aux parcelles agricoles ou sites susceptibles de recevoir l'épandage.

III.4.1.1. Volume de boues et eaux épurées

Les boues brutes sont produites à raison de 2,52 m³/j soit 920 m³ annuellement. Quant aux eaux usées épurées, le volume produit est de l'ordre de 66 m³/j et s'élèvera à près de 86 m³/j à l'horizon 2030.

Les volumes annuels de boues et d'eau épurée sont relatés dans le

Tableau 10.

¹⁷ Soudi, B. et Bazza, M. 2003. Manuel sur le traitement et la valorisation des boues résiduaires : Etat de l'art et tentatives d'adaptation aux pays de Proche-Orient. FAO-Caire

Tableau 10. Volume des boues et eaux usées produites au sein de la STEP Chouirij

	2016	2020	2025	2030
Volume journalier (m ³ /j)	69	74	81	90
Volume annuel (m ³ /an)	25 185	27 010	29 565	32 850

III.4.1.2. Stockage et distribution

Le mélange de boues et eau épurée produites par la STEP doit être stocké dans un bassin avant qu'il soit épandu. Le bassin de stockage doit avoir au minimum une capacité de 200 m³.

La distribution du mélange sur les parcelles éloignées de la STEP peut se faire à l'aide des citernes. Pour celles situées aux alentours, les agriculteurs peuvent exploiter leurs propres matériels (motopompes) pour refouler le mélange à partir du bassin de stockage vers les parcelles à irriguer.

III.4.1.3. Superficie irrigable

La superficie irrigable dépend de l'assolement. En effet, les besoins des arbres ne sont pas les mêmes que ceux des autres cultures.

Pour éviter les risques de contamination de l'environnement et de la santé humaine, l'épandage des eaux épurées et des boues peut être assuré en toute sécurité à travers différentes mesures, à savoir : le niveau de traitement des eaux usées, la restriction des cultures à irriguer et les méthodes d'irrigation.

En ce qui concerne les cultures à irriguer, le mélange doit être utilisé seulement pour l'irrigation des cultures qui n'entrent pas en contact direct avec celui-ci dont principalement les arbres fruitiers représentés essentiellement par l'olivier dans la zone d'étude.

Etant donné que l'olivier présente la culture dominante au douar, on se propose d'estimer le potentiel irrigable sur base de ses besoins en eaux.

Les besoins en eau d'olivier sont de l'ordre de 50 l/arbre/jour¹⁸. La densité utilisée est de 100 arbres/ha.

Le **Tableau 11** rapporte la superficie potentielle irrigable.

Tableau 11. Superficie potentielle irrigable par le mélange de boues brutes et eaux épurées

		2016	2020	2025	2030
Volume annuel (m ³ /an)		25 185	27 010	29 565	32 850
Superficie irrigable (ha)	Pour 200j/an*	25	27	29	32
	Pour 300j/an**	16	18	19	21

* Pour une année pluvieuse, les périodes de récolte ne sont pas comptabilisées

** Pour une année de faibles précipitations, les périodes de récolte ne sont pas comptabilisées

III.4.2. Scénario 2 : Epandage des boues liquides seules

Ce scénario prévoit l'épandage de boues liquides seules sous conditions d'absence de pathogènes et d'une stabilisation préalable.

¹⁸ <http://www.sud-et-bio.com/sites/default/files/flash%20oleo%20n4.pdf>

La stabilisation des boues se fait tel que préconisé dans le scénario précédent.

III.4.2.1. Volume de boues produites

Le volume de boues produites, journalier et annuel, est relaté dans le **Tableau 12**.

Tableau 12. Volume de boues produites, journalier et annuel (en m³)

	2016	2020	2025	2030
Volume journalier (m ³ /j)	2,52	2,7	3	3,3
Volume annuel (m ³ /an)	920	986	1 095	1 205

III.4.2.2. Stockage et distribution

A l'instar de ce qui a été prévu dans le précédent scénario, et compte tenu des faibles quantités produites, les boues doivent être stockées dans un bassin avant qu'elles soient épandues. Le bassin de stockage doit avoir au minimum une capacité de 20 m³ pour une autonomie d'une semaine.

Cette faible quantité peut servir juste à l'irrigation des parcelles situées aux alentours de la STEP ou les terres dégradées. Pour la distribution, elle peut se faire soit par citerne soit par le matériel des agriculteurs (motopompes dans le cas des parcelles proches de la STEP).

III.4.2.3. Superficie irrigable

Le nombre d'arbres irrigables est relaté dans le **Tableau 13**.

Tableau 13. Nombre d'arbres irrigables par les boues brutes

		2016	2020	2025	2030
Volume annuel (m ³ /an)		920	986	1 095	1 205
Le nombre d'arbre irrigables	Pour 200j/an	92	98	109	120
	Pour 300j/an	61	65	73	80

Dans le cas d'épandage des boues à l'état liquide (cas des deux scénarios), et à l'instar de ce qui a été préconisé dans le cas d'épandage des boues après un séchage prolongé, il est nécessaire d'établir un plan d'épandage avec un contrôle annuel des boues.

Il est important d'attirer l'attention sur le fait que vu que les boues liquides contiennent, en moyenne, cinq à dix fois plus d'eau par rapport aux boues déshydratées, l'économie de la déshydratation se réaffectera aux dépenses pour le transport. Par conséquent, il faudra déplacer cinq à dix fois plus de boues.

Aussi, les dépenses de transport peuvent être compensées par les apports de plus de nutriments parce qu'en règle générale, les teneurs en éléments sont réduites lors de la déshydratation dont notamment l'azote.

Deux options techniques d'application des boues liquides mélangées ou non avec les eaux usées sont envisageables :

A. Sur terrains plats et en cas d'accessibilités des vergers

Dans ce cas, on peut utiliser des camions citernes ou citernes tractées par un tracteur, et procéder à l'arrosage individuel des cuvettes des arbres. Les camions citernes peuvent être subventionnés par le Fonds de Développement Agricole (FDA) ou par l'ABH dans le cadre de son appui financier aux pratiques d'économie de l'eau et de protection de sa qualité.

B. Sur un terrain en pente ou d'accès difficile aux vergers

Dans ce cas, on peut adopter une technique simple, qui promeut de l'emploi en milieu rural, qui consiste en une solution « locale » d'arrosage de l'olivier, inspirée du projet PAF-MCC (Soudi, 2013)¹⁹ et qui peut se pratiquer dans des vergers privés mitoyens de la STEP. Comme le montre la séquence des photos « a » à « d », un prestataire privé de service « arrosage » utilise un équidé et deux petites citernes d'une trentaine de litres chacune ; Il arrose 100 arbres par jour soit l'équivalent d'un hectare. **C'est une pratique écologique, adaptée aux terrains sur pente et améliorant l'employabilité et le micro-entrepreneuriat de proximité.**



Photo a : Puissement de l'eau – remplissage des citernes



Photo b. Transport vers les arbres



Photo c. Siphonnage de la citerne au seau



Photo d. Arrosage au seau

III.5. Déshydratation des boues dans des lits de séchage plantés de roseaux

III.5.1. Principe de fonctionnement des lits de séchage plantés de roseaux (LSPR)

Le séchage des boues sur lits plantés de roseaux consiste en leur dépôt progressif sur un massif filtrant constitué de différentes couches de matériaux (galets, graves, gravillons et couche d'amendement organique) de granulométrie croissante de la surface vers la profondeur, sur lequel des roseaux se développent.

¹⁹ Soudi. B. 2013. Evaluation finale des projets du compact MCA-MAROC : évaluation environnementale et sociale du Programme d'Arboriculture fruitière. Pour NORC – MCC

Par ailleurs, sous l'action des forces de gravité, l'eau libre contenue dans la boue est drainée vers le fond, où un réseau de drains permet son évacuation. Les drains servent pour la récupération des filtrats et l'aération du massif (favoriser l'activité biologique). Aussi, la minéralisation la matière organique des boues est assurée par l'action bactérienne et faunistique aérobie.

En conditions estivales, en plus de l'évacuation gravitaire de l'eau et l'évaporation directe, le processus de déshydratation est encore accéléré par évapotranspiration des plantes. Ce processus permet d'améliorer la déshydratation atteinte par simple drainage de l'eau libre de 10 à 15 % et d'atteindre des niveaux de siccité supérieurs à 25%²⁰²¹.

Le fond des lits peut être stabilisé par une couche de pierres ou de béton. Aussi, pour favoriser un fonctionnement aérobie des lits, la couche drainante doit être mise en contact avec l'atmosphère par le biais de cheminées d'aération.

Pour les types de végétaux employés, plusieurs types peuvent être utilisés dont les plus importants sont les roseaux (*Genus Phragmites*, *Phragmites australis*) et certaines graminées.

La **Figure 14** présente une coupe schématique de lits plantés de roseaux.

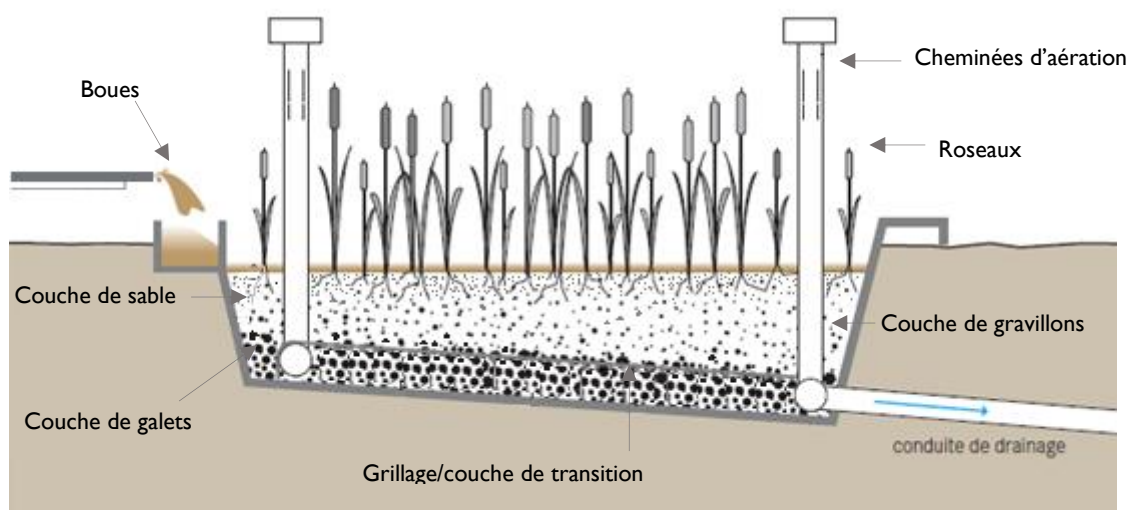


Figure 14. Coupe schématique d'un LSPR²²

III.5.2. Bases de dimensionnement des LSPR

III.5.2.1. Superficie requise et nombre de lits de séchage

Le dimensionnement des LSPR repose sur deux facteurs importants, qui s'estiment sur une base annuelle. Il s'agit de la production annuelle de boues (en Kg de MES/an) et la charge surfacique à appliquer (en kg de MES/m².an).

L'**Encadré 8** relate le détail de calcul de la superficie requise pour le dispositif de séchage des boues sur lits plantés de roseaux.

²⁰ ONEMA/irstea. 2013. Les lits de séchage de boues plantés de roseaux pour le traitement des boues et des matières de vidange : Guide de dimensionnement et de gestion

²¹ Liénard A., Troesch S., Molle P. et Esser D. Traitement des boues par lits plantés de roseaux : Rappels des points clefs de cette technique. Ingénieries n° spécial p. 41 à 49

²² Inspiré de <http://docplayer.fr/11395022-Guide-technique-filieres-de-traitements-des-matieres-de-vidange.html>

Encadré 8. Calcul de la superficie requise pour les LSPR

La production annuelle des boues du douar Chouirij est estimée à 4309 kg de MS en 2016 et s'élèvera à 5663 kg de boues sèches à l'horizon 2030.

Selon les données de la littérature²³, la charge surfacique est fixée à 50 kg de MES/m².an. Cette valeur est valable pour le cas où le développement des roseaux est optimal, après une phase d'acclimatation.

*Il importe de souligner que la charge surfacique doit tenir compte des surcharges passagères résultant de la mise au repos d'un ou plusieurs lits. En effet, la mise en place de périodes de repos est indispensable à la minéralisation aérobie de la boue. La durée de repos est estimée à **cinq mois chaque année** et ce ne doit pas entraîner un dépassement équivalent à 60 kg de MS/m².an.*

Par ailleurs, l'utilisation des charges surfaciques trop élevées risque de nuire au bon fonctionnement de roseaux et alors influencer les performances de séchage et de minéralisation.

*Compte tenu des deux facteurs de dimensionnement, la superficie requise pour l'implantation du dispositif de séchage est estimée à **114 m²**.*

Pour le nombre de lits requis, pour avoir une meilleure souplesse de gestion et garantir les meilleurs résultats de siccité et de minéralisation, les LSPR doivent comporter suffisamment d'unités de séchage pour profiter de longues périodes de repos.

Par ailleurs, plus la charge surfacique de dimensionnement est élevée (ce qui se répercute sur la superficie requise), plus on doit disposer davantage de lits pour ne pas nuire au bon fonctionnement du dispositif. Pour une charge surfacique de 50 kg MS/m²/an, il faut **8 lits de séchage**²⁴. La superficie unitaire des lits est de l'ordre de 14 m².

En ce qui concerne la configuration spatiale, les lits peuvent être conçus en béton, en mode déblai-remblai ou mixte. Toutefois, le mode constructif dépend de plusieurs facteurs dont principalement du coût.

Comparé au casier bétonné, le mode constructif en déblai-remblai, présente plus d'avantages dans la mesure où il permet une intégration paysagère, facilite les opérations de curage et permet de diminuer la charge surfacique en augmentant la hauteur des boues accumulées.

La **Figure 15** illustre les deux configurations des LSPR largement employées.

²³ Liénard, A., 1999, Déshydratation des boues par lits de séchage plantés de roseaux, Ingénieries-EAT, no17, p. 33-45

²⁴ ONEMA/irstea. 2013. Les lits de séchage de boues plantés de roseaux pour le traitement des boues et des matières de vidange : Guide de dimensionnement et de gestion

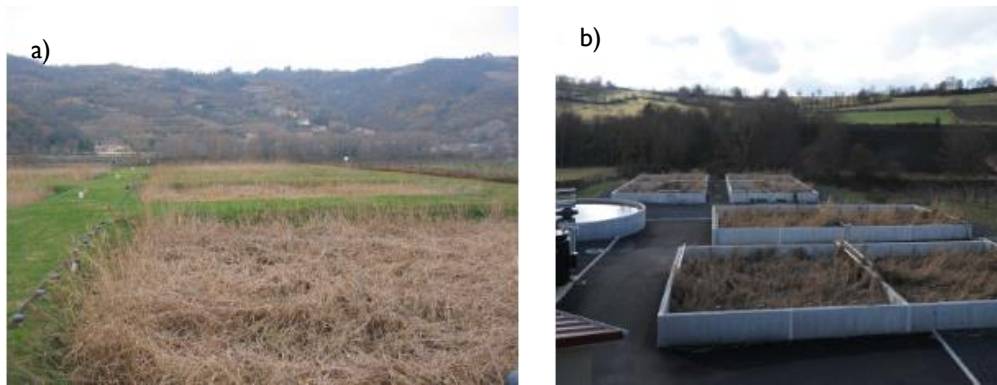


Figure 15. Configuration des LSPR, a) déblai-remblai b) casier béton

Il est à noter également que la configuration en déblais-remblais autorise aux engins de curage de pouvoir descendre sur les lits de séchage en aménageant des rampes d'accès.

III.5.2.2. Couches du massif filtrant

La granulométrie est un paramètre clé pour assurer l'efficacité de filtration et du drainage. En effet, le matériau utilisé ne doit pas être trop grossier, limitant la formation du dépôt de boues, ni trop fin limitant le transfert d'oxygène et le drainage de l'eau gravitaire.

Le massif filtrant est constitué de trois couches drainantes (**Figure 16**) :

- **Une couche superficielle de filtration** (5-15 cm d'épaisseur selon le matériau utilisé) : Elle est généralement constituée de sable grossier (5 cm). Aussi, l'utilisation du compost de déchets verts avec une perméabilité non limitante est recommandé, servant à la fois comme support de filtration et de croissance des roseaux.
- **Une couche de gravillon** (3/6 mm sur 20 à 30 cm) : Le diamètre du matériau doit être supérieur à 2/4 mm pour éviter le drainage des particules fines vers le fond.
- **Une couche de transition** (10 cm d'épaisseur) : La granulométrie de cette couche doit être intermédiaire entre les deux couches qu'elle sépare.
- **Une couche de galets** (15 cm d'épaisseur) : La granulométrie doit être entre 15/30 mm et 30/60. Pour éviter la stagnation de l'eau et l'aération du massif, cette couche doit contenir des drains.

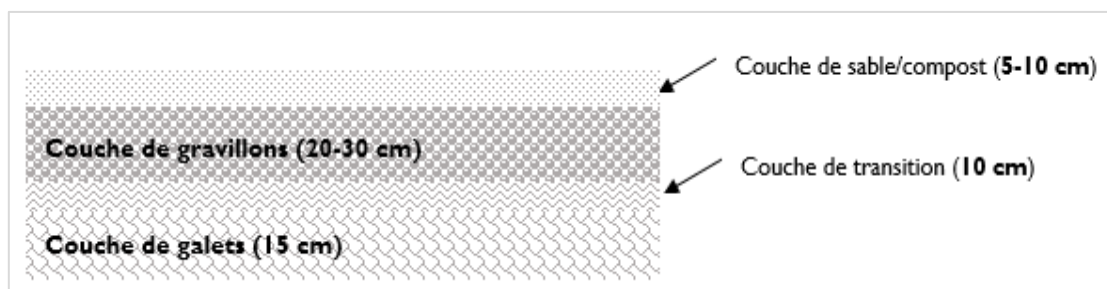


Figure 16. Schéma des différentes couches du massif filtrant

Pour un drainage adéquat des percolats, une pente d'environ 0,5 à 1 % est nécessaire en fond du massif filtrant.

III.5.2.3. Développement des roseaux

Le bon fonctionnement des LSPR dépend de la densité des plantes (la densité des tiges et des racines) qui joue un rôle crucial tant au niveau du drainage que de la déshydratation. En effet, les roseaux doivent être présents en quantité suffisante (>250 tiges par m^2)²⁵ afin de permettre l'évacuation en permanence de l'eau en tous points de lits. A cet effet, une période d'acclimatation est nécessaire avant de recevoir des apports de boues.

Lors de la plantation des roseaux, une densité de minimale de quatre pieds par m^2 (une plantule tous les 50 cm dans les deux directions) est recommandée^{26,27}.

Pour une bonne adaptation aux conditions rencontrées dans les lits de séchage, il est conseillé d'utiliser des roseaux provenant de filtres plantés de roseaux (FPR) employés pour le traitement des eaux usées ou de LSPR utilisés pour le traitement des boues.

La période de plantation favorable est comprise entre avril et septembre.

Pour atteindre une densité de 250 tiges par m^2 , la période d'acclimatation (sans apport de boues) doit durer de 7 mois à un an.

L'alimentation en eau des roseaux peut se faire par le biais des eaux usées de la STEP. Aussi, des apports ponctuels de boues peuvent être effectués pour apporter les nutriments nécessaires au développement des roseaux.

III.5.2.4. Alimentation des lits de séchage et mise en repos

Après un développement optimal de roseaux, les boues provenant du clarificateur devront être épandues directement en surface du lit avec une bonne distribution sur sa totalité. Selon la littérature²⁸, le débit doit être supérieur à $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$.

Selon les données étayées dans les études de cas du séchage de boues sur LSPR (cas de la STEP de Béja, Tunisie)²⁹, la hauteur utile du lit doit permettre l'accumulation de 1.50 à 2 m de boues.

L'alimentation des lits passe par trois principales phases :

- **Phase de démarrage**, où l'alimentation en boues se fait d'une manière progressive jusqu'à atteindre la moitié de la charge nominale (soit $25 \text{ kg MS}/\text{m}^2/\text{an}$), et ce pour permettre l'adaptation des végétaux.
- **Phase de fonctionnement nominal**, où la charge est augmentée progressivement jusqu'à atteindre la charge surfacique de dimensionnement (soit $50 \text{ kg MS}/\text{m}^2/\text{an}$). Il est important que ce stade commence au printemps pour que la charge atteigne sa valeur maximale en été (ce qui favorable pour le stade de mise en repos des lits)
- **Phase de mise en repos**, avant le curage, où le lit doit être mis en repos prolongé pour atteindre des taux de siccité élevés. Cette phase peut durer de 4 à 6 mois, voire plus et il est

²⁵ Liénard A., Canler J.P., Mesnier M., Troesch S. et Boutin C. 2008. Le traitement des matières de vidange : en station d'épuration ou en lits plantés de roseaux ? Ingénieries n° 53 - p. 35 à 48. Mars 2008

²⁶ Liénard A., Troesch S., Molle P. et Esser D. Traitement des boues par lits plantés de roseaux : Rappels des points clefs de cette technique. Ingénieries n° spécial p. 41 à 49

²⁷ ONEMA/irstea. 2013. Les lits de séchage de boues plantés de roseaux pour le traitement des boues et des matières de vidange : Guide de dimensionnement et de gestion

²⁸ Liénard A., Troesch S., Molle P. et Esser D. Traitement des boues par lits plantés de roseaux : Rappels des points clefs de cette technique. Ingénieries n° spécial p. 41 à 49

²⁹ FiW. Elaboration du Plan d'Action de Gestion des Boues en Tunisie : Plan d'intervention pour la STEP de Béja

préférable de la programmer pendant la période estivale pour pouvoir profiter des conditions favorables pour accélérer le processus de séchage.

Après les opérations de curage, une réalimentation des lits curés doit être effectuée à mi-charge de la charge maximale, et doit être augmentée jusqu'à atteindre la charge maximale.

Le **Tableau I4** rapporte les charges surfaciques à appliquer selon les phases de fonctionnement.

Tableau I4. Charge surfacique à appliquer lors des différentes phases de fonctionnement des LSPR

Charge surfacique à appliquer (en kg MS/m ² /an)		
Phase de démarrage	Phase de fonctionnement nominal	Curage (surcharge acceptable sur les lits en fonctionnement)
25	50	55-60

Pour les percolats produits lors du traitement, ils doivent être traités par retour en tête de station. Cette pratique ne présente pas de risque pour le fonctionnement de la station, puisque les percolats sont moins chargés et non septiques.

En guise de récapitulation, la **Figure I7** rapporte les principales phases de fonctionnement des LSPR.

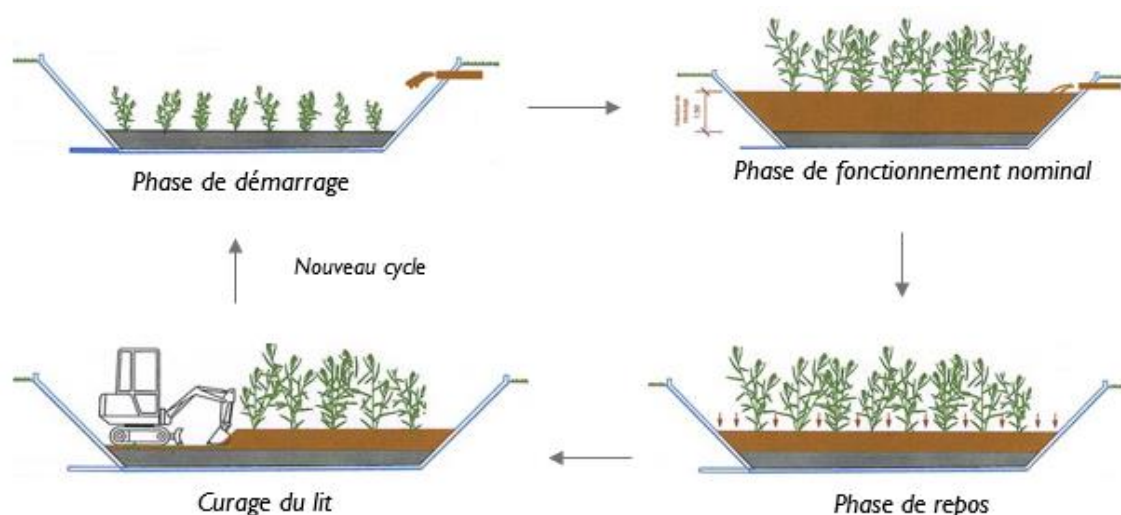


Figure I7. Principales phase du fonctionnement des LSPR

La **Figure I8** illustre le comportement de l'ensemble des lits lors des différentes phases de traitement.

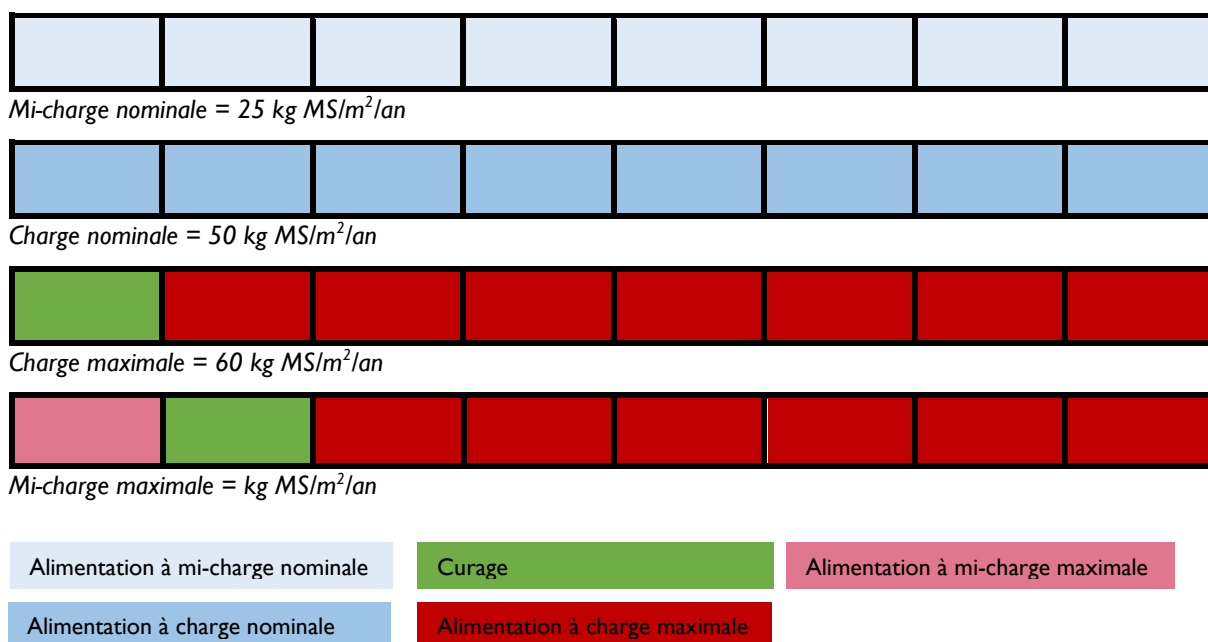


Figure 18. Comportement de l'ensemble des lits lors des différentes phases de fonctionnement

III.5.2.5. Qualité et devenir des boues

Les boues issues des LSPR peuvent être épandues sur les parcelles agricoles du douar ou sur les sols dégradés. Aussi, elles peuvent être co-compostées avec les déchets verts agricoles comme a été préconisé pour les boues à la sortie des lits de séchage sous serre (avec séchage partiel).

En ce qui concerne l'efficacité du traitement dans l'élimination des germes pathogènes, selon les résultats d'analyses, effectuées en Allemagne sur les boues résultant du traitement par LSPR³⁰, il y a eu une décroissance remarquable du pouvoir pathogène (*Coliformes Fécaux*, *Œufs de parasites* et *Salmonelles*) après une période de conversion de deux mois et un temps de séjour de deux semaines. Les salmonelles ne sont pas trouvées dans les boues traitées.

III.6. Déshydratation des boues liquides par une unité mobile et co-compostage avec les déchets verts agricoles

Cette option prévoit que la déshydratation des boues liquides soit réalisée à l'aide d'une unité mobile. Il s'agit d'une unité de déshydratation montée sur un camion. Le principe de fonctionnement est le même qu'une unité de déshydratation statique. Cette proposition s'inspire des exemples actuellement en service à l'échelle internationale.

La déshydratation peut être effectuée au moyen d'unité mobile de type :

- Filtre presse mobile à plateaux chambrés
- Filtre presse mobile à plateaux membranes
- Centrifugeuse mobile bi-phasique ou tri-phasique



Unité mobile de déshydratation

³⁰IPP Consult-GTZ (2002) dans FiW. Elaboration du Plan d'Action de Gestion des Boues en Tunisie : Plan d'intervention pour la STEP de Béja

- Filtre à bandes mobile

Le choix de l'unité mobile à mettre en place est lié à la qualité physico-chimique des boues (abrasivité, densité des boues, etc.)

Il est important de souligner que cette option ne peut être envisagée dans le moyen et le long terme pour un ensemble de douars (quand ils seront équipés de stations d'épurations), pour lesquels la mise en place d'un dispositif fixe de déshydratation serait trop coûteuse.

Pour cela, il faut équiper les stations d'épuration concernées d'un espace d'accueil pour l'unité mobile, avec récupération des lixiviats produits lors de la déshydratation. Cet espace doit être bétonné, équipé d'un muret technique pour brancher l'unité mobile à l'eau et à l'électricité. Aussi, il faut envisager un espace de stockage des boues déshydratées.

Les boues ainsi déshydratées, au sein de chaque douar, seront transportées sur une plate-forme de compostage collectif. Comme il n'existe pas de plate-forme de compostage sur ce secteur, il est donc envisagé de la construire à une distance économiquement viable pour l'ensemble des douars concernés.

Cette option offre l'avantage de limiter les coûts d'équiper chaque douar d'unité de déshydratation et de plate-forme de compostage. Elle permet également de limiter les coûts associés au transport des boues liquides ainsi que les nuisances qui y sont associées.

IV. ESTIMATIF DES COÛTS DE REALISATION DES OUVRAGES DE TRAITEMENT ET DE VALORISATION DES BOUES

L'estimation des coûts relatifs à la réalisation des ouvrages de traitement et de valorisation des boues a été effectuée en s'inspirant des expériences similaires au niveau national et international (soit de traitement par séchage solaire sous serres ou de valorisation des boues par compostage) et en examinant les offres de prix relatives différents matériel et équipements requis.

Il importe de signaler que des rubriques n'ont pas été comptabilisées dont notamment : le terrain (comptabilisé dans les frais d'investissement de la STEP), les matières premières (boues et déchets agricoles), les frais de transport des déchets agricoles et de fumier (vu l'absence de données relatives aux distances des différents points de production par rapport à la STEP), les frais de suivi du fonctionnement de l'unité de compostage et du dispositif de séchage et les frais d'entretien du matériel.

Aussi, la plate-forme de compostage préconisée dans l'option 6, prévue après la déshydratation des boues par unité mobile, n'est comptabilisée parce que son dimensionnement dépendra des quantités de boues produites par l'ensemble des douars concernés par cette option.

IV.1. Coût d'implantation du dispositif de séchage solaire sous-serre

L'estimation du coût d'investissement du dispositif de séchage solaire sous serre a été effectuée en se référant à une corrélation entre le coût d'investissement et la surface de traitement de la serre.

Le **Tableau 15** relate le coût d'investissement et de fonctionnement du dispositif de séchage.

Tableau 15. Coût d'investissement et de fonctionnement du dispositif de séchage de Chouirij

Désignation	Nombre d'unités	Prix unitaire (en DH)	Total
Investissement			
Serre agricole	60 m ²	35 DH/m ²	2 100,00
Ventilateurs de 200 m ³ /h Optionnels car la ventilation naturelle serait suffisante	2	2 000	4 000,00
Total 1			6 100,00
Fonctionnement			
Main d'œuvre	1	2100 DH/mois sur base du SMAG (2016)	25 200,00
Total 2			25 200,00
Total			31 300,00

IV.2. Coût d'implantation de la plateforme de compostage

Les coûts d'investissement et de fonctionnement des infrastructures et des équipements de la plateforme de compostage sont rapportés respectivement dans les tableaux 16 et 17.

Tableau 16. Coût d'investissement de l'installation de la plateforme de compostage de Chouirij

Rubrique	Nombre d'unités	Prix unitaire	Total
Constructions et infrastructures			
Petit hangar pour maturation et stockage	15 m ²	800,00 DH	12 000,00
Imperméabilisation des aires de réception, de fermentation et de maturation	55m ²	140 DH/m ²	7 700,00
Bassin de récupération des lixiviats	1	-	3 500,00
Total			23 200,00
Matériel et équipements			
Tamiseur	1	120 000	120 000,00
Broyeur	1	80 000	80 000,00
Autres matériels et petit outillage	-	-	15 000,00
Total			215 000,00
Totaux d'investissement			238 200,00

Tableau 17. Coût de fonctionnement de l'installation de la plateforme de compostage de Chouirij

Rubriques	Prix unitaire(en DH)	Montant annuel (en DH)
1 Ouvrier qualifié permanent	Formé et mis à disposition par la commune	
1 chauffeur occasionnel	300,00/fois	1 800,00
Déchets agricoles Fumier livré par les agriculteurs qui bénéficieront du compost	Fournis par les agriculteurs du douar	
Boues d'épuration	Fournies par la STEP	
Totaux de fonctionnement		1 800,00

Pour le cas du lombricompostage, le prix des vers de terres varie selon l'espèce. Ils varient entre 240 et 800 DH/kg de vers³¹.

Sur la base d'un tonnage de déchets de l'ordre de 15,3 tonnes/an et compte tenu du taux de réduction de la masse du compost au cours du processus (réduction de 50% soit 8 tonnes de compost), le coût d'investissement, rapporté au kg de compost produit, est près de 30 DH. Soulignant toutefois que ce coût peut être revu à la baisse du fait que la capacité de traitement peut être haussée pour le même niveau d'investissement.

Comparé au coût de dégradation de l'environnement à cause des déchets traités (boues d'épuration, déchets agricoles et fumier d'élevage), ces frais restent largement inférieurs.

Il est important de signaler que l'étude technico-économique des deux premières options a permis de relever certains constats :

- ***Coût élevé par rapport à la quantité de boues produites ;***
- ***Faible quantité de boues par rapport aux quantités de déchets verts agricoles à composter ;***
- ***Volume important d'eau à évaporer***

IV.3. Coût relatif à l'épandage des boues à l'état liquide

Pour les citernes de transport et des boues et eaux épurées avec une capacité de 2000 litres, elles coûtent entre 30 000 et 40 000 DH.

IV.4. Coût du dispositif de séchage sur des lits plantés de roseaux

La fourchette de coût d'investissement (équipement + installation) des LSPR varie entre 1000 et 1400 DH/ tonne de MS. Le coût de fonctionnement est relativement faible

V. EVALUATION GLOBALE DE LA PERTINENCE DES OPTIONS PROPOSEES ET DE LEUR ADAPTABILITE AU CONTEXTE DU SITE DU PROJET

La matrice décisionnelle suivante (**Tableau 18**) relate les éléments d'appréciation de la pertinence des options et de leur adaptabilité au contexte du projet. Ceci a permis de classer les options économiquement et techniquement faisables et adaptées au contexte agro-climatique.

Le déficit climatique de la zone ne justifie pas d'évaporer 98% d'eau pour récupérer 2% de boues. En effet, les boues générées par la STEP sont pratiquement liquides et si le séchage généralement préconisé pour récupérer le peu de boues, se justifie dans les pays à climat humide pour réduire le coût de transport, il semble être caduque dans le Tensift caractérisé par un grand déficit climatique bien qu'il offre de grands atouts en termes de capacité évaporatoire. C'est ainsi qu'il est recommandé de promouvoir l'option de valorisation des boues à l'état liquide, seules ou mélangées aux eaux usées épurées. Cette dernière option est jugée la meilleure. Dans le contexte actuel du système d'Épuration - Traitement – Valorisation pour le douar de Chouirij. Cette option permet une valorisation maximale des sous-produits.

Toutefois, deux conditionnalités préalables sont à considérer : i) la promulgation du Décret relatif à la valorisation des boues qui devra inclure l'option de valorisation des

³¹ <http://www.fermedumoutta.fr/vente-vers-lombric.html>

boues liquides stabilisées pour les STEPs en milieu rural, et ii) la réalisation d'une campagne d'analyse microbiologique et parasitaire des boues de la STEP de l'IAV Hassan II pour s'assurer de leur innocuité.

L'option relative aux lits de séchage plantés est aussi intéressante mais la superficie requise est relativement élevée et requiert un niveau de maintenance relativement élevé. Elle peut être adaptée pour des douars de taille plus grande et notamment ceux riverains des cours d'eau en aval.

Le dispositif de déshydratation mobile est attrayant et faisable car il permettrait d'avoir un gain en termes d'économie d'échelle et d'avoir des boues qui peuvent être mis en co-compostage dans une plateforme collective. Mais comme le Douar Chouirij est le seul douar dans son environnement qui sera doté d'une STEP dans le court terme, cette option n'est envisageable que dans le long terme.

Tableau 18. Classement des options économiquement et techniquement faisables et adaptées au contexte agro-climatique du douar Chouirij

Option	Consistance	Coût	Gain en eau des boues dans un contexte aride	Potentiel valorisable	Flexibilité et faisabilité technique	Valeur agronomique dégagée^{\$}	Classement
I	Traitement des boues par séchage solaire sous serre (séchage partiel) + Valorisation agricole des boues par co-compostage (boues et déchets verts agricoles et d'élevage)	Elevé	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée (qualité)	4
II	Traitement des boues par séchage solaire prolongé + valorisation agricole et/ou réhabilitation des terres dégradées par épandage direct	Elevé	Très faible	Faible	Moyenne	Moyenne	5
III-1	Stabilisation chimique des boues + épandage à l'état liquide	Faible	Elevé	Elevé	Très élevée	Elevée	2
III-2	Stabilisation chimique des boues + épandage des boues liquides + eaux usées épurées	Faible	Très élevée	Très élevé	Très élevée	Très élevée	1
IV	Séchage des boues sur des lits de séchage plantés de roseaux + valorisation agricole	Moyen	Faible à moyen	Moyen	Faible à moyenne	Elevée	3
V	Déshydratation mobile et co-compostage collectif	Option faisable mais dans le moyen et long terme avec le développement de l'assainissement rural					

^{\$} : En termes de superficie emblavée, volume apportée, éléments nutritifs et matière organique