

Secrétariat d'Etat auprès du Ministère
de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de
l'Environnement,
Chargé de l'Eau et de l'Environnement

Département de l'Environnement

المملكة المغربية
Royaume du Maroc



كتابة الدولة لدى وزارة الطاقة والمعادن
والماء والبيئة
المكلفة بالماء والبيئة

قطاع البيئة

Manuel de Bonnes Pratiques

Version définitive

Avril 2011



phenixa@phenixa.com
www.phenixa.com



fiw@fiw.rwth-aachen.de
www.fiw.rwth-aachen.de

Ce document est un manuel ayant pour objectif de guider les gestionnaires des STEPs industrielles et urbaines et les usagers potentiels des boues d'épuration à la mise en œuvre des plans de gestion des boues

Ce manuel est un document visant le supplément de
« L'Etude pour l'Elaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Epuration des Eaux au Maroc »

Version définitive

Avril 2011

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABREVIATIONS	

Introduction

1	Vue synoptique.....	4
1.1	ASPECTS GENERALES DU TRAITEMENT DES EAUX USEES ET DE LA GESTION DES BOUES.....	4
1.2	REVUE DES FILIERES ET TECHNOLOGIES DE GESTION.....	7
1.2.1	ÉPAISSISSEMENT	7
1.2.1.1	Épaississement statique gravitaire	8
1.2.1.2	Epaississement dynamique	8
1.2.1.3	Epaississement dynamique par centrifugation	8
1.2.1.4	Récapitulatif sur les rendements et les performances des techniques d'épaississement	9
1.2.2	DESHYDRATATION.....	10
1.2.3	SECHAGE NATUREL.....	11
1.2.4	STABILISATION AEROBIE ET ANAEROBIE.....	14
1.2.5	STABILISATION CHIMIQUE	16
1.2.6	VALORISATION VERTE	17
1.2.6.1	Compostage ou co-compostage	17
1.2.6.2	Valorisation agricole	19
1.2.6.3	Valorisation des boues pour la réhabilitation et la végétalisation des sites dégradés	20
1.2.6.4	Valorisation des boues en sylviculture	21
1.2.7	VALORISATION THERMIQUE.....	22
1.2.7.1	Valorisation des boues dans des cimenteries	22
1.2.7.2	Valorisation des boues dans des centrales électriques	24
1.2.8	ÉLIMINATION DES BOUES	24
1.2.8.1	Mise en décharge.....	24
1.2.8.2	Mono-décharge (boues seules)	24
1.2.8.3	Décharge mixte (boues et déchets ménagers)	26
1.2.8.4	Incinération.....	26
1.3	FILIERES ET TECHNOLOGIES DE GESTION DES BOUES ADAPTEES AU CONTEXTE MAROCAIN.....	28
1.3.1	PRINCIPES DIRECTEURS DE CHOIX	28
1.3.2	FILIERES ADAPTEES AU CONTEXTE MAROCAIN	28
1.3.2.1	Catégorisation des boues	28
1.3.2.2	Élaboration des schémas de filières	30
1.4	AUTRES ASPECTS ET PARAMETRES DE CHOIX POUR LA TECHNOLOGIE DE GESTION DES BOUES FAVORABLE	33
1.4.1	CRITERES DE CHOIX.....	33
1.4.2	ASPECTS HYGIENIQUES.....	37
1.4.3	COUTS, ASPECTS ECONOMIQUES	40

2 Filières de traitement – Epaississement, Déshydratation	44
2.1 PREAMBULE	44
2.2 INTRODUCTION	45
2.3 PRINCIPE, CONDITIONS D'APPLICATION.....	46
2.4 AVANTAGES, INCONVENIENTS, CONTRAINTES	49
2.5 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	50
3 Filières de traitement - Stabilisation.....	51
3.1 INTRODUCTION	51
3.2 PRINCIPE, CONDITIONS D'APPLICATION	52
3.3 AVANTAGES, INCONVENIENTS, CONTRAINTES	54
3.4 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	55
4 Filières de traitement – Conditionnement - Stabilisation chimique des boues à la chaux	56
4.1 INTRODUCTION	56
4.2 PRINCIPE, CONDITIONS D'APPLICATION.....	56
4.3 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	56
5 Filières de traitement - Séchage solaire sur lits de séchage (séchage naturel)	57
5.1 PRINCIPE ET SCHEMA.....	57
5.2 CONTRAINTES	59
5.3 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	59
6 Filières de valorisation – Séchage des boues avec lits plantés de roseaux	60
6.1 PRINCIPE ET SCHEMA.....	60
6.2 AVANTAGES.....	62
6.3 CONTRAINTES	65
6.4 ORDRE DE GRANDEUR DE COUT.....	66
6.5 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	66
7 Filières de traitement - Séchage des boues avec l'énergie solaire.....	67
7.1 INTRODUCTION	67
7.2 PRINCIPE.....	68
7.3 DEDUCTIONS POUR LE CAS DU MAROC.....	73
7.4 ORDRE DE GRANDEUR DE COUT.....	73
7.5 RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	74
8 Filières de valorisation verte - compostage.....	75

8.1	PREAMBULE	75
8.2	CO - COMPOSTAGE DES BOUES AVEC D'AUTRES DECHETS	75
8.3	RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	76
9	Valorisation énergétique des boues dans des cimenteries.....	78
9.1	PRINCIPE ET SCHEMA	78
9.2	RECOMMANDATIONS PRATIQUES.....	80
10	Etude de compatibilité environnementale des procédés de traitement des boues d'épuration.....	81
10.1	INTRODUCTION	81
10.2	DEMARCHE METHODIQUE POUR COMPARER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	82
10.3	CONDITIONS CADRES TECHNIQUES ET LIMITES DU SYSTEME	83
10.4	CRITERES D'EVALUATION DES CHARGES ENVIRONNEMENTALES	84
10.5	POLLUANT PRIS EN COMPTE	86
10.6	CHEMINS CONSIDERES	88
10.7	IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIVERSES OPTIONS D'EVACUATION DES BOUES D'EPURATION.....	89
10.8	EVALUATION COMPARATIVE ET RESUME	89
11	Eléments de contrôle et de surveillance	91
11.1	BOUES	91
11.2	VEGETAUX.....	92
11.3	SOLS.....	92
11.4	EAUX	92
11.5	RECAPITULATIF DE QUELQUES BONNES PRATIQUES	93
11.6	INDICATEURS DE PERFORMANCE DE LA GESTION DE LA FILIERE « BOUES »	94
12	Contexte réglementaire marocain.....	96
12.1	DAHIR 25 AOUT 1914.....	96
12.2	LOI 12-03 RELATIVE AUX ETUDES D'IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	96
12.3	LOI 10-95 SUR L'EAU.....	96
12.4	LOI 28-00 RELATIVE A LA GESTION DES DECHETS	97
13	Références bibliographiques	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Revue des filières et technologies de gestion	1
Tableau 2 : Exemples des performances en épaissement de boues	9
Tableau 3 : Les différents seuils de séchage en fonction de la destination finale des boues	14
Tableau 4 : Les différents seuils en fonction des procédés de décontamination.....	37
Tableau 5 : Consommation spécifique et frais de consommation des adjuvants de floculation.....	49
Tableau 6 : Consommation d'adjuvants de floculation pour différents modes déshydratation	49
Tableau 7 : Rendement de différents modes de déshydratation et consommation d'énergie	50
Tableau 8 : Les différents seuils de séchage en fonction de la qualité de boue	50
Tableau 9 : Les différents seuils de séchage en fonction du procédé.....	54
Tableau 10 : Les différents seuils de séchage en fonction de la destination finale des boues	55
Tableau 11 : Les différents seuils de séchage en fonction du processus.....	55
Tableau 12 : Performances de séchage des boues avec l'énergie solaire	71
Tableau 13 : Teneurs approximatives en azote et rapport C/N de quelques matières organiques compostables (Gootas, 1959 ; US-EPA, 1985 ; Mustin, 1987)	75
Tableau 14 : Variantes de système à étudier (exemple).....	83
Tableau 15 : Critères environnementaux pour comparer les systèmes.....	85
Tableau 16 : Liste des substances de référence pour comparer les variantes de procédés d'évacuation des boues d'épuration.....	87
Tableau 17 : Dispositions réglementaires régissant les boues industrielles dans le CMD.....	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Filière de traitement – Épaississement et déshydratation mécanique.....	7
Figure 2 : Filières de séchage des boues.....	11
Figure 3 : Filières de Stabilisation des boues	14
Figure 4 : Filières de Valorisation « verte » des boues	17
Figure 5 : Filière de co-compostage	19
Figure 6 : Procédure d'acceptation et de contrôle de déchets.....	23
Figure 7 : Schéma des voies de traitement dans le but d'une mise en décharge.....	26
Figure 8 : Schéma des catégories de boues au Maroc.....	29
Figure 9 : Schéma d'une filiere de traitement/valorisation des boues (sans risques de toxicité)	30
Figure 10 : Filière de traitement/valorisation des boues de categorie 2	32
Figure 11 : Schéma du choix de la technologie	33
Figure 12 : Filières d'hygienisation	37
Figure 13 : Filières de gestion des boues et couts pertinents	42
Figure 14 : Marge des coûts de valorisation en Euro	43
Figure 15 : STEP avec aération prolongée, à droite 3 silos (réservoirs de boue pour valorisation agricole).....	44
Figure 16 : La déshydratation des boues en Allemagne (base en haut : nombre de STEP, base en bas : EH).....	46
Figure 17 : Schéma de filtre à bandes	47
Figure 18 : Schéma de filtre-presse à Chambres.....	47
Figure 19 : Schéma de centrifugeuse	48
Figure 20 : Schéma et filieres de filtration avec filtre-presse à chambres.....	48

Figure 21 : Digesteurs (volume 4 x 15 000 m ³) de la STEP Bottrop de l'Emschergenossenschaft	51
Figure 22 : La stabilisation des boues en Allemagne (base : EH).....	52
Figure 23 : Construction d'un réacteur pour stabilisation anaérobie	53
Figure 24 : Production du biogaz lors de la stabilisation anaérobie	53
Figure 25 : Développement de gaz en fonction de temps de digestion	54
Figure 26 : Schéma de principe du mode de stabilisation chimique des boues (FNDAE, 1990)	56
Figure 27 : Photo de lits de séchage.....	57
Figure 28 : Dimensions de lit de séchage	58
Figure 29 : Superficie requise pour le séchage naturel en fonction du volume annuel en millions de gallons (multiplier par 3785 pour convertir en m ³)	58
Figure 30 : Humidité des boues et Oeufs d'ascaris/ gr MS En fonction du temps du stockage	59
Figure 31 : Photo de Station phragmicompostage d'Albon	60
Figure 32 : Schéma des lits plantés de roseaux	61
Figure 33 : Schéma de principe.....	61
Figure 34: Boue décomposée (Photo empruntée du rapport de synthèse de GTZ – IPP Consult (2002))	63
Figure 35: Photo Plantation des roseaux	64
Figure 36: Photo Lits imperméabilisés avec un système d'arrosage et de drainage	64
Figure 37: Photo Lits imperméabilisés avec un système d'arrosage et de drainage	65
Figure 38 : Schéma Séchage solaire	67
Figure 39 : Assemblage de photos des STEP adoptant la technologie de séchage solaire selon le procédé Thermo-System (photos du fabricant).....	68
Figure 40 : Remplissage des boues, avec des Pompes (D'après le fabricant (1))	69
Figure 41 : Remplissage des boues, avec le camion (D'après le fabricant (1))	69
Figure 42 : Engin d'épandage et de travail superficiel des boues (sangler électrique) (D'après le fabricant (1))	70
Figure 43 : Evolution de la teneur en matière sèche des boues en fonction des saisons	72
Figure 44 : Rentabilité économique du système	72
Figure 45 : Filière de compostage	77
Figure 46 : Addition des boues d'épuration dans le broyage/séchage du four à ciment	78
Figure 47 : Addition des boues d'épuration avec la pierre pulvérisée dans le four du ciment	79
Figure 48 : Cimenterie Beerenburg (Allemagne) : réservoir de boues déshydratées (à gauche), réservoir des pierres pulvérisées (à droite)	79
Figure 49 : Sous-étapes de l'analyse et évaluation des impacts environnementaux des diverses options d'évacuation des boues d'épuration	82
Figure 50 : Systèmes étudiés dans l'étude de compatibilité environnementale pour l'évacuation des boues d'épuration	84
Figure 51 : Chemins critique pour valorisation agricole des boues	88
Figure 52 : Conflits d'objectifs environnementaux avec l'évacuation des boues d'épuration	90
Figure 53 : Voies de transfert et d'exposition des pathogènes	91
Figure 54 : Description de la filière « boues ».....	94
Figure 55 : Indicateurs de performance de la filière boues	95

LISTE DES ABREVIATIONS

ABH	Agence de Bassin Hydraulique
AMF	Association des Maires de France
BM	Banque Mondiale
BU	Boues Urbaines
BI	Boues Industrielles
C	Carbone
CE	Conductivité Electrique
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CEE	Communauté Economique Européenne
CEN	Commission Européenne de Normalisation
CET	Centre d'Enfouissement Technique
CF	Coliformes Fécaux
CGEM	Confédération Générale des Entreprises du Maroc
CMA	Coût Moyen Actualisé
CMA	Concentration totale Maximale Admissible
CMD	Catalogue Marocain des Déchets
CMPP	Centre Marocain de Production Propre
CNE	Conseil National de l'Environnement
CPS	Cahiers des Prescriptions Spéciales
CTO	Composés Traces Organiques
C/N	Rapport Carbone sur Azote
DBO5	Demande Biologique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DE	Dépenses d'Exploitation
DEPP	Direction des Etudes de la Planification et de la Prospective
DGCL	Direction Générale des Collectivités Locales
DIB	Déchets Industriels Banals
DID	Déchets Industriels Dangereux
DIED	Développement Industriel Ecologiquement Durable
DRC	Direction Réglementation et Contrôle
DRPE	Direction de la Recherche et de la Planification en Eau
EH	Equivalent Habitant
EPA	Environment Protection Agency
EPT	Elément Potentiellement Toxique
ERU	Eaux Résiduaires Urbaines
ETM	Eléments Traces Métalliques
FMC	Flux Maximal Cumulé
FODEP	Fond de Dépollution
GES	Gaz à Effet de Serre

HCP	Haut Commissariat au Plan
IAA	Industries Agro-alimentaires
ICP	Industries Chimiques et Parachimiques
IMME	Industries Mécaniques Métallurgiques et Electriques
IRGT	Institut Royal pour la Gestion durable des Ressources naturelles et la Promotion des Technologies propres
ITC	Industries du Textile et Cuir
K	Potassium
MDP	Mécanisme de Développement Propre
MES	Matières en Suspension
MICNET	Ministère de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies
MO	Matières Organiques
MS	Matières Sèches
MS	Ministère de la Santé
N	Azote
NPP	Nombre le Plus Probable
NPPUC	Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques
NRC	National Research Council
ONAS	Office National d'Assainissement
ONEP	Office National de l'Eau Potable
ONUDI	Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel
P	Phosphore
PC	Polymère Cationique
PE	Polyélectrolytes
PIB	Produit Intérieur Brut
PNA	Plan National d'Assainissement
PPM	Partie Par Million
PREM	Pérennité des Ressources en Eaux du Maroc
RAMSA	Régie Autonome Multi-Services d'Agadir
RBS	réacteur Biologique Séquentiel
RECORD	Recherche Coopérative sur les Déchets et l'Environnement
SEEE	Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement
SNDAL	Schéma National Directeur d'Assainissement Liquide
SNIMA	Service de Normalisation Industrielle Marocaine
STEP	Station d'Epuration des Eaux Polluées
TE	Taux d'Epuration
TEE	Tonne d'Eau Extraite
TMS	Tonne de Matière Sèche
TR	Taux de Raccordement
UE	Union Européenne
USAID	Agence américaine Internationale de Développement
VLR	Valeurs Limites de Rejet

Introduction

Le « Manuel de Bonnes Pratiques » complète » **l'étude pour l'Elaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Épuration des Eaux au Maroc ».**

Le manuel a pour objectif de guider les gestionnaires des STEPs industrielles et urbaines et les usagers potentiels des boues d'épuration à la mise en œuvre des plans de gestion des boues. Ce manuel traitera l'essentiel des technologies de traitement, d'élimination et de valorisation des boues mais accordera une attention particulière aux options et filières recommandées pour le contexte marocain.

Ce manuel contient des informations sur les technologies les plus importantes qui peuvent s'appliquer dans le cadre d'une gestion de boues. Des mesures concernant l'épaississement, le traitement poussé, la valorisation et l'élimination. Aux différentes technologies, les caractéristiques essentielles sont spécifiées dans « l'Étude pour l'Élaboration de la Stratégie Nationale de Gestion des Boues des Stations d'Épuration des Eaux au Maroc ». Ces informations sont spécifiées dans les chapitres 1.2.2 et 1.2.10.

Dans ce manuel les technologies bien expérimentées et appropriées sont définies en détail dans les chapitres 2 à 10.

Les chapitres contiennent, les indications suivantes :

Principe et schéma, conditions d'application, contraintes, ordre de grandeur de coût, et recommandations pratiques.

En outre des aspects et des paramètres qui sont importants pour le choix d'une technologie appropriée sont décrits dans les chapitres 1.3 et 1.4, parmi-eux les aspects l'hygiène et la rentabilité. Les paramètres qui doivent être réexaminés selon le cas lors de l'évaluation de la qualification d'une technologie sont définis en détail.

Dans le tableau 1, les différentes procédures et les technologies sont assignées aux chapitres en question.

TABEAU 1 : REVUE DES FILIERES ET TECHNOLOGIES DE GESTION

Filières et technologies	Chapitre	Chapitre
Épaississement	1.2.2	2.
Épaississement statique gravitaire	1.2.2	
Epaississement dynamique (flottation, sur table d'égouttage)	1.2.2	
Epaississement dynamique par centrifugation	1.2.2	
Déshydratation (mécanique, par centrifugeuse, filtres à bandes, filtres-presses à chambres) (Chapitre 2)	1.2.3	2.
Stabilisation aérobie et anaérobie	-	
Stabilisation chimique	1.2.5	3.
Stabilisation à la chaux	1.2.6	4.
Stabilisation aux nitrites	1.2.6	

Filières et technologies	Chapitre	Chapitre
Séchage naturel	1.2.4	
Séchage solaire sur lits de séchage (Chapitre 5)	1.2.4	5.
Séchage en lits plantés ou bio séchage	1.2.4	6.
Séchage naturel sous serre	1.2.4	
Séchage solaire en conditions contrôlées	1.2.4	7.
Séchage thermique	1.2.4	
Valorisation verte	1.2.7	
Compostage ou co-compostage	1.2.7	8.
Valorisation (Epanchage) agricole	1.2.7	
Valorisation des boues pour la réhabilitation et la vitalisation des sites dégradés	1.2.7	
-	-	
Valorisation des boues en sylviculture	1.2.7	
Valorisation thermique (énergétique)	1.2.8	
Valorisation des boues dans des cimenteries	1.2.8	9.
Valorisation des boues dans les centrales électriques	1.2.8	
Élimination des boues	1.2.9	
Mise en décharge	1.2.9	
Mono-décharge (boues seules)	1.2.9	
Décharge mixte (boues et déchets ménagers)	1.2.9	
Incinération		

1 Vue synoptique

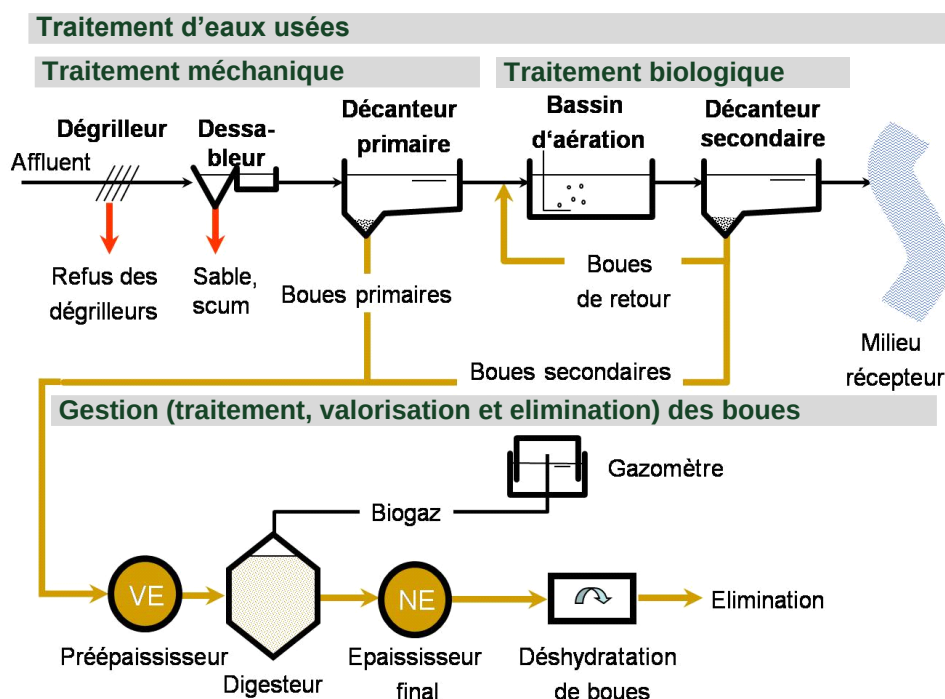
1.1 Aspects généraux du traitement des eaux usées et de la gestion des boues

Les STEP conventionnelles travaillent en général avec un traitement mécanique et un traitement biologique.

Dans la Figure F1 le schéma simplifié d'un traitement des eaux usées et de la gestion des boues d'épuration avec une production de biogaz intégrée est présenté.

En cas de besoin d'un niveau de purification plus élevée, plusieurs étapes des traitements physico-chimiques peuvent être connectées en aval (p.ex. filtration à l'aide du charbon actif, filtration sur membrane,...)

Figure F1: Schéma simplifiée d'un STEP et de la gestion des boues d'épuration



Le traitement des eaux usées est suivi par la gestion des boues d'épuration. Elle peut être caractérisée par les étapes suivantes :

Traitement des boues – valorisation des boues – élimination des résidus non utilisables.

La partie 'traitement des boues' peut inclure les techniques suivantes :

Épaississement – déshydratation – stabilisation – séchage.

Les différentes méthodes pour le traitement des boues sont choisies en fonction des volumes à traiter, de la qualité des boues, ainsi qu'en fonction de l'utilisation ultérieure des boues.

La même méthode de traitement peut apparaître au cours de plusieurs étapes dans le processus du traitement, comme p.ex. l'épaississement peut servir comme méthode de prétraitement ainsi que pour la stabilisation des boues ou comme méthode de traitement en aval.

Les boues de la décantation primaires (boues primaires) et les boues d'excès (boues secondaires) provenant du traitement biologique sont réunies.

Ce mélange rentre un processus d'un épaississement, suivi par une stabilisation dans un digesteur. Ensuite il passe un deuxième épaississement, une déshydratation et rentre finalement à la décharge.

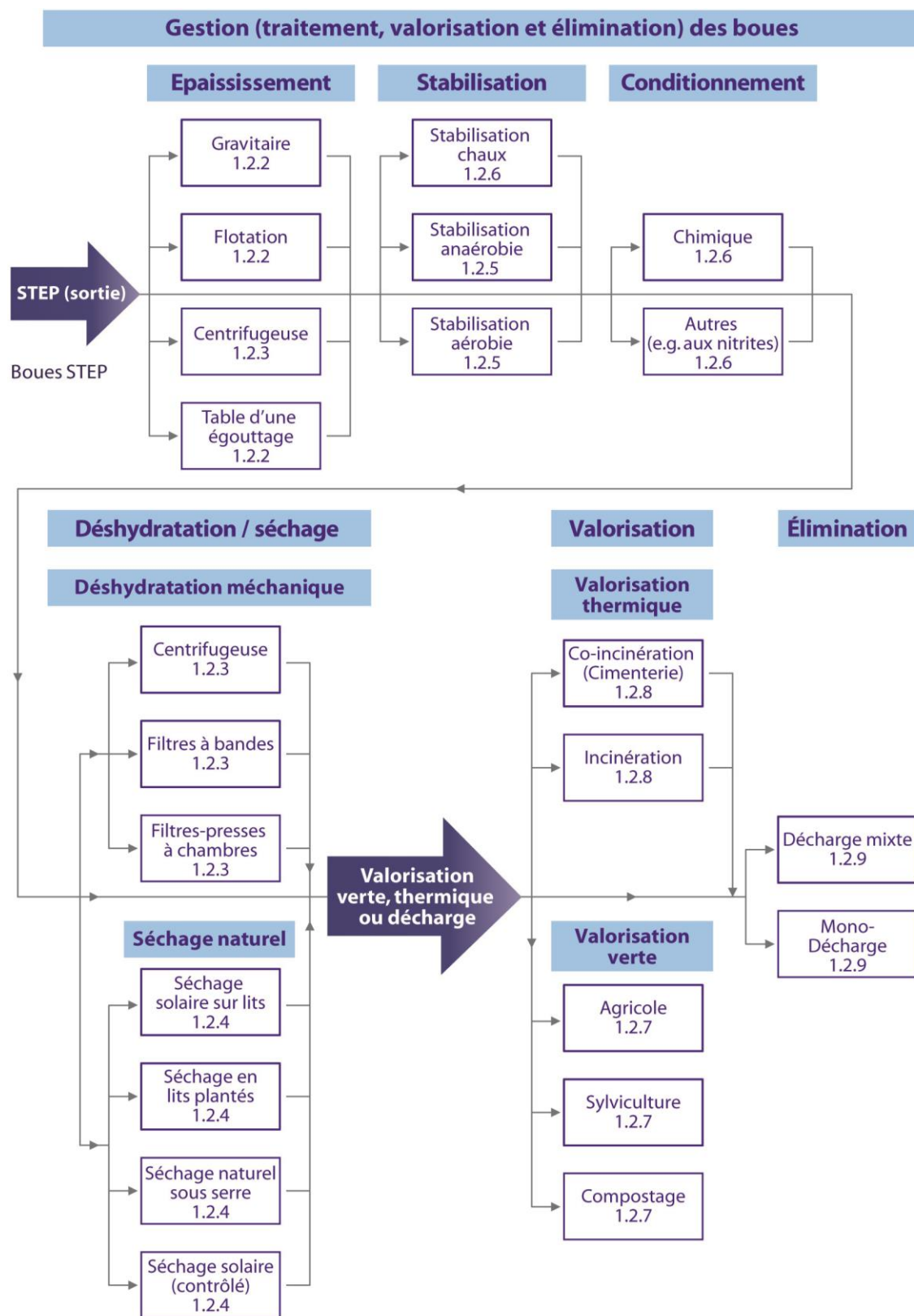
Le biogaz développé au niveau de la stabilisation est collecté dans un gazomètre et peut ensuite être utilisé pour une valorisation thermique.

La plupart des étapes du traitement des boues est installée sur le terrain même de la STEP.

Pour les procédés de la valorisation verte ou la valorisation thermique (rouge), des installations et constructions à l'extérieure de la STEP deviennent nécessaires.

Les détails de la gestion des boues (traitement, valorisation et élimination) sont présentés dans la Figure F2, dont les descriptions détaillées des technologies différentes se trouvent dans les chapitres respectifs.

Figure F2 : Schéma simplifiée des phases de la gestion des boues



Les filières de traitement des boues ont trois objectifs principaux¹ :

- 1- **Concentrer les boues et réduire leur volume par extraction d'eau** (épaississement et/ou déshydratation avec ou sans séchage). Dans la chronologie des opérations de traitement, l'épaississement est la première étape qui concentre par un facteur de l'ordre de 10 la teneur en matière sèche (siccité) avec des valeurs de 20 à 100 g/l. Il existe des procédés gravitaires (statique ou raclé et hersé) et des procédés accélérés (égouttage, flottation ou centrifugation).
- 2- **Stabiliser les boues** en réduisant leur caractère fermentescible (contrôle des nuisances olfactives = maîtrise des odeurs nauséabondes). La stabilisation est assurée par la digestion anaérobie, la stabilisation aérobie ou la stabilisation chimique à la chaux. L'hygiénisation peut être obtenue par certains procédés de stabilisation, dont le chaulage.
- 3- **Améliorer la consistance des boues** afin de faciliter les opérations de reprise, de transport, de stockage et d'élimination finale.

Les technologies décrites ci-après correspondent aux deux catégories de boues urbaines et industrielles. Il est clair que leur application dans certains cas dépendra de la qualité des boues brutes et d'autres critères comme la taille de la STEP ou de son contexte. Ces aspects seront étayés dans le manuel réservé aux techniques et pratiques adéquates de gestion des boues.

1.2 Revue des filières et technologies de gestion

1.2.1 Épaississement

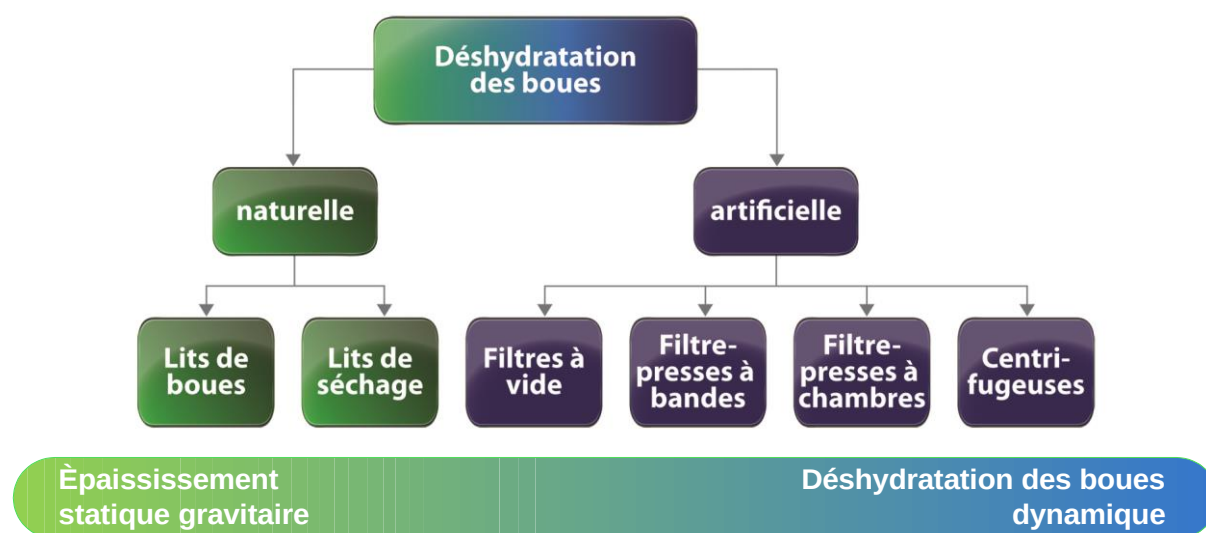


FIGURE 1 : FILIERE DE TRAITEMENT – ÉPAISSISSEMENT ET DESHYDRATATION MECANIQUE

La vidange comprend l'épaississement au moyen de traitements naturels et les déshydratations mécanisées.

¹ Source : Association des Maires de France (AMF) – Le maire et les boues d'épuration. Guide pratique pour les collectivités locales - 2004

1.2.1.1 Épaississement statique gravitaire

L'épaississement statique consiste en une décantation des boues humides dans une cuve cylindrique à fond conique, sous la seule action de la force de gravité. La boue épaissie est extraite par le fond de l'ouvrage, tandis que le liquide surnageant est évacué par le haut de la cuve. Différents types d'épaississeurs sont disponibles sur le marché et se distinguent essentiellement par le temps de séjour des boues qu'ils permettent.

1.2.1.2 Epaississement dynamique

L'épaississement dynamique se fait selon deux modalités possibles :

- Par flottation : elle consiste à insuffler de l'air dans une phase aqueuse au sein d'un réservoir sous une pression comprise généralement entre 4 et 7 bars. Ce mélange est ensuite détendu à pression ambiante dans la cuve de flottation via un dispositif approprié. La détente, associée à une forte turbulence, provoque la formation d'un nuage de fines bulles, qui vont au cours de leur ascension se coller aux matières en suspension et les entraîner à la surface de la cuve pour être récupérées. Parallèlement, l'eau clarifiée est soutirée en partie basse de la cuve.
- Sur table d'égouttage : sous l'action de polymères spécifiques, les boues sont floculées dans un bac puis entraînées sur une bande filtrante fonctionnant en continu. L'eau interstitielle est alors drainée par la seule force du champ de pesanteur, renforcée par l'action des bobines fixes qui reposent sur la toile filtrante afin d'écarter la boue et permettant ainsi l'écoulement rapide de l'eau. Afin d'éviter le colmatage du système, un nettoyage permanent de la toile par une rampe de lavage est recommandé.

En général, ces types d'épaississement aboutissent à une siccité variant de 5 à 8%. Les performances peuvent être améliorées si l'épaississement sur table d'égouttage est combiné à un filtre à presse².

1.2.1.3 Epaississement dynamique par centrifugation

La boue floculée grâce à l'ajout de polymères est épaissie sous l'effet de la force centrifuge. Ce procédé de traitement est adapté aux petites unités d'épuration notamment de type industriel, du fait qu'il permet d'économiser l'espace. Actuellement une nouvelle génération de centrifugeuses est mise en place qui permet de combiner l'épaississement et la déshydratation dans une seule et même machine.

La centrifugeuse permet d'atteindre les concentrations les plus élevées en épaississement, ce qui la rend attractive comme traitement, mais vue ces effets négatifs sur la texture de la boue le choix des traitements ultérieurs de boues se trouve influencé car la boue sortie de centrifugeuse présente une aptitude moindre à la déshydratation, ce qui augmente la consommation des réactifs.

² Source : L'épaississement des boues : Les règles de bonne gestion - Canler J., Cauchi A., Duchène Ph., Fernandes P., Larigauderie A., Leboucher G. & Pujol .R, avril 2002.

1.2.1.4 Récapitulatif sur les rendements et les performances des techniques d'épaississement

On peut constater que le degré de l'épaississement des boues (concentration g/l) issues de l'industrie agroalimentaire ainsi que la quantité appliquée de polymères est identique à ceux de boues urbaines.

Ces techniques présentent des avantages et des inconvénients au niveau de l'exploitation et des consommations énergétiques.

Le tableau 2 résume les performances des différents modes d'épaississement, en fonction de l'origine de boues.

TABEAU 2 : EXEMPLES DES PERFORMANCES EN EPAISSISSEMENT DE BOUES³

Modes d'épaississement	Origine des boues	Type de boues	Concentration boue épaissie (g/l)	Consommation des adjuvants
Statique	Sidérurgie Traitement de surface	Primaires Physico-chimiques	1000 15 à 20	Non Non
Table d'égouttage	Eaux usées urbaines IAA Papeterie	Biologiques Biologiques Primaires	40 à 70 40 à 70 100 à 150	PC* 4 à 8 kg/t MS MS PC 4 à 8 kg/t MS PC 1 à 3 kg/t MS
Décantation centrifuge	Eaux usées urbaines IAA	Biologiques	40 à 80	PC 0 à 6 kg/t MS
Flottation	Eaux usées urbaines IAA Raffinerie Papeteries	Biologiques Biologiques Physico-chimiques Physico-chimiques	35 à 50 35 à 50 30 50 à 100	PC 1 à 2 g/m ³ PC 1 à 2 g/m ³ Sulfate d'aluminium + polymère Sulfate d'aluminium + polymère

PC* : polymère cationique

³ Source : Dauvergne, 2007

1.2.2 Déshydratation

La siccité⁴ des boues conditionne la filière d'élimination/valorisation. Déshydrater les boues, c'est abaisser la teneur en eau et augmenter leur siccité. Ce traitement permet de rendre la structure physique des boues compatible avec les installations de traitements disponibles.

Pour la déshydratation subséquente des boues, il est d'une grande importance quelle que soit la destination finale des boues (Valorisation en agriculture, valorisation thermique, stockage dans des décharges contrôlées de manière isolée (mono - décharge) ou avec les déchets ménagers, incinération). Le taux de déshydratation des boues dépend de ces destinations.

Les boues d'épuration peuvent être utilisées en agriculture, selon les besoins, avec des teneurs très différentes en matières sèches. La valorisation agricole est la seule méthode d'élimination pour laquelle on peut utiliser directement la boue liquide avec des teneurs en matières sèches d'environ 5%. Mais il faut être conscient que l'économie de la déshydratation est toutefois payée par des dépenses considérablement élevées pour le transport. Comparée à la boue déshydratée, la boue liquide contient, en moyenne, cinq à dix fois plus d'eau. Par conséquent, il faut déplacer cinq à dix fois plus de matière à transporter. Ces dépenses supplémentaires peuvent être justifiées quand on a besoin d'une teneur élevée en azote. En règle générale, la teneur en azote est réduite lors de la déshydratation des boues.

Si on envisage, par contre, la mise en décharge en commun avec des déchets ménagers ou l'incinération, il faut déshydrater la boue par voie mécanique.

Sont considérées comme machines appropriées **les filtres à bandes, les centrifugeuses et les filtres-presses à chambres**. Outre la technique mécanique, ils se distinguent en ce qui concerne le résultat de déshydratation, leur consommation d'adjuvants de floculation et de filtration, leur consommation d'énergie, la pression exercée et les coûts.

On obtient sans aucun doute le meilleur rendement de déshydratation avec le filtre-presse à chambres, mais, en même temps, à des frais plus élevés.

Le domaine d'utilisation de la centrifugeuse est très large, mais le résultat de déshydratation est un peu plus faible.

Avec des filtres à bandes, on a essayé d'augmenter le rendement de déshydratation par un guidage des bandes de plus en plus compliqué, mais souvent le résultat n'était pas très satisfaisant.

Comme dans la plupart des pays industrialisés, en Allemagne, on utilise de plus en plus des centrifugeuses dans la plupart des stations d'épuration à cause de leur simplicité technique. Les filtres-presses à chambres occupent la deuxième place, surtout aux installations où on souhaite un haut degré de déshydratation ; les filtres à bandes sont à la dernière place. Les

⁴ La siccité définit le pourcentage pondéral de matières sèches (MS) contenue dans une boue, en général mesuré après un chauffage à 105°C jusqu'à obtention. Égale à 0 %, elle caractérise un liquide sans MS, mais supérieure à 90 %, elle s'applique à un produit sec dont la teneur en MS est de 900 g/kg, l'humidité étant alors de 10 %.

différents systèmes de déshydratation comprennent des différences liées aux adjuvants nécessaires et au taux de siccité obtenus.

1.2.3 Séchage naturel

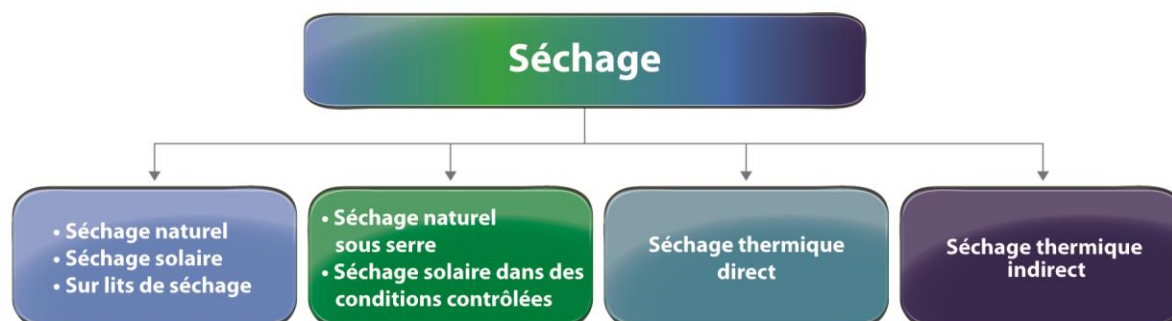


FIGURE 2 : FILIERES DE SECHAGE DES BOUES

Les méthodes de séchage comprennent des procédés naturels et mécaniques.

Séchage solaire sur lits de séchage

Il s'agit du séchage naturel des boues dans des lits de séchage associés généralement aux stations d'épuration adoptant des systèmes extensifs mais aussi en systèmes d'épuration intensifs⁵. Malgré le désavantage de cette pratique, résidant dans la perte partielle d'éléments nutritifs, elle permet de réduire significativement la teneur en eau et de faciliter la manipulation et le transport. La valeur organique des boues séchées reste entière et permet d'améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols.

Le temps de séchage (pour attendre 30 à 60% de siccité) varie habituellement entre 3 et 6 semaines pour une épaisseur de 30 cm à 40 cm de boues, et cela dépend fortement des conditions climatiques. Ainsi, on comprend que cette durée va varier d'une région à l'autre. Par ailleurs, il est possible d'en améliorer le rendement en ajoutant des polyélectrolytes aux boues, ce qui a pour effet de hausser la vitesse de drainage.

Ajoutons que le contexte climatique des régions du Maroc, 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 Ouarzazate⁶, que les œufs de parasites ont complètement disparus des boues après 8 mois de séjour dans les lits de séchage. La connaissance du niveau de contamination helminthique des boues demeure une priorité si on désire les utiliser en agriculture.

Après séchage naturel des boues, plusieurs destinations sont possibles:

⁵ Cette partie a été développée par Soudi et Bazza (2003 ; 2007).

⁶ Source : Réutilisation des eaux usées à des fins agricoles - Rapport de synthèse. Ouarzazate, Maroc. PNUD, FAO, MARA - Xanthoulis D. 1996.

- L'utilisation directe comme amendement des sols agricoles dans le cas d'un séchage prolongé permettant la suppression des pathogènes ;
- Le compostage des boues ou leur co-compostage avec les déchets ménagers ou agricoles et addition ou non d'autres agents structuraux ;
- La mise à la décharge lorsque aucune des précédentes destinations n'est envisageable.

Séchage en lits plantés ou bio séchage

Il s'agit d'une technique en développement et consiste en des lits de séchage plantés. Ce type de procédé permet d'amplifier l'élimination de l'eau. En effet, en plus de la percolation par gravité et l'évaporation directe, il y a évapotranspiration par les plantes. Plusieurs types de végétaux peuvent être utilisés dont les plus importantes sont les roseaux (Genus *Phragmites*, *Phragmites australis*) d'où l'appellation *Phragmicompostage* et certaines graminées. Les lits à roseaux sont généralement privilégiés car ils requièrent moins de travail.

Le sous-produit organique résultant présente une structure granulaire rappelant celle d'un sol bien structuré et aéré. L'activité biologique mise en œuvre par des micro-organismes et les macro - organismes (vers de terre, lombrics etc.) permet une humification de la matière organique fraîche des boues. Il s'agit donc d'un excellent produit d'amendement des sols.

Séchage naturel sous-serre

Dans le cas des zones caractérisées par un fort régime pluviométrique, on peut adopter un séchage sous serre simple. Il s'agit de serres semi-ouvertes latéralement qui protègent les lits contre les pluies. Le plastique de couverture peut être soulevé ou enlevé durant les périodes sèches.

Séchage solaire en conditions contrôlées

Pour le cas des stations d'épuration qui produisent de grandes quantités de boues et qui sont caractérisées par une forte sensibilité de voisinage, un autre procédé sophistiqué et de haut niveau technologique a été mis au point⁷. Il consiste à utiliser des serres ventilées.

Le retournement des boues se fait de manière télécommandée par un engin appelé « sanglier électrique ». Ce procédé est consommateur d'énergie mais des études ont montré que cette consommation est fortement réduite dans les régions ensoleillées.

En somme, on peut dire que le séchage des boues est adapté au contexte des régions d'Afrique du Nord et de Moyen Orient où on dispose d'un grand gisement solaire.

Il est clair que d'autres techniques de séchage thermique existent mais elles se caractérisent généralement par une forte consommation d'énergie et un très faible rendement thermique.

⁷ Source : Thermo – System, <http://www.thermo-system.com/fr/produits/>.

Plusieurs recherches d'optimisation sont en cours notamment en Allemagne, en Autriche et en Hollande.

Selon les concepteurs, ce système convient à des tailles de centres allant de 500 EH aux grandes installations de plus de 1.000.000 EH.

On peut aussi dire que ce procédé peut être adapté à certaines industries agroalimentaires ainsi qu'à l'industrie de papeterie qui sont de grandes productrices de boues.

Le sous-produit digéré « composté » peut être valorisé, s'il répond aux normes de qualité en vigueur, comme produit d'amendement des sols.

Séchage thermique

Le séchage thermique peut permettre une élimination quasi-totale de l'eau (siccité d'environ 95 %). Les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés.

On distingue un séchage direct et un séchage indirect.

Séchage direct : Il se fait par conduction. La chaleur est transmise aux boues à travers une paroi d'échange. L'eau évaporée est évacuée par un courant d'air. Ce procédé implique un brassage mécanique des boues afin d'augmenter et de garantir le contact de celles-ci avec la surface d'échange, sur laquelle l'épaisseur de boues ne dépasse pas quelques millimètres. L'utilisation d'équipements mécaniques pour le brassage permet aussi l'évacuation des boues. Cette technique n'est pas à utiliser dans tous les cas et notamment dans le cas de boues abrasives ; elle produit en outre des poussières (d'où des risques d'inflammation).

Séchage indirect : Il consiste en la mise en contact direct des boues à sécher avec un fluide caloporteur : le séchage se fait alors par convection. Le fluide utilisé peut être une fumée de combustion ou de l'air chauffé. De plus, ce fluide est en général recyclé car les quantités nécessaires sont assez importantes. La vapeur d'eau extraite des boues est évacuée avec les gaz. Ce procédé utilise moins d'équipements mécaniques, les risques d'abrasion sont alors limités.

En raison des coûts énergétiques, ce procédé reste peu utilisé, malgré son intérêt manifeste sur la réduction des volumes à manipuler. Le coût énergétique moyen de séchage ramené à la tonne d'eau extraite (tEE) est de l'ordre de 930 KWh/tEE.

Le séchage thermique devrait connaître un nouveau développement dans les années à venir car les autres filières de traitement des boues, dont l'incinération, se renchérissent sous l'effet des nouvelles conditions réglementaires et économiques.

Les différents seuils de séchage sont déterminés en fonction de la destination des boues comme le montre le Tableau 3 :

TABEAU 3 : LES DIFFERENTS SEUILS DE SECHAGE EN FONCTION DE LA DESTINATION FINALE DES BOUES⁸

Destination	Séchage partiel 30 à 45 %	Séchage poussé 60 à 90 %	Séchage total Plus de 90 %	Objectifs
Agriculture	Non (Aucun intérêt technique ni économique)	Oui (toute la gamme possible de 60 à 90 %)	Oui	Transport et stockage Stabilisation, voire hygiénisation (plus de 90 %)
Four spécifique	Oui (de 35 à 45 %)	Non (Aucun intérêt technique ni économique)	Oui	Auto - combustible
Co-incinération	Non (Aucun intérêt technique ni économique)	Oui (aux alentours de 60 %)	Oui (Aux alentours de 90 %)	Exploitation du four Transport et stockage

1.2.4 Stabilisation aérobie et anaérobie

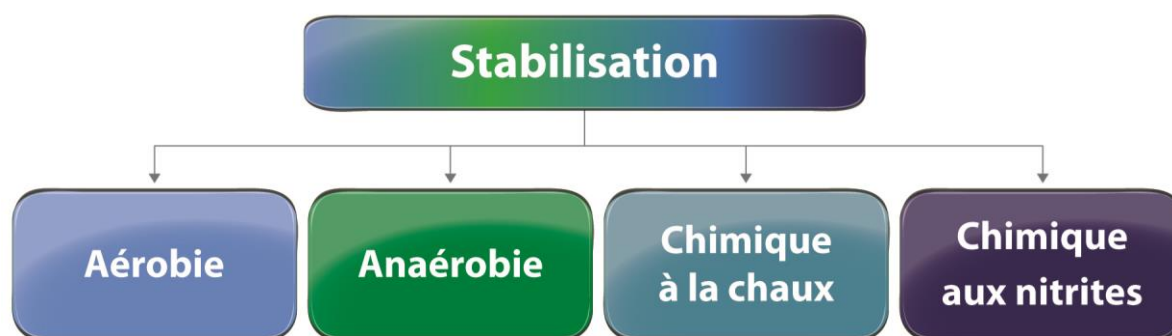


FIGURE 3 : FILIERES DE STABILISATION DES BOUES

Les méthodes de stabilisation de boues comprennent des procédures biologiques (aérobie et anaérobie) et chimiques.

La question de stabilisation des boues a suscité beaucoup de débat : une stabilisation des boues serait elle nécessaire et quelle méthode de stabilisation choisir ?

La réponse à cette question devient simple lorsqu'on se rend compte des nuisances olfactives générées par des stations d'épuration lorsque les boues ne sont pas stabilisées. On ne peut alors renoncer à une stabilisation que dans le cas où la STEP se trouve loin des zones d'habitations.

⁸ Source : Traiter et valoriser les boues. Collection. Ouvrage collectif OTV. Paris 86240 Ligugé OTV 1997.

En pratique, il existe deux méthodes de stabilisation: **une stabilisation aérobie et une stabilisation anaérobie.**

En général, la stabilisation aérobie consomme de l'énergie et lors de la digestion anaérobie on obtient de l'énergie. De plus, la stabilisation aérobie est d'une portée moins considérable que la stabilisation anaérobie. Outre l'empêchement d'odeurs et la production d'énergie, la stabilisation anaérobie, c.-à-d. la digestion des boues, présente aussi des avantages importants pour la déshydratation mécanique des boues. Il est plus difficile de déshydrater les boues après une stabilisation aérobie.

En résumé, on peut constater que, pour les raisons mentionnées, la stabilisation anaérobie à une température de 37° C, avec un temps de séjour entre 20 et 30 jours et à une teneur en matières solides d'environ 5 % de MS est une technique très appropriée pour la stabilisation des boues dans les stations d'épuration. Le principe de fonctionnement d'un digesteur est illustré par le schéma ci-après⁹.

Cette technique de stabilisation anaérobie est généralement pratiquée pour des installations de taille supérieure à 50 000 EH. Ce système est mis en service sur la première phase de la STEP de Marrakech. Les boues traitées sont de 80m3/jour pour la première phase. La digestion anaérobie des boues est également le principe retenu pour la STEP de la RADEEF à Fès. Le volume qui sera traité de boues est de 100 T de MS/jour à l'horizon 2012. Un projet de récupération de l'énergie dans le cadre d'un projet MDP sera mis en œuvre.

La digestion des boues présente les avantages suivants⁴⁰ :

- Réduction considérable de la quantité de boues : abattement de 35 à 40% du taux de matière sèche et de 50 % des matières volatiles
- Réduction de charge organique et donc du pouvoir fermentescible et de là des nuisances olfactives
- Facilitation de la gestion du stockage, du transport et de la manutention
- Hygiénisation des boues du fait de la réduction des germes pathogènes
- Réduction des risques de toxicité des éléments traces (piègeage des métaux sous une forme non disponible pour les organismes vivants) et une réduction des teneurs en contaminants organiques (hydrocarbures halogénés)
- Lissage des variations de la production des boues par leur stockage dans les digesteurs grâce à leurs capacités élevées et donc évitement des nuisances
- La production de biogaz, une énergie renouvelable et stockable, qui peut être convertie en différentes formes d'énergie utile
- Réduction des émissions de GES lorsque les boues sont stockées en CET et contribue à la lutte contre l'effet de serre.

En somme, après la digestion anaérobie, les boues sont stabilisées, hygiénisées et leur volume est réduit. Elles remplissent donc les conditions nécessaires à l'épandage et après séchage ou déshydratation, lorsque la siccité est supérieure à 30%, elles deviennent alors des déchets ultimes susceptibles d'être mises en décharge (selon la réglementation européenne car la celle du Maroc ne couvre pas encore cet aspect).

⁹ Source : Etat de la valorisation du biogaz sur site de station d'épuration en France et en Europe Bonnier S. ,2008.

En Allemagne, Plus de $\frac{3}{4}$ des stations d'épurations fonctionnent avec des systèmes de stabilisation anaérobie.

1.2.5 Stabilisation chimique

Différentes méthodes basées sur l'usage de différents produits sont adoptées. Dans certaines situations, ces méthodes viennent se substituer ou s'ajouter à la méthode de stabilisation biologique. Celle-ci nécessite des ouvrages importants et lorsque la réduction du montant des investissements est un objectif prioritaire, le pouvoir fermentescible de la boue peut être diminué, au moins temporairement, par la seule adjonction d'agents chimiques qui génère par la suite une inactivation des germes pathogènes¹⁰. On se propose de rapporter ci-après et de manière succincte les principales options de stabilisation chimique.

Stabilisation à la chaux

Cette stabilisation est obtenue par addition de chaux aux boues. C'est le réactif le plus utilisé du fait de son coût réduit, son alcalinité et effet favorable sur le renforcement de la structure physique de la boue grâce au pouvoir floculant du calcium. Cet apport de chaux peut être réalisé sur des boues liquides ou des boues déshydratées :

- Le chaulage des boues liquides génère des boues de durée de stockage limitée, vue les risques de reprise de fermentation.
- Le chaulage des boues solides améliore davantage la durée de stockage des boues traitées.

Le chaulage s'opère par l'addition de la chaux vive (CaO) ou éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), mais la chaux vive est souvent préférée car elle est plus dense, et donc moins coûteuse à transporter et à stocker et permet surtout, grâce au caractère exothermique de la réaction d'hydratation, une hygiénisation par élévation de température et un gain supérieur de siccité, de l'eau libre de la boue devenant eau de constitution de la chaux éteinte comptabilisée alors comme matière sèche.

Concernant les doses à appliquer, exprimées en chaux éteinte, elles varient de 20 à 50 % selon le type de boue. Le mélange s'effectue souvent par malaxage de la boue pâteuse et de chaux pulvérulente après l'étape de déshydratation, mais pour le cas d'une déshydratation sur filtre à plateaux, la chaux est ajoutée en amont sous forme de lait de chaux à raison de 100 g/l¹¹.

La stabilisation à la chaux peut être effectuée au niveau des lits de séchage ce qui réduit fortement les odeurs et le développement des insectes. L'intérêt de la chaux est important dans le cas de l'épandage agricole sur des sols acides. Au Maroc pour les sols en général légèrement alcalins, cet intérêt est moins marqué.

¹⁰ Office National de l'Eau, Janvier 2001

¹¹ Source : Lutte contre la pollution des eaux - traitement des boues d'épuration. Revue technique de l'ingénieur, G 1450 - Guibelin E., 1999.

Stabilisation aux nitrites

La stabilisation aux nitrites est une technique qui consiste à soumettre la boue épaissie à l'action des ions nitrites (NO_2^-) dans un milieu acide. Par ailleurs, on distingue entre deux modes qui sont (i) mode de stabilisation par hygiénisation partielle et (ii) de stabilisation par hygiénisation poussée qui sont succinctement décrits ci-après :

- (i) Mode de stabilisation par hygiénisation partielle: la boue épaissie est admise dans un milieu acide maintenu à un pH de l'ordre de 3. Elle est alors soumise, pendant un minimum de 30 mn, à l'action des ions nitrites.
- (ii) Mode de stabilisation par hygiénisation poussée : la boue épaissie est admise dans un milieu acide maintenu à un pH de l'ordre de 2. Elle est alors soumise, pendant au moins de 2 heures, à l'action des ions nitrites avec forte concentration.

1.2.6 Valorisation verte

La valorisation « verte » englobe le compostage, l'utilisation des boues en agriculture, en sylviculture et la réhabilitation des sols dégradés.

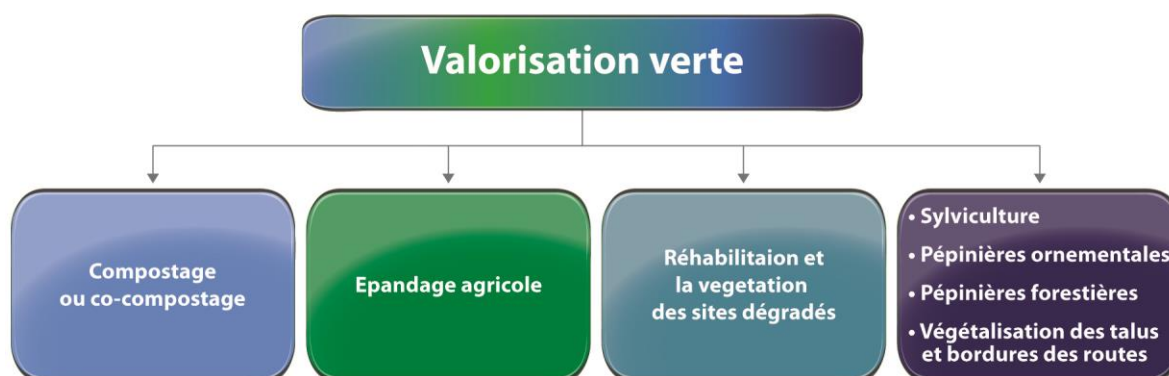


FIGURE 4 : FILIERES DE VALORISATION « VERTE » DES BOUES

1.2.6.1 Compostage ou co-compostage

Le compostage des boues s'affiche actuellement comme étant la filière la plus écologiquement viable en matière de gestion intégrée et durable des boues. En effet, le recours aux procédés de co-compostage s'inscrit dans une logique d'utilisation raisonnée des ressources naturelles avec un retour au sol de la matière organique, et donc par là même dans une politique de développement durable.

Cette option est en pleine expansion aussi bien en Europe notamment en Allemagne, en France et en Italie, aux Etats Unis (Virginia, Caroline du Nord, Floride etc.) et au Canada. Aux Etats Unis, on compte près de 300 unités de compostage des boues.

Le développement de cette option peut être expliqué par les éléments suivants :

- **Les directives et réglementations**
 - Directives européennes sur le thème de la protection des sols ;

- Le recours en CET avant 2002 qui était non limité est devenue une solution désormais proscrite pour les déchets non ultimes par les réglementations française et européenne ;
- L'encouragement de la production d'un produit de classe A aux Etats Unis par l'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) ;
- La parution le 18 mars 2004 de l'arrêté rendant l'application obligatoire la norme NFU 44-095 sur les composts comportant des matières issues du traitement des eaux et présentant un intérêt agronomique

- **L'aspect économique**

- **L'application directe du compost et la facilité de sa manipulation** rend le compostage une option plus économique.

- **La flexibilité de la filière** et la disponibilité de plusieurs options techniques et de dimensionnement adaptables aux différentes conditions locales ;

- **La qualité du produit et la diversité d'usage**

Grâce à sa qualité hygiénique et son aspect, le compost produit est commercialisable et plus accepté par les agriculteurs. Il offre aussi une diversité d'usage du compost en sylviculture, agriculture, horticulture, etc.

Le compostage ou le co-compostage des boues est une option qui requiert un séchage préalable ou une déshydratation pour que la siccité soit entre 30% et 45%.

Le compostage des boues est un processus de bioconversion ou fermentation aérobie des matières organiques fraîches en un produit organique stabilisé et riche en humus appelé « compost ».

Le compostage est aussi producteur de chaleur (énergie thermique) à partir de la dégradation des liaisons carbonées. Les bactéries thermophiles produisent environ 4,3 kWh/kg d'O₂ utilisé¹². Ainsi, cette filière ne requiert pas d'énergie mais au contraire il est souvent nécessaire, en dernière phase de compostage, d'ajouter de l'eau pour éviter la dessiccation du tas en compostage et donc la réduction de l'activité de biodégradation.

Les boues n'étant pas compostables seules, elles sont mélangées à diverses matières organiques disponibles à proximité des STEPs : copeaux de bois, sciure de bois, bois de taille de l'arboriculture et autres déchets comme la litière des volailles, déchets verts des espaces verts, et les déchets de cultures, etc.). Les boues peuvent aussi être co-compostées avec les déchets ménagers.

Deux paramètres importants doivent être respectés pour garantir un bon démarrage du processus de compostage :

- une teneur en eau comprise entre 50 et 60 % et
- un rapport C/N compris entre 25 et 35.

Les copeaux de bois ou sciure de bois sont des agents structurants permettant de garantir une aération convenable et une régularisation de la teneur en eau mais aussi, grâce à leurs rapports C/N élevés, ils sont mélangés aux boues dans des proportions permettant de réajuster le rapport C/N du mélange à composter à la valeur mentionnée ci-dessus.

¹² Source : Evans, 1983.

La figure 5 résume la filière de compostage des boues.

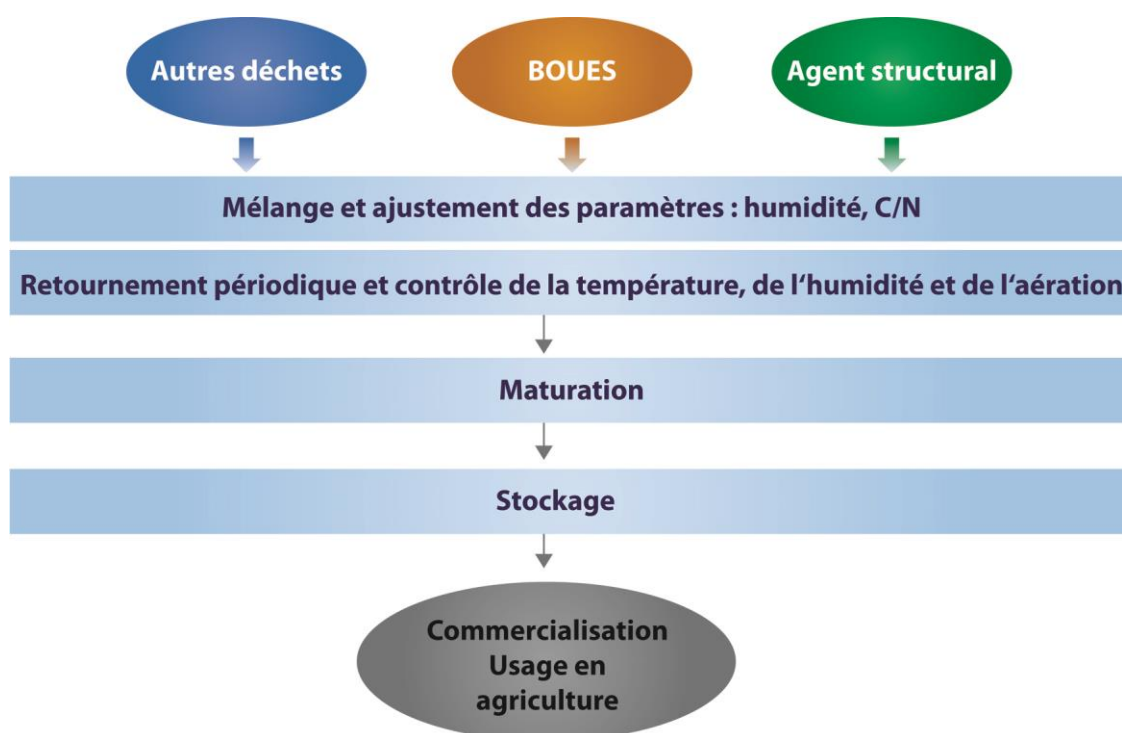


FIGURE 5 : FILIERE DE CO-COMPOSTAGE¹³

1.2.6.2 Valorisation agricole

La valorisation des boues en milieu agricole consiste à épandre des boues préalablement traitées et stabilisées sur des sols présentant des besoins en matière organique et en fertilisants.

La voie agricole est, certes une voie très importante pour la valorisation des boues puisqu'elle permet de réintégrer la matière organique des boues et ses divers éléments fertilisants dans les cycles de production agricole, mais son application reste tributaire aux types de traitement qui permet de pallier non seulement le risque environnemental mais aussi le risque sanitaire lié aux deux contraintes majeures : (i) les pathogènes et (ii) les Éléments Traces Métalliques (ETM).

Puisque les boues concentrent les contaminants initialement présents dans les eaux, une telle pratique doit bien évidemment être maîtrisée et cadrée d'un point de vue réglementaire en ce qui concerne les questions de santé publique et d'impacts sur la qualité des sols et des eaux. Ces aspects seront détaillés dans la partie relative au cadre réglementaire et normatif.

En somme, la valeur agronomique des boues se manifeste par :

¹³ Source : Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost: Cas des petites et moyennes communes au Maroc. Actes Editions, Série agriculture & Environnement. Ouvrage préparé pour l'UNIDO et ENDA Maghreb Soudi, B. 2001.

- Leur valeur fertilisante dans la mesure où elles permettent de fournir des quantités importantes d'éléments fertilisants majeurs (N, P et K) et d'éléments mineurs et essentiels
- Leur valeur organique à travers l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et physicochimiques des sols.

Dans le but de capitaliser ces avantages et en même temps d'éviter les nuisances environnementales ou sanitaires, une pratique rationnelle de leur utilisation s'impose.

1.2.6.3 Valorisation des boues pour la réhabilitation et la végétalisation des sites dégradés

La dégradation des écosystèmes a diverses origines, elle peut être consécutive à des phénomènes naturels ou bien être directement liée à des interventions humaines incontrôlées qui ont pour conséquences la surexploitation ou la destruction du couvert végétal pérenne, et par la suite le décapage de la couche superficielle du sol peut survenir, ce qui ne fait qu'accroître les processus d'érosion et de désertification.

Face à ces processus de dégradation qui s'amplifient jour après jour à l'échelle internationale, plusieurs solutions peuvent être envisagées. Mais dans cette partie l'intérêt porte le plus sur le volet de valorisation des boues issues de traitement des eaux usées dans la réhabilitation des milieux naturels dégradés et leur végétalisation.

Cette voie de valorisation consiste à un apport de matière organique en quantité élevée, pour protéger les sols contre l'érosion, améliorer la diversité biologique ainsi que la stabilité des milieux. Ce type de débouché pour les boues est ponctuel permettant au couvert végétal de se réinstaller et au paysage de cicatriser.

L'utilisation raisonnée des déchets organiques, en général et les boues des STEP en particulier, en végétalisation peut permettre de restaurer ou réactiver les fonctions essentielles du sol et aujourd'hui plusieurs sites ont fait preuve de la réussite d'utilisation des boues compostées dans la réhabilitation écologique des espaces perturbés¹⁴.

Dans le contexte particulier marocain les ressources en sols subissent plusieurs processus de dégradation dont les plus importants sont :

- L'érosion hydrique qui touche plusieurs bassins versants et provoque une dégradation spécifique dépasse souvent 3 000 tonnes/km².an.
- L'érosion éolienne assez intense dans le Sud et le Sud-est du pays.
- La salinisation et la sodification des sols, phénomènes assez prononcés dans les zones arides, à forte évaporation et dans les périmètres irrigués où la trilogie irrigation – salinité – drainage n'est pas maîtrisée.

L'utilisation des boues en tant que produit organique d'amendement des sols se justifie pleinement si on considère le faible niveau de matière organique des sols marocains à cause

¹⁴ Source : Végétalisation des espaces dégradés en altitude", Editions Cemagref de Grenoble, p 144 - Dinger 1997

de la faiblesse du couvert végétal, de la forte minéralisation et de la mauvaise gestion des résidus organiques. En effet, la perte en matière organique est importante et la perte décadaire moyenne enregistrée en zones irriguées a été estimée en moyenne à 20%¹⁵

Dans un cadre plus ou moins similaire, on peut aussi, grâce à l'apport de boues, réhabiliter des sites ayant perdu le couvert végétal suite aux travaux d'aménagement comme les talus routiers et autoroutiers, les friches industrielles ou urbaines et les sites d'enfouissement.

1.2.6.4 Valorisation des boues en sylviculture

La valorisation sylvicole de boues vise à les épandre, après stabilisation, sur des sols où l'on pratique la sylviculture présentant des besoins en fertilisants. Cela a pour effet de maintenir ou d'améliorer la fertilité des sols, à court et à long terme, surtout dans les stations forestières où leur faible fertilité constitue un frein majeur à la croissance des arbres naturels ou plantés. Ainsi, il est possible d'augmenter la production de matière ligneuse grâce à l'ajout d'un amendement organique aux sols forestiers permettant d'équilibrer leur bilan humique, de maintenir leur structure et d'améliorer leur fertilité.

La valorisation des boues dans l'épandage sylvicole est reconnue en tant que meilleure pratique environnementale¹⁶. Les résultats d'un essai en 2003 confortent cette vision. En effet, cet essai a consisté à utiliser les boues pour la régénération d'un sol appauvri en le plantant en forêt dans trois localités de l'Ecosse. Ceci a permis de générer un biotope riche en variétés des oiseaux et des autres animaux¹⁷.

Pour les boues issues de la STEP d'Agadir, les gestionnaires de la réserve forestière du M'ZAR ont été identifiés comme utilisateurs potentiels de boues qui pourraient servir de fertilisant des cultures à gibier ainsi qu'amendement organique pour la reconstitution des sols dunaires¹⁸.

En guise de conclusion, l'exigence de la qualité des boues destinées aux différents modes de valorisation constitue la voie à suivre pour fiabiliser et développer ces filières de valorisation, la qualité des boues à épandre renferme à la fois leurs valeurs agronomiques et les risques sanitaires (ETM, CTO, Pathogènes).

Bien que plusieurs études aient montrés que les taux de transfert des ETM contenus dans les boues incorporées au sol vers les végétaux sont minimes, l'épandage répété des boues ayant des teneurs considérables en ETM pourrait, à long terme, provoquer dans les sols des accumulations incompatibles avec la qualité des plantes¹⁹.

¹⁵ Source : Compostage et valorisation du compost : Pratiques d'une agriculture durable in. Bulletin de Transfert de Technologie en Agriculture ,No 54 - Soudi.1999.

¹⁶ Source : UE, 2002.

¹⁷ Source : Plan d'action pour la gestion des boues des stations d'épuration des eaux usées, Rapport final - Ministère de l'environnement et du développement durable, Office national de l'assainissement liquide, Coopération Tuniso-allemande ONAS-KFW, Ghariani F., Soudi B., Baumgart H., Gredigk-Hoffmann S. & Bolle F.W., - août 2006..

¹⁸ Source : Etude des filières de traitement et de valorisation des sous-produits de la décantation des eaux usées – Rapport 4 – RAMSA – 2006.

¹⁹ Source : L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines, INRA - Dudkowski.

Au même titre que les ETM, les boues peuvent contenir des Composés Traces Organiques (CTO) qui sont des produits chimiques (hydrocarbures, détergents, solvants, produits de nettoyage ou de désinfection...) plus ou moins dégradés par l'activité microbiologique du sol. Ces composés peuvent devenir toxiques pour les micro-organismes des sols à haute dose apportée par les boues d'épandage. Mais à signaler que des expérimentations ont montré que les CTO apportés par les boues ne passent pas du sol vers les plantes et qu'ils se dégradent dans le sol à des vitesses variables et n'ont donc pas un flux cumulatif contrairement aux ETM²⁰.

1.2.7 Valorisation thermique

Par valorisation thermique des boues d'épuration, on entend l'auto-incinération de la boue en utilisant le potentiel de chaleur contenu dans la masse organique, sans chauffage additionnel ou de support. Selon le principe « La valorisation est meilleure que l'élimination », il faut alors utiliser le mieux possible l'énergie ou le contenu de chaleur dans la boue, résultant lors de l'incinération des matières organiques. En revanche, ceci exige que la grande proportion d'eau soit déjà séparée par voie mécanique afin que la dépense énergétique pour l'évaporation de l'eau ne soit pas trop grande lors du procédé de combustion.

La meilleure voie de valorisation est sans doute celle lors de laquelle la quantité de matières résiduelles qui doivent être mise en décharge reste la moins élevée. Dans ce contexte, il faut se rendre compte que la boue d'épuration, par rapport à la matière sèche, contient 50 % de composants minéraux qui restent même après une valorisation thermique. En fin de compte, il est question de recycler ces matières.

Un paramètre important pour l'incinération est la valeur calorifique du combustible, en l'occurrence la boue d'épuration (Annexe 17). On constate que la masse organique (sans eau et cendres) a une valeur calorifique d'environ 20.000 jusqu'à 22.000 kJ/kg.

De la boue non digérée avec une teneur en matières organiques d'environ 60 – 70 % a une valeur calorifique (sans eau) entre 14.000 et 16.000 kJ/kg. Selon le degré de digestion de la boue, elle possède (comme mélange de boue primaire et de boue activée), en raison de la gazéification et, avec cela, la réduction de la matière organique, un pourcentage minéral d'environ 50 % (sans eau) ; la valeur calorifique n'est que 10.500 à 11.000 kJ/kg.

1.2.7.1 Valorisation des boues dans des cimenteries

Une voie d'utilisation qui permet une valorisation complète des boues et sans résidus, c'est l'incinération commune des boues d'épuration lors de la production de ciment.

Avec les températures élevées dans les fours à ciment, en particulier les polluants organiques sont oxydés par voie thermique. Les matières inorganiques accumulées dans les cendres, y inclus les métaux lourds, sont fixées dans le clinker; à condition que les poussières dans les fumées soient séparées autant que possible et recyclées dans le processus d'incinération. Seul le mercure éventuellement contenu dans la boue ne peut pas être éliminé de cette manière.

²⁰ Source : Idem .

Comme la production de ciment nécessite beaucoup d'énergie, de grandes quantités de combustibles (charbon, gaz naturel, pétrole) sont utilisées dans les fours à ciment. Pour le fabricant, il est économique de se servir des combustibles les plus avantageux. C'est pourquoi on utilise très souvent, outre le gaz naturel et le pétrole qui ont une haute valeur calorifique, de grandes quantités de charbon de ballast qui sont broyées et séchées sur place et insufflées sous forme de poussière dans le foyer.

Les possibilités techniques de la valorisation des boues d'épuration dans l'industrie du ciment dépendent du combustible utilisé et de la technique de combustion. Si on utilise principalement du charbon de ballast comme source d'énergie, la boue peut être mélangée avec le charbon avant qu'il soit broyé et séché, puis les deux matières sont co-incinérées. La quantité additionnelle de boue dépend de la capacité d'évaporation du broyage-séchage, c'est pourquoi les boues devraient avoir une valeur calorifique d'environ 4.000 kJ/kg au minimum. Pour cette raison, seulement des boues déshydratées par des filtres-presses à chambres ou déshydratées à un haut degré par séchage naturel entrent en ligne de compte (dans cette gamme, les boues digérées et les boues brutes ont des pouvoirs calorifiques différents, à une teneur égale en eau).

A titre d'information, on se propose de donner un certain nombre d'information sur la procédure de co-incinération des déchets par Holcim Maroc. De par les caractéristiques particulières du procédé cimentier (hautes températures, long temps de séjour, etc.), les fours permettent de valoriser ou d'éliminer complètement la plupart des déchets, sans aucun résidu. Grâce aux installations spécifiques de réception et d'injection de déchets mises en place dans les unités d'Holcim, ce traitement se fait dans le plus strict respect des normes et principes environnementaux.

Pour cela une procédure d'acceptation et de contrôle des déchets qui permet de s'assurer de leur conformité aux impératifs du procédé de fabrication du ciment et aux exigences environnementales. Cette procédure est illustrée par la figure 6.

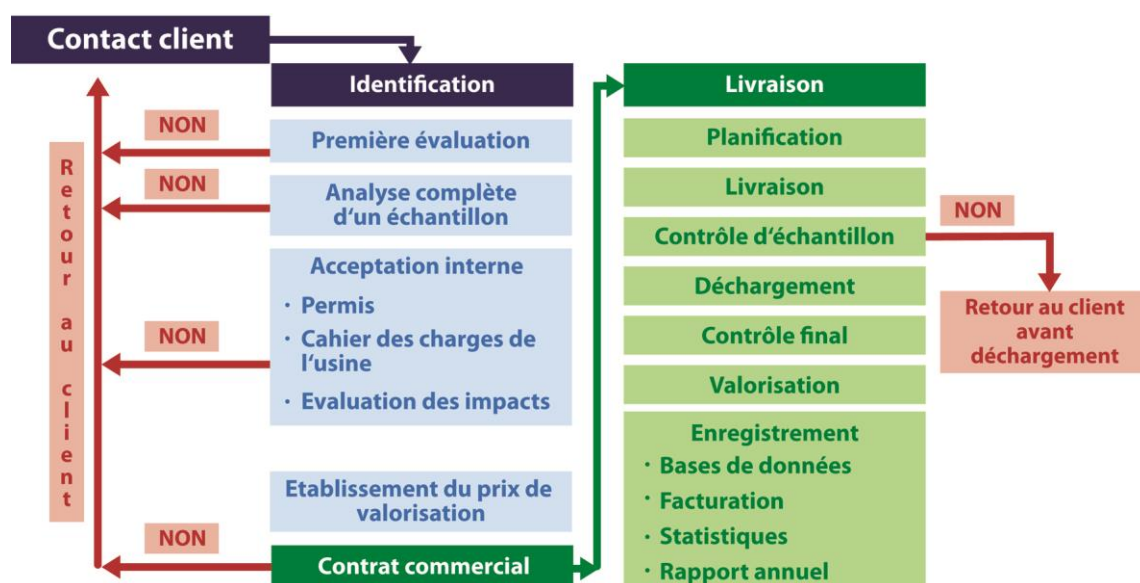


FIGURE 6 : PROCEDURE D'ACCEPTATION ET DE CONTROLE DE DECHETS²¹

²¹ Source : Holcim, Hind Baddag, Intervention lors de France expo 2006

La première étape de cette procédure est la prise d'échantillons du déchet avec une fiche d'identification type et une fiche de sécurité que le client remplit et les retourner avec un échantillon représentatif correspondant pour chacun des déchets qu'il désire soumettre à la procédure d'acceptation. A cette fiche, le client peut joindre toute analyse déjà réalisée, notice technique, fiche produit, etc.

A l'issue de cette première étape, et après une phase d'analyse rigoureuse au sein du laboratoire spécifique "déchets", Holcim se prononce sur l'acceptabilité du déchet en question, communique les conditions commerciales pour l'élimination des déchets.

L'élimination des boues issues des STEP dans les cimenteries est en cours d'essai actuellement au Maroc par différents groupes cimentiers.

1.2.7.2 Valorisation des boues dans des centrales électriques

Les centrales électriques qui utilisent l'houille ou lignite comme source d'énergie, proposent de brûler les boues. Ce qui permet d'exploiter la valeur thermique des boues. Les boues doivent être déshydratées préalablement. La teneur de polluant des boues ne doit pas être trop élevée. Des négociations entre l'opérateur de la centrale électrique et des gestionnaires des STEPs sont nécessaires. Le transport du charbon et des boues ainsi que le traitement des gaz émergents ultérieurement doivent être adaptés.

Au demeurant, des conditions semblables sont en vigueur comme lors de l'exploitation des boues dans les cimenteries.

1.2.8 Élimination des boues

1.2.8.1 Mise en décharge

Trois constats se répètent dans la littérature internationale traitant de ce sujet : (i) la mise en décharge semble être la moins coûteuse en termes de coûts internes et (ii) la mise en décharge n'est pas retenue parmi les options écologiquement durables et (iii) la mise en décharge est la solution de dernier recours lorsque les autres technologies ou options de valorisation s'avèrent difficiles à justifier dans un contexte donné pour des raisons techniques, sanitaires, environnementales, ou économiques.

Aussi, sur le plan réglementaire, on assiste à une restriction croissante en Europe et aux USA vis-à-vis de l'option de mise en décharge des boues d'épuration étant donnée leur teneur élevée en matière organique.

Il est clair que cette option s'opère conformément à certaines directives environnementales : l'étanchéisation des alvéoles, la gestion des lixiviats et du méthane.

1.2.8.2 Mono-décharge (boues seules)

La contrainte majeure de la mono-décharge réside dans la teneur élevée de l'eau dans les boues. Cette teneur ne doit pas généralement dépasser 65 % selon les normes de l'Agence Européenne de l'Environnement. D'ailleurs les boues très humides génèrent un surcoût de transport (transport de l'eau) sans parler des problèmes de gestion des eaux une fois déposées dans la décharge. Dans ce type de décharge, les aspects les plus importants à gérer et maîtriser sont :

- Le stockage et la répartition des boues sur le sol pour le contrôle de l'odeur et des rongeurs
- La collecte des lixiviats et des eaux pluviales et leur traitement
- Les aspects hygiéniques des opérateurs
- L'émission des gaz (CO₂ et CH₄). En général, les gaz émis contiennent 50 à 60 % de CH₄ et 40 à 50 % de CO₂.

Il est clair que tous les autres critères classiques de choix de site doivent être pris en considération : distance des habitations, vulnérabilité de l'aquifère, etc.

Dans l'évaluation économique de cette option, il est important de considérer le coût de terrain, le coût de transport, la durée de vie de la décharge et les coûts externes liés pour la minimisation des nuisances.

Pour le stockage des boues dans une mono-décharge, l'exigence la plus importante est de les déshydrater autant que possible, car :

- La réduction du volume économise des coûts, parce que moins d'eau est transportée ;
- On économise également le volume de décharge, ce qui a pour conséquence une prolongation de la durée d'exploitation de la décharge ;
- La stabilité de la décharge est améliorée (une mono-décharge n'est stable et ne peut être construite sans digues qui l'entourent que si la boue est déshydratée jusqu'à une teneur en matière sèche d'environ 40 à 45 %).

Pour cela, la déshydratation par les centrifugeuses ou les filtres-presses à chambres est nécessaire. En ce qui concerne les filtres-presses à chambres, la teneur élevée en matières solides est obtenue surtout grâce à l'addition d'adjuvants de conditionnement (chaux et sels de fer). Si on ne considère que la teneur en matières solides dans la boue, les centrifugeuses et les filtres-presses à chambres atteignent à peu près le même degré de déshydratation. Le gâteau de filtration des filtres-presses à chambres est stable de soi-même.

L'épaississement est nécessaire en tout cas avant la déshydratation ; car le degré de déshydratation possible dépend de l'épaississement. De plus, les agrégats de déshydratation doivent être alimentés uniformément. Cela exige un réservoir de stockage qui peut être conçu comme épaississeur.

Sous ces aspects, le schéma pour le traitement et l'élimination des boues peut être modifié pour une période de transition, comme présente dans la figure suivante :

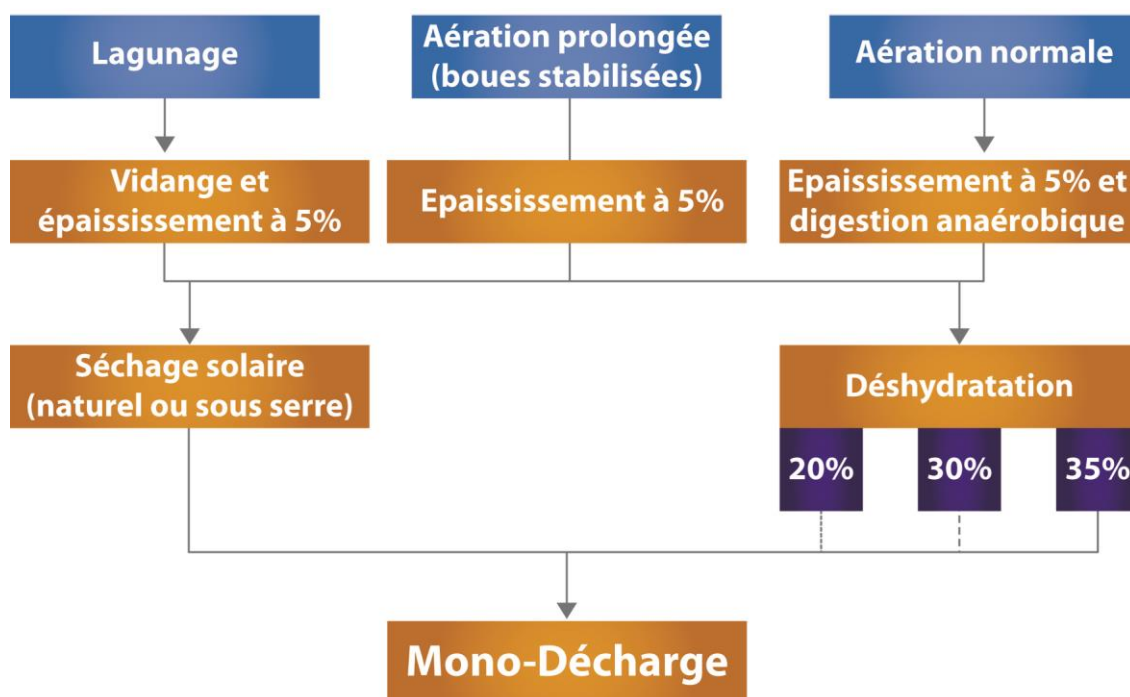


FIGURE 7 : SCHEMA DES VOIES DE TRAITEMENT DANS LE BUT D'UNE MISE EN DECHARGE

1.2.8.3 Décharge mixte (boues et déchets ménagers)

Dans les décharges mixtes, la part prépondérante est celle des déchets solides municipaux. Les boues sont considérées comme un additif secondaire qui représente 20 à 25 % du volume total du mélange.

Comme les institutions chargées de la gestion des déchets ménagers ne sont pas concernées par les boues, on assiste en général à des réticences de la part des communes et/ou compagnies concernées. Cette réticence est attribuée au fait que les boues compliquent la gestion des décharges et particulièrement lorsque les boues sont très humides. Cette problématique est plus accentuée au Maroc que dans les pays industrialisés car les déchets ménagers sont déjà très humides (60% en moyenne).

1.2.8.4 Incinération

L'incinération est une technique de combustion des boues à des températures très élevées pour l'élimination de l'eau et la calcination de la matière organique qu'elles contiennent. Cette option permet : (i) une réduction de l'espace pouvant être occupé par les boues avant incinération de plus 65% et (ii) une destruction des pathogènes et une dégradation des composés organiques toxiques.

Cette option présente quelques inconvénients assez sérieux :

- (i) Elle exige de grands volumes et elle est non adaptée aux petits centres urbains et à la plupart des unités industrielles.
- (ii) Les coûts sont relativement élevés (Cf. partie relative aux ordres de grandeur des coûts)

- (iii) Elle exige l'installation de procédés de traitement des émissions gazeuses et des fumées pouvant contenir des substances toxiques, telles que l'arsenic, le mercure, le plomb, etc.
- (iv) Elle exige un personnel hautement qualifié.
- (v) Elle requiert un entretien des équipements très coûteux.

Plusieurs types de technologies d'incinération sont disponibles : le four rotatif tubulaire, le four à pulvérisation, la co - incinération ou le four à lit fluidisé. Ce dernier est bien adapté au cas des boues industrielles ou urbaines qui nous concerne dans la présente étude. En somme, on peut dire que malgré les sous-options qui consistent à récupérer de l'énergie, cette option est assez coûteuse et ne s'adapte qu'aux très grandes stations. Il serait difficile de l'intégrer parmi les options à promouvoir dans le contexte marocain.

En outre, les expériences des autres pays montrent que le public est généralement réticent à ce type d'installation.

1.3 Filières et technologies de gestion des boues adaptées au contexte marocain

1.3.1 Principes directeurs de choix

Le choix d'une telle ou telle destination des boues repose sur un certain nombre de critères dont les plus importants, listés par OTV (1997) sont les suivants :

- La nature et l'origine des eaux usées (charge polluante, boue urbaine, boue industrielle etc.) ;
- Le niveau et le type de traitement sur la filière eau ;
- Les caractéristiques des boues et les volumes produits ;
- La taille de la STEPs ;
- Les exigences réglementaires ;
- Le contexte local ;
- Les coûts d'investissement et de fonctionnement.

On se propose de compléter cette liste par d'autres critères liés directement ou indirectement aux critères relatifs au contexte local et aux exigences réglementaires:

- Les exigences spécifiques du secteur utilisant les boues (type d'agriculture, type de cimenterie, etc.)
- La vulnérabilité et/ou la sensibilité des composantes de l'environnement (sol, eau souterraine et eau de surface)
- Les exigences en matière de technicité pour le fonctionnement et la maintenance des équipements

Nous sous-entendons aussi que le critère relatif au contexte local rapporté par OTV (1997) englobe le critère de sensibilité de voisinage. En effet, certains éléments de l'environnement sont relativement très sensibles aux nuisances potentielles olfactives (habitations, zone touristique, etc.). Il est clair que cet aspect devrait être pris en considération tout à fait à l'amont lors de l'étude de choix de site de la STEP ou même de l'unité industrielle elle-même lorsqu'il s'agit du secteur industriel.

1.3.2 Filières adaptées au contexte marocain

1.3.2.1 Catégorisation des boues

Avant de proposer les filières de gestion des boues adaptées au contexte marocain, il est primordial de les catégoriser selon leur niveau de toxicité.

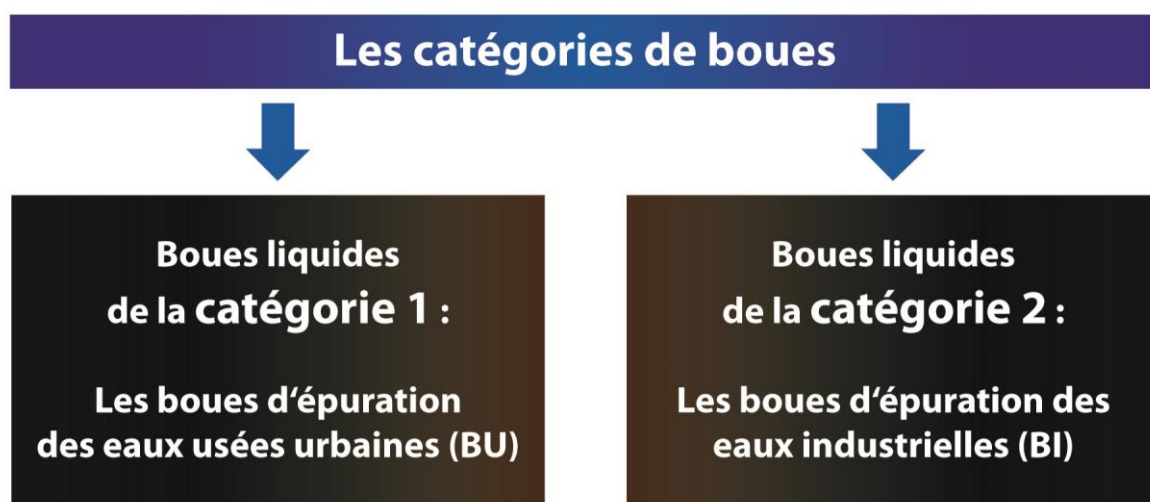


FIGURE 8 : SCHEMA DES CATEGORIES DE BOUES AU MAROC

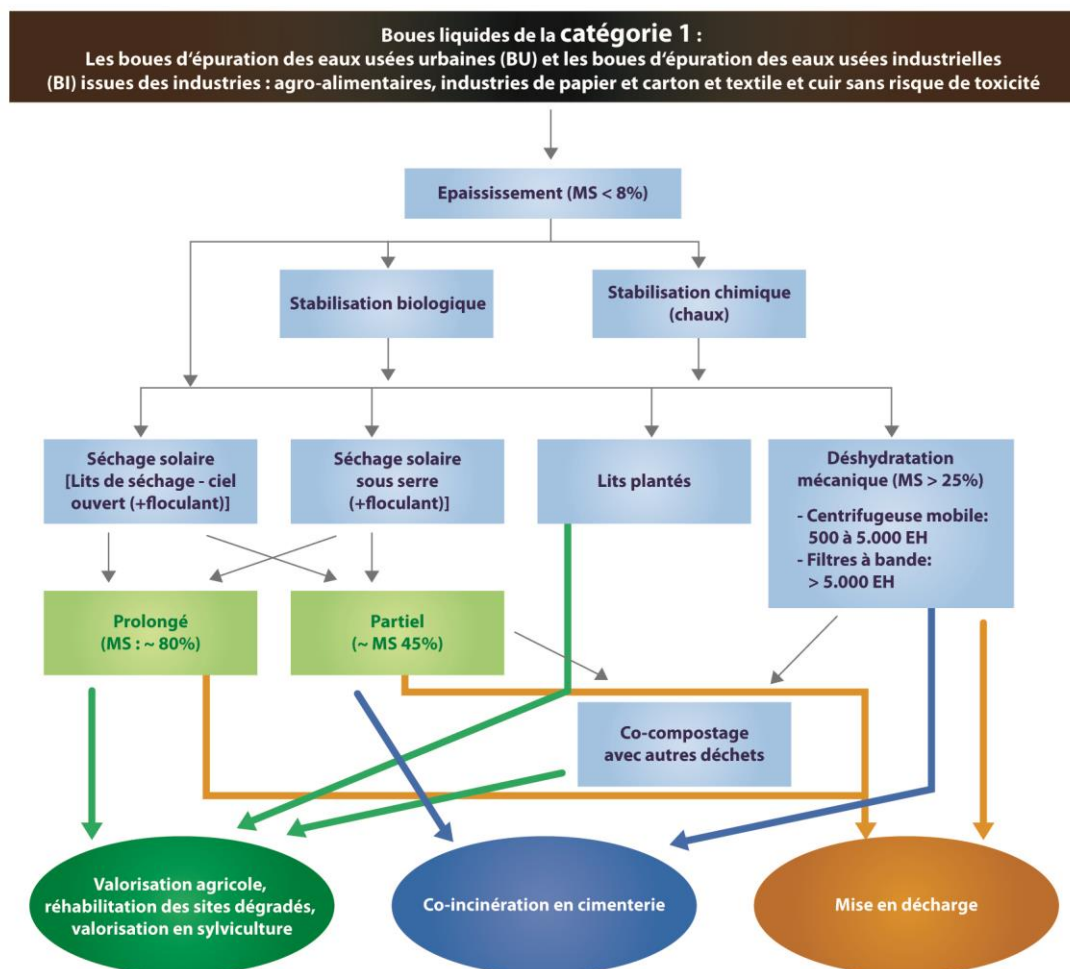
Ainsi, on pourra considérer les catégories suivantes :

- Catégorie 1 : Boues ne présentant pas de risque de toxicité. Ce seront à priori les boues d'épuration des eaux usées urbaines (BU) et les boues d'épuration des eaux usées industrielles (BI) issues des industries agro-alimentaires et industries de papier et carton²². Ceci peut aussi concerner les boues issues des stations de traitement dans le secteur du textile et cuir.
- Catégorie 2 : Les boues d'épuration des eaux boues industrielles (BI) issues des secteurs de mécanique, de métallurgie et électrique ainsi que du secteur chimique para – chimique avec a priori des teneurs en éléments toxiques.

²² Des valeurs de teneurs limites sont cependant à définir. Car des eaux usées urbaines traitant des rejets industriels pourront accumuler des métaux lourds qui pourront se révéler toxiques suivant la valorisation effectuée.

1.3.2.2 Élaboration des schémas de filières

Schéma des filières adaptées aux catégories 1



BT : Basse technologie (serres de type agricole, ventilé naturellement par voies latérales ;
HT : Haute technologie de séchage sous serre ventilée mécaniquement et avec un retournement automatique (adapté aux STEPs à grande sensibilité de voisinage)

FIGURE 9 : SCHEMA D'UNE FILIERE DE TRAITEMENT/VALORISATION DES BOUES (SANS RISQUES DE TOXICITE)

En somme, trois destinations importantes sont à promouvoir au Maroc et sont rapportées ci-après selon un ordre de préférence:

- La valorisation verte : valorisation agricole, réhabilitation des sites dégradés, valorisation en sylviculture et en pépinières forestières et de plantes ornementales ;
- La valorisation dans les cimenteries ;
- La mise en décharge mixte ou mono-décharge selon les situations et les contraintes. Il est clair que la mono décharge constitue une solution de dernier recours.

Il est clair qu'un certain nombre de traitements ou de prétraitements ou de transformations préalables sont nécessaires pour l'accès à ces destinations.

Soulignons aussi qu'en fonction des contraintes spécifiques des STEPs, certaines options seront privilégiées par rapport à d'autres. En effet, pour le cas des unités industrielles, l'espace est souvent non disponible et de ce fait le séchage sous serre (haute technologie) et la déshydratation occuperont la première place de choix.

Comme il a été mentionné auparavant, ce schéma des filières est dicté par un certain nombre d'éléments caractérisant le contexte marocain dont les plus importants :

- Le type de procédés d'épuration assez diversifiés mais dominés par les systèmes extensifs ou semi – extensifs ;
- Le grand gisement solaire qui caractérise le territoire national ;
- Le faible niveau de matières organiques dans les sols et leur soumission aux divers processus de dégradation comme il a été mentionné auparavant ;
- Le souci d'économie d'énergie ;
- Le souci d'adoption de technologies durables ;
- Le développement du secteur cimentier et ses efforts en matière d'intégration de la dimension de valorisation des déchets. Cet aspect est étayé dans l'encadré ci-après :

Lors des entretiens avec la responsable de l'activité « traitement des déchets » au sein d'Ecoval, on a constaté que cette structure est en cours de développement et d'optimisation des alternatives d'élimination – valorisation des déchets et notamment les boues dans les fours de cimenteries. On peut citer quelques initiatives déjà entreprises par Ecoval dans ce domaine :

- *Co-incinération des boues de la STEP d'une entreprise d'huilerie végétale, avec une quantité d'environ 20 tonnes de boues, cette expérience est jugée réussie et les boues du secteur sont considérées comme source appréciable de combustible de substitution (PCI important).*
- *D'autres essais ont été réalisés avec les boues de la STEP d'une industrie de traitement de surface, et ces boues sont considérées attractives pour la co-incinération dans les fours de cimenteries vue leur teneur considérable en fer, ce qui va diminuer davantage les charges de la société Holcim Maroc, en terme d'intrant pour la fabrication du produit final (diminution des frais de minerais de fer utilisé pour la correction de la composition de produit final).*
- *L'expérience de la plate-forme Ecoval a touché même le secteur des déchets urbains, en essayant avec les boues de la STEP de Nador mais cette tentative a connu un problème lié aux mauvaises odeurs, d'où la nécessité de stabilisation des boues avant leur acceptabilité pour la co-incinération dans les fours de cimenterie. Suite aux entretiens récents effectués auprès des responsables de l'assainissement à l'ONEP et avec la responsable de l'activité déchets au niveau d'Ecoval, une reprise de cette expérience à Nador semble être en cours de lancement.*

Ainsi, Ecoval compte mettre en place un atelier dédié seulement à la réception et traitement des boues issues des différents secteurs industriels et des STEPs urbaines.

Schéma des filières adaptées à la catégorie 2

Les filières adaptées pour la catégorie 2 sont les mêmes que celles proposées pour les catégories de boues 1. Toutefois, la filière « valorisation verte » sera de préférence exclue pour éviter les risques de contamination des sols et des eaux et le transfert des polluants à travers les produits végétaux.

Les filières adaptées à cette catégorie 2 sont illustrées par le schéma suivant :

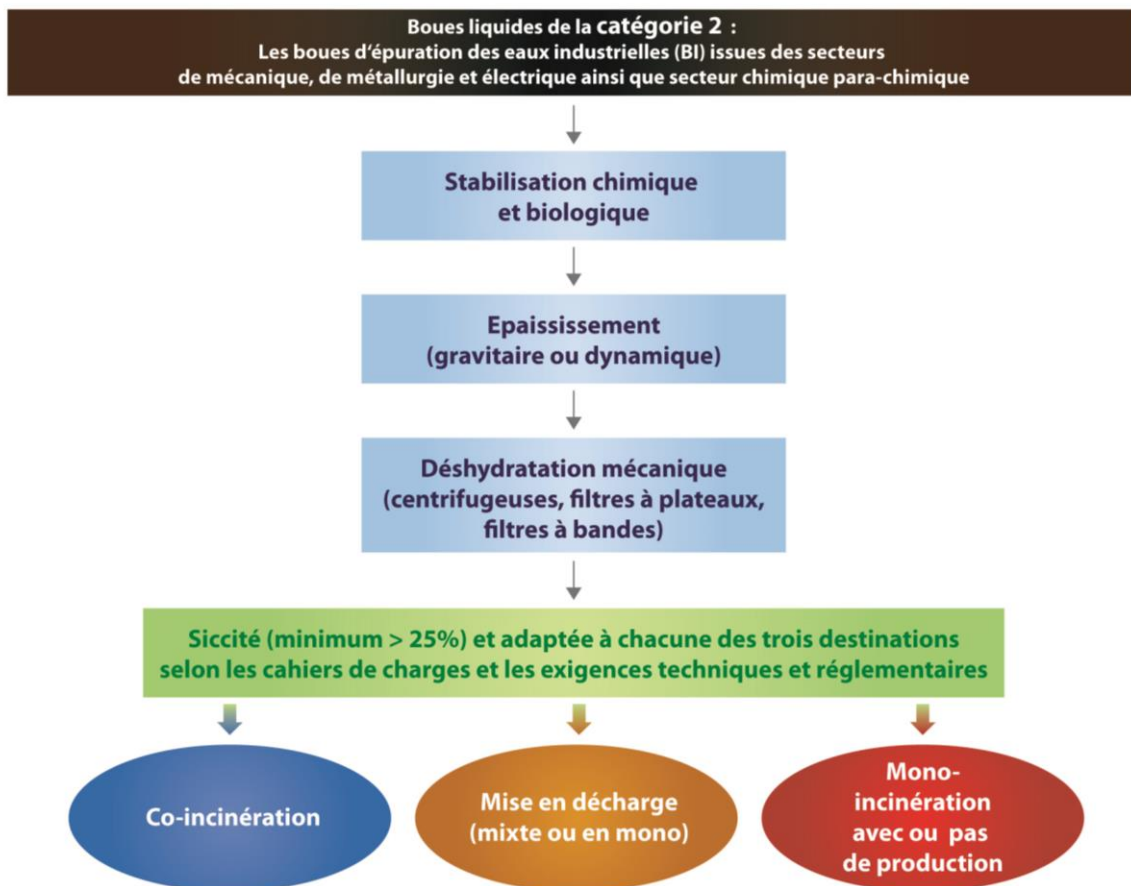


FIGURE 10 : FILIERE DE TRAITEMENT/VALORISATION DES BOUES DE CATEGORIE 2

Il est clair que d'autres traitements appropriés des boues peuvent les rendre valorisables. À ce propos, on assiste actuellement au développement de procédés de décontamination des boues notamment des éléments traces métalliques comme celui de METIX-AC de la Lyonnaise des Eaux basé sur biolixiviation avec sulfate ferreux et en présence d'une bactérie acidifiante.

Aussi, il est important de souligner que d'autres voies de valorisation comme le revêtement des talus routiers ou autoroutiers et en construction (briqueterie, etc. ;) peuvent être expérimentés localement sur base des expériences internationales notamment japonaise.

- Coûts de transport
- Coûts de suivi et de contrôle
- Gain agronomique

L'objectif de la gestion des boues est la valorisation matérielle ou énergétique des boues. Au cas où la valorisation n'entre pas en ligne de compte en raison de différents critères non accomplis, les boues doivent être éliminées.

Cette évaluation doit être mise en oeuvre respectivement par rapport à l'emplacement et les données locales.

Les aspects les plus importants sont ceux économiques et hygiéniques.

Dés que l'on veut donner une recommandation appropriée concernant le choix des méthodes de traitement des boues, il faut prendre en considération plusieurs types des conditions cadres.

D'une part, il y a des données socio-économiques (régionalisées) (Voir Tableau T3) et les données techniques des STEP (Voir Tableau T4), qui sont à analyser et leurs impact sur la composition (qualité) et la quantité des boues d'épuration est à identifier.

De l'autre part, l'utilisation ultérieure des boues fixe les exigences concernant le niveau hygiénique des boues, ainsi que le contenu en métaux lourds et autres composantes toxiques. (Voir Tableau T5)

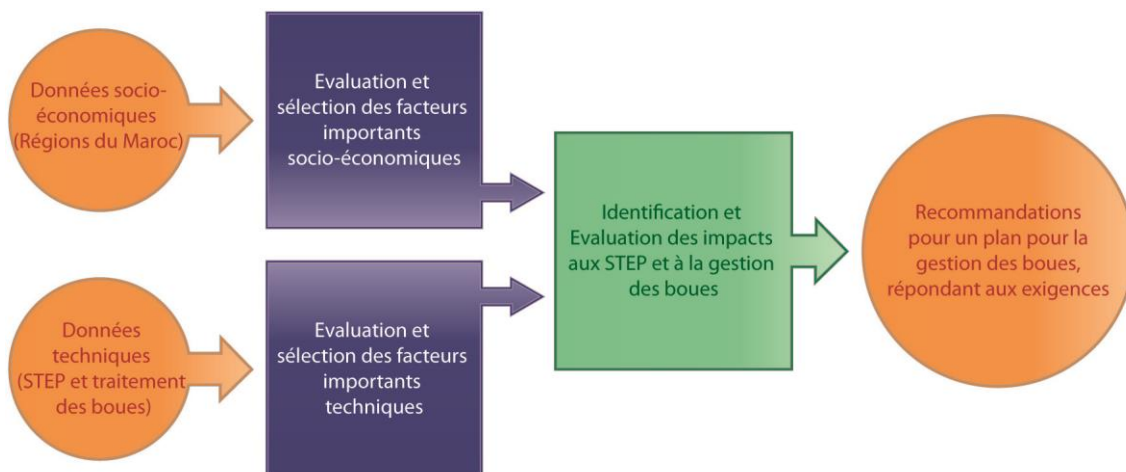


Figure F3 : Schéma d'évaluation des conditions existantes dans les régions du Maroc en vue d'une recommandation pour les méthodes de traitement des boues

Les facteurs socio-économiques pour les régions du Maroc sont présentés au Tableau T3 (sur la base des données de l'année 2008)

Tableau T3: Facteurs socio-économiques pour les régions du Maroc¹

Régions du Maroc	Facteurs socio-économiques				
	Densité de population hab/km ² I < 200 II 200-500 III >500	Unités industrielles I < 300 II 300-600 III >600	Agriculture: A Agrumes C Céréales L Légumes I Industrielle F Forêts	Agriculture: Cheptel O Ovins B Bovins C Caprins	Économie Mines : P phosphate Z zinc F fer FI Fluoride Pb Plomb B barytine
Chaouia - Ouardigha	II	II	F-C-L (8700t)	O-B-C	P
Doukala - Abda	I	I	F-C-L(11400t)-I	O-B-C	P-B
Fès - Boulemane	I	III	C-L (12200t)-F	O-B-C	
Gharb - Chrarda - Béni Hssen	II	I	C-L (27600t)-I-A-F	O-B-C	
Grand-Casablanca	III	III	C	B	
Guelmim - Es-Semara	I	I		C-O	F
Laâyoune - Boujdour - Sakia El Hamra	I	I			P
Marrakech - Tensift - Al Haouz	I	II	F-C-L (2100t)	O-B-C	P-Pb-B-Z
Meknès - Tafilalet	I	I	C-L (15000t)-F	O-B-C	Z-Pb-B-FI
l'Oriental	I	II	F-C-I-A	O-B-C	Z-Pb-B-F
Oued Ed-Dahab - Lagouira	I	I			
Rabat - Salé - Zemmour - Zaer	II	III	F-C-L (3300t)	O-B-C	FI
Souss - Massa - Daraâ	I	II	C-A-F	O-B-C	B-M-F
Tadla - Azilal	I	I	C-L (7360t)-I-A-F	O-B-C	Z-Pb
Tanger - Tétouan	II	III	C-L (12000t)-I-A-F	O-B-C	
Taza - Al Hoceïma - Taounate	I	II	C-L (40600t)-F	O-B-C	

1 - NN (2009) : Le Maroc des Régions 2008. Juin 2009, ISBN 798-9981-20-238-X

Tableau T4 met en liaison les indicateurs socio-économiques et les techniques de traitement d'eaux usées, et montre les potentiels résultants pour la valorisation des boues.

Tableau T4: Indicateur socio-économiques et techniques de traitement d'eaux usées (STEP) et valorisation de boues

Indicateur	Domaine des valeurs	Facteurs effectifs STEP opération et utilisation des boues	Type de traitement	Valorisation des boues
Densité de population hab/km²	I < 200 II 200-500 III >500	si élevée (II /III): peu espace disponible, production intensive de boues digérées organique putrescibles	Potentiel haut d'utilisation du biogaz, petit potentiel pour lagunage	Petit potentiel pour la valorisation verte, Potentiel pour la valorisation rouge (incinération), Besoin de décharge
		Si bas (I): Espace libre disponible	Potentiel haut pour lagunage	Potentiel pour la valorisation verte
Unités industrielles	I < 300 II 300-600 III >600	Si élevée (II/III): Production d'eau extrême contaminée avec les qualités diverses ; Grande quantité de boues contaminées	Petit potentiel pour lagunage Grande capacité financière Besoin de traitement haut-qualité	Potentiel pour la valorisation rouge (décharge/incinération) Grand potentiel pour la co-incinération
Économie Agricole	C céréales L légumes I industrielle F forêts	Légumes: Grande demande d'une qualité d'eau préférable	Besoin de traitement haut-qualité	Grande demande des boues avec une qualité hygiénique préférable, Grand potentiel pour la valorisation verte
		Forêts: Potentiel de ressources d'eau avec une qualité préférable		Potentiel pour la valorisation verte
Économie Agricole: Cheptel	O ovins B bovins C caprins	Si élevée (O-B-C): production intensive des boues organiques (putrescible)	Potentiel haut d'utilisation du biogaz, Grande demande d'une qualité d'eau préférable	Grande demande des boues avec une qualité hygiénique préférable Grand potentiel pour la valorisation verte
		Si bas: petit production des boues organiques (putrescible)		
Économie Mines :	P phosphate Pb plomb F fer Z zinc Fl Fluoride M manganèse B barytine	Si élevée: Production d'eaux extrêmes contaminées par divers métaux lourds	Besoin de bonne grille retenue, potentiel de la pollution par les métaux lourds	Potentiel pour la valorisation rouge (décharge/incinération) Grand potentiel pour la co-incinération Grand potentiel pour le décharge

1.4.2 Aspects hygiéniques

La valorisation "verte" des boues en agriculture a des exigences spécifiques en matière de sécurité hygiénique des boues. Une bonne qualité hygiénique des boues doit être obtenue par une hygiénisation, qui peut se dérouler selon différentes procédures (Figure 12).

Le tableau 4 montre les conditions d'hygiénisation et les différents paramètres de procédure d'hygiénisation.

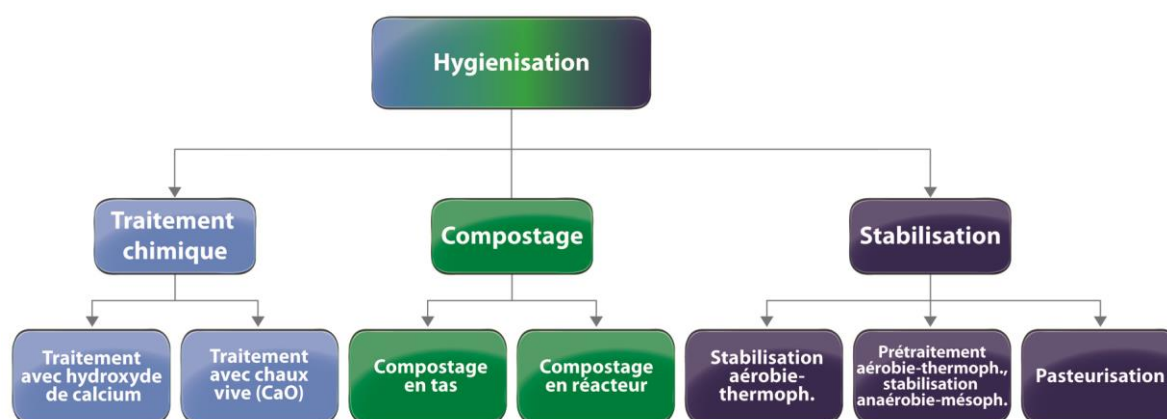


FIGURE 12 : FILIERES D'HYGIENISATION

TABEAU 4 : LES DIFFERENTS SEUILS EN FONCTION DES PROCEDES DE DECONTAMINATION

Procédé pour la décontamination	Déconta-mination par	Durée du processus	Conditions supplém.	Mise en place
1. Traitement avec hydroxyde de calcium	pH = 12,5	≥ 3 mois	mélange nécessaire	petites à moyennes STEP
2. Stabilisation aérobie-thermoph	T ₁ = 50°C T ₂ = 55°C T ₃ = 60° C	t ₁ ≥ 23h t ₂ ≥ 10h t ₃ ≥ 4h	pH ≥ 8,0 pH ≥ 8,2	STEP à 10.000 – 50.000 EH
3. Prétraitement aérobie-thermo., stabilisation anaérobie-mésoph	T ₁ = 60°C T ₂ = 65°C T ₃ = 70° C T ₄ = 80° C	t ₁ ≥ 60 min. t ₂ ≥ 30 min. t ₃ ≥ 25 min. t ₄ ≥ 10 min.	stockage final 3 mois	STEP surchargé ou moyennes à grandes STEP
4. Pasteurisation	T ₂ = 65°C T ₃ = 70° C T ₄ = 80° C	t ₁ ≥ 30 min. t ₂ ≥ 25 min. t ₃ ≥ 10 min.	stockage final jusqu'au 3 mois	En générale moyennes à grandes STEP
5. Traitement avec chaux vive (CaO)	T = 55 à 70°C et pH ≥ 12,5	t ≥ 23h		tout les STEP avec déshydratation
6. Compostage en tas	T = 55°C	t ≥ 3 semaines	pH ≥ 8,0 pH ≥ 8,2	petites à moyennes STEP avec déshydratation
7. Compostage en réacteur	T = 55°C, dans la zone chaude : T = 65°C	10 jours t ₂ ≥ 2j		grandes STEP avec déshydratation

Les différents types de réutilisation des boues exigent différents niveaux de la qualité hygiénique. Pour assurer les différents niveaux hygiéniques, différentes méthodes de traitement des boues sont nécessaires.

Tableau T5 : Les niveaux hygiéniques en correspondance de la réutilisation prévue

Niveau hygiénique	Utilisation	Recommandations supplémentaires	Niveau de traitement
1 (bas)	- Agriculture (céréales, industrielles) - Arbres fruitiers		Traitement primaire Prétraitement + Lagunage anaérobie
	- Culture des fruites et des légumes, (produits agricoles qui sont en contact avec le sol ne pas recommandé à la consommation)	Épandage seulement avant la semence ou avant la plantation dans la même période de pousse	
2 (moyen)	- Pâturages (ovins, bovins, caprins),	pas de récolte pendant les six semaines après l'épandage	Même traitement que niveau 1 + Lagunage facultatif
	- Plantage des arbres ; espace d'afforestation ; forêts - conquête des terrains - Parcs, espaces vert, jardins public, tous les espaces publics	Seulement les boues bien stabilisées et sans nuisances olfactives	
3 (haut)	- Culture des fruites et des légumes, les produit agricole avec le contact de sols (consommation des produits crus possible)	Épandage seulement avant la semence ou la plantation	Même traitement que 2 + traitement tertiaire

Tableau T7 résume les méthodes recommandées pour le traitement des boues d'épuration en fonction de la région du Maroc, respectant le système du degré de l'hygiénisation.

Tableau T7: Recommandations pour les niveaux hygiéniques et les techniques de traitement, régionalisées pour le Maroc

Régions du Maroc ¹			Recommandations				
Nom des Régions	Boues des STEP (Mg/an)	Boues de curage (Mg/an)	Niveau hygiénique recommandé	Épaississement	Séchage	Valorisation	Élimination décharge
Chaouia - Ouardigha	2 158	155	3 - haut	statique gravitaire	technique	thermique	
Doukala - Abda	67	479	3 - haut	statique gravitaire	naturel		décharge
Fès - Boulemane	0	866	3 - haut	statique gravitaire	naturel	verte	décharge
Gharb - Chrarda - Béni Hssen	0	391	3 - haut	statique gravitaire	naturel	thermique	décharge
Grand-Casablanca	73	2 707	3 - haut	statique gravitaire	technique	thermique	
Guelmim - Es-Semara	0	0	2 -moyen	statique gravitaire		verte	
Laâyoune - Boujdour - Sakia El Hamra	0	0	2 -moyen	statique gravitaire		verte	décharge
Marrakech - Tensift - Al Haouz	248	756	2 -moyen	statique gravitaire	naturel		décharge
Meknès - Tafilalet	0	536	3 - haut	statique gravitaire		verte	décharge
l'Oriental	0	0	2 -moyen	statique gravitaire	naturel		décharge
Oued Ed-Dahab - Lagouira	198	1 534	2 -moyen	statique gravitaire		verte	
Rabat - Salé - Zemmour - Zaer	1 452	358	3 - haut	statique gravitaire	technique	thermique	
Souss - Massa - Daraâ	6 076	536	2 -moyen	statique gravitaire		verte	décharge
Tadla - Azilal	1 584	203	3 - haut	statique gravitaire	naturel	thermique	décharge
Tanger - Tétouan	333	1 262	3 - haut	statique gravitaire	naturel	thermique	
Taza - Al Hoceïma - Taounate	1 220	118	3 - haut	statique gravitaire		verte	

1 - NN (2009) : Le Maroc des Régions 2008. Juin 2009, ISBN 798-9981-20-238-X

1.4.3 Coûts, aspects économiques

Tableau T8 donne un aperçu sur les coûts spécifiques en fonction de la capacité des STEP et des procédés de traitement des boues d'épuration. Les données proviennent d'une synoptique sur le traitement des boues d'épuration du Umweltbundesamt de l'Allemagne en 2009.

La classification de la capacité de traitement des STEP est exprimé comme équivalent habitant par jour (1 EH = 60g DOB/jour).

Tableau T8: Filières et gestion des boues (liquides/déshydratées) et les coûts de gestion dépendantes de la valeur de habitants²

Type de traitement	Spécification des filières	Habitants connectés à la STEP	Coûts valeur de habitants à €/an	Coûts à Mg boues MS (secs) €/Mg	Coûts à Mg boues MF (fraîche) €/Mg
Pour les boues liquides / pour la condition de boues					
„Stabilisation anaérobie“	Pasteurisation	1000	7	340	14
		10000	4	160	6
		50000	3	125	37
		300000	2	69	21
Traitement avec hydroxyde de calcium (chaux)	Sans réservoir (déshydratation mobile)	1000	8	341	14
	Sans réservoir	1000	16	709	28
	Avec réservoir	1000	24	1100	44
	Sans réservoir	10000	5	207	8
	Avec réservoir	10000	7	305	12
Séchage solaire des boues liquides		1000	19	853	34
		10000	13	592	24
Stockage de longue durée (des boues liquides)	Réservoir rond	1000	35	1571	63
	Lit de séchage	1000	28	1291	52
Pour les boues déshydratées					
Séchage thermique		300000	5	225	67
Compostage des boues		1000	10	5	2
		10000	453	232	75
		50000	113	58	22
Traitement des boues avec la chaux éteinte		10000	4	167	84
		50000	2	42	25
Séchage solaire des boues pressées		1000	39	1788	72
	Avec Pellets (produites avec hauts températures (PHT))	1000	59	2694	108
		10000	7	340	85
	Avec PHT	10000	9	422	106

Type de traitement	Spécification des filières	Habitants connectés à la STEP	Coûts valeur de habitants à €/an	Coûts à Mg boues MS (secs) €/Mg	Coûts à Mg boues MF (fraîche) €/Mg
Stockage de longue durée (des boues déshydratées)	déshydratation mobile	1000	10	465	19
	déshydratation mobile	10000	7	305	12
	déshydratation stationnaires	10000	2	105	4

2 - Umweltbundesamt (2009) : Anforderung an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparameter, ISSN 1862-4804, Texte 05-09

Le Tableau T9 montre les méthodes différentes appropriées en fonction de la capacité des STEP. Si un procédé est valide, il est indiqué en couleur verte. Si un procédé est non approprié il est indiqué en couleur rouge et une explication brève est donnée.

Tableau T9 : Méthodes appropriées pour le traitement des boues en fonction de la capacité des STEP²

Filières		Habitants connectées à la STEP			
		1000	10000	50000	300000
Pour les boues liquides / pour la condition de boues					
Pasteurisation		o.k.	o.k.	o.k.	o.k.
Hydrate de chaux	Sans réservoir des boues (déshydratation mobile)	o.k.	o.k.	Besoin en matériel trop grand	
	Avec un réservoir des boues	o.k.	o.k.		
Séchage solaire sur lits des boues liquides		o.k.	o.k.	Espace nécessaire trop grand	
Stockage long temps des boues liquides	Réservoir rond	o.k.	Volume nécessaire des réservoirs trop grand		
	Lit de séchage	o.k.			
Pour les boues déshydratées					
Séchage thermique		Inadapté: les coûts d'investissement trop grands			o.k.
Compostage des boues		o.k.	o.k.	o.k.	
Traitement des boues (déshydratées) avec la chaux		o.k.	o.k.	o.k.	

Filières		Habitants connectés à la STEP			
		1000	10000	50000	300000
Séchage solaire des boues pressées	Pellets (PHT)	o.k.	o.k.	Espace nécessaire trop grand	
		o.k.	o.k.	Espace nécessaire trop grand	
Stockage long temps des boues déshydratées	Déshydratation mobile	o.k.	o.k.	Volume nécessaire des réservoirs trop grand	
	Déshydratation stationnaire		o.k.		

2 - Umweltbundesamt (2009) : Anforderung an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparameter, ISSN 1862-4804, Texte 05-09

Les ordres de grandeur des coûts, par rapport au traitement de 1 Mg siccité, pour différentes technologies de traitement sont représentés dans la figure 13.

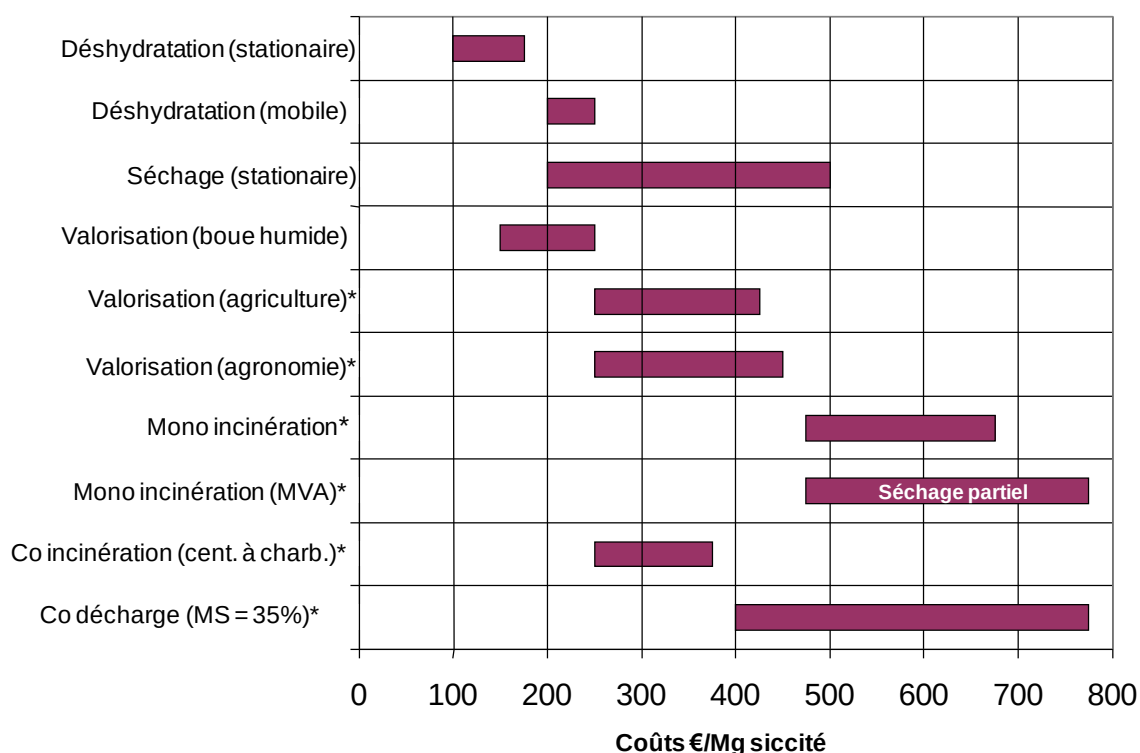


FIGURE 13 : FILIERES DE GESTION DES BOUES ET COUTS PERTINENTS

Les coûts totaux couvrent les frais pour le transport, la déshydratation, le séchage, le traitement (valorisation) et les coûts de négociation (entre gestionnaire et opérateur).

Ci-dessous la marge des coûts de valorisation en Euro comprenant le transport et la TVA, avec des données moyennes de coûts de déshydratation et de séchage (Figure 14).

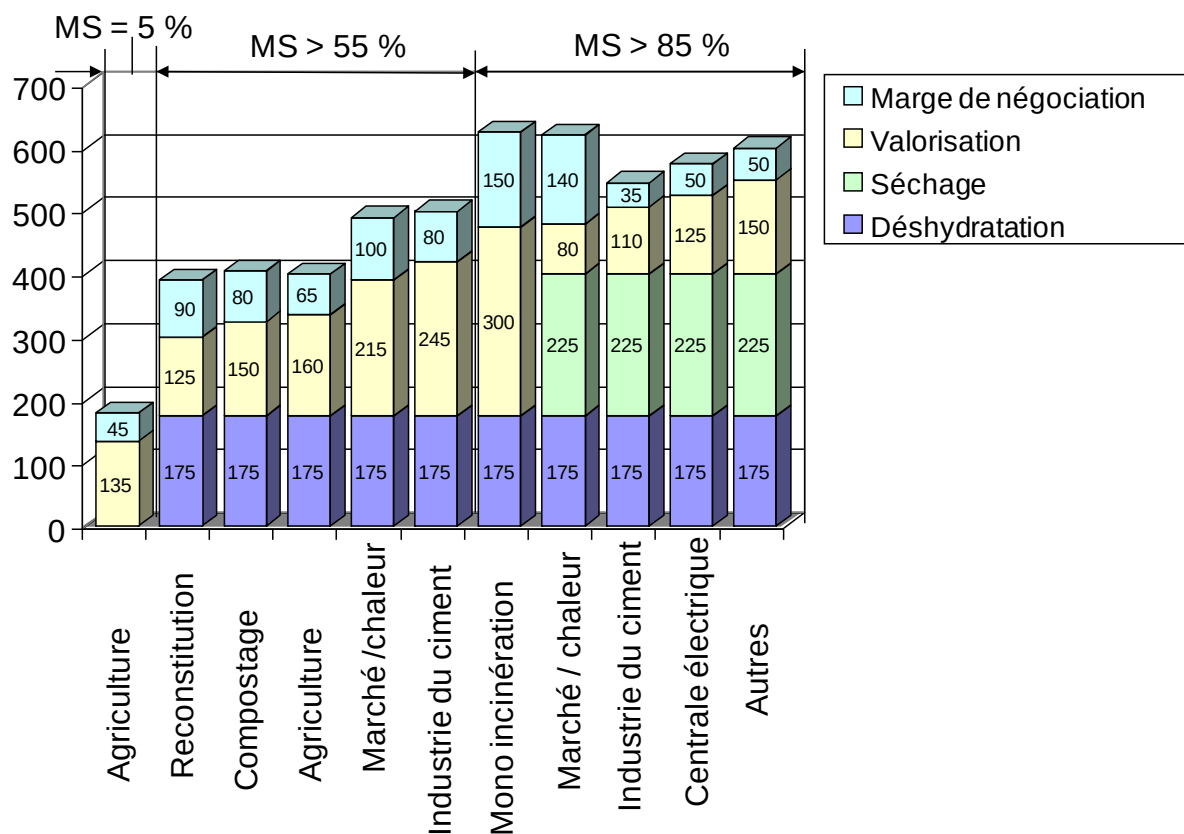


FIGURE 14 : MARGE DES COÛTS DE VALORISATION EN EURO

2 Filières de traitement – Épaississement, Déshydratation

2.1 Préambule

Lors de l'épaississement commun de la boue primaire et de la boue secondaire, une teneur en solides d'environ 5 % de matières sèches doit être atteinte. Lors de l'épaississement de la boue primaire, 7 à 8 % de matières sèches seraient à envisager, ou environ 4 % lors de l'épaississement de la boue activée par une centrifugeuse. Car une teneur d'environ 5 % de matières sèches dans le digesteur est optimale pour une exploitation économique de la digestion.



FIGURE 15 : STEP AVEC AERATION PROLONGEE, A DROITE 3 SILOS (RESERVOIRS DE BOUE POUR VALORISATION AGRICOLE)

En Allemagne, les stations d'épuration plus petites (jusqu'à environ 20.000 EH) sont exploitées sans traitement primaire et, en règle générale, comme des installations à boues activées faiblement chargées. Seul de la boue biologique ou activée est produite qui doit être traitée et éliminée. Par suite des températures qui règnent dans le pays, cette boue est souvent mal stabilisée et peu déshydratable. S'il n'est pas possible de la valoriser ou éliminer en place, elle est souvent transportée dans des stations d'épuration plus grandes, où elle entre dans leur chaîne de traitement, en partie dans le digesteur pour améliorer la déshydratabilité et la stabilisation. A cet effet, il est nécessaire de l'entreposer pendant un certain temps et de l'épaissir. Pour ceci, on utilise souvent des silos à boues qui sont bâtis de manière très simple et dont la capacité de réservoir est calculée pour environ six mois. Dans ces silos, la boue est également épaissie jusqu'à environ 5 % de matières sèches (Figure 15).

Dans les grandes stations d'épuration, non seulement de la boue primaire mais aussi de la boue secondaire ou activée est produite. Dans les installations plus petites de cette catégorie, ces deux boues sont mélangées et épaissies dans des épaississeurs. Dans les installations plus grandes, elles sont épaissies séparément à l'aide d'épaississeurs (boue primaire) et de centrifugeuses spéciales (boue secondaire) et, à peu d'exceptions, stabilisées de manière anaérobie dans des digesteurs. Les épaississeurs sont construits en

forme de bassins ronds avec une profondeur de quatre à cinq mètres et un temps de séjour de deux à trois jours. Les centrifugeuses sont conçues spécialement pour l'épaississement. Leur forme est plus courte que celle des centrifugeuses de déshydratation. Elles sont exploitées sans addition d'adjuvants de filtration.

Dans de nombreuses installations, on utilise aussi les pointes des entonnoirs du décanteur primaire pour l'épaississement de la boue. Un programme de contrôle est utilisé pour évacuer la boue épaissie en faibles quantités de la pointe de l'entonnoir et de la pomper successivement dans le digesteur.

2.2 Introduction

Pour la déshydratation subséquente des boues, la destination finale des boues (Valorisation en agriculture, valorisation thermique, stockage dans des décharges contrôlées de manière isolée (mono - décharge) ou avec les déchets ménagers, incinération) est d'une grande importance pour définir le taux de déshydratation des boues.

Les boues d'épuration peuvent être utilisées en agriculture, selon les besoins, avec des teneurs très différentes en matières sèches. La valorisation agricole est la seule méthode d'élimination pour laquelle on peut utiliser directement la boue liquide avec des teneurs en matières sèches d'environ 5 %. Mais il faut être conscient que l'économie de la déshydratation est toutefois payée par des dépenses considérablement élevées pour le transport. Comparé à la boue déshydratée, la boue liquide contient, en moyenne, cinq à dix fois plus d'eau. Par conséquent, il faut déplacer cinq à dix fois plus de bien à transporter. Ces dépenses supplémentaires passent pour être justifiées quand on a besoin d'une teneur élevée en azote. En règle générale, la teneur en azote est réduite lors de la déshydratation des boues.

Si on envisage, par contre, la mise en décharge en commun avec des déchets ménagers ou l'incinération, il faut déshydrater la boue par voie mécanique.

Sont considérées comme machines appropriées les filtres à bandes, les centrifugeuses et les filtres-presses à chambres. Outre la technique mécanique, ils se distinguent en ce qui concerne le résultat de déshydratation, leur consommation d'adjuvants de floculation et de filtration, leur consommation d'énergie, la pression exercée et les coûts.

On obtient sans aucun doute le meilleur rendement de déshydratation avec le filtre-presse à chambres, mais, en même temps, à des frais plus élevés.

Le domaine d'utilisation de la centrifugeuse est très large, mais le résultat de déshydratation est un peu plus faible.

Lors des filtres à bandes, on a essayé d'augmenter le rendement de déshydratation par un guidage des bandes de plus en plus compliqué, mais souvent le résultat n'était pas très satisfaisant.

La Figure 16 montre l'importance relative des modes de déshydratation adoptées en Allemagne.

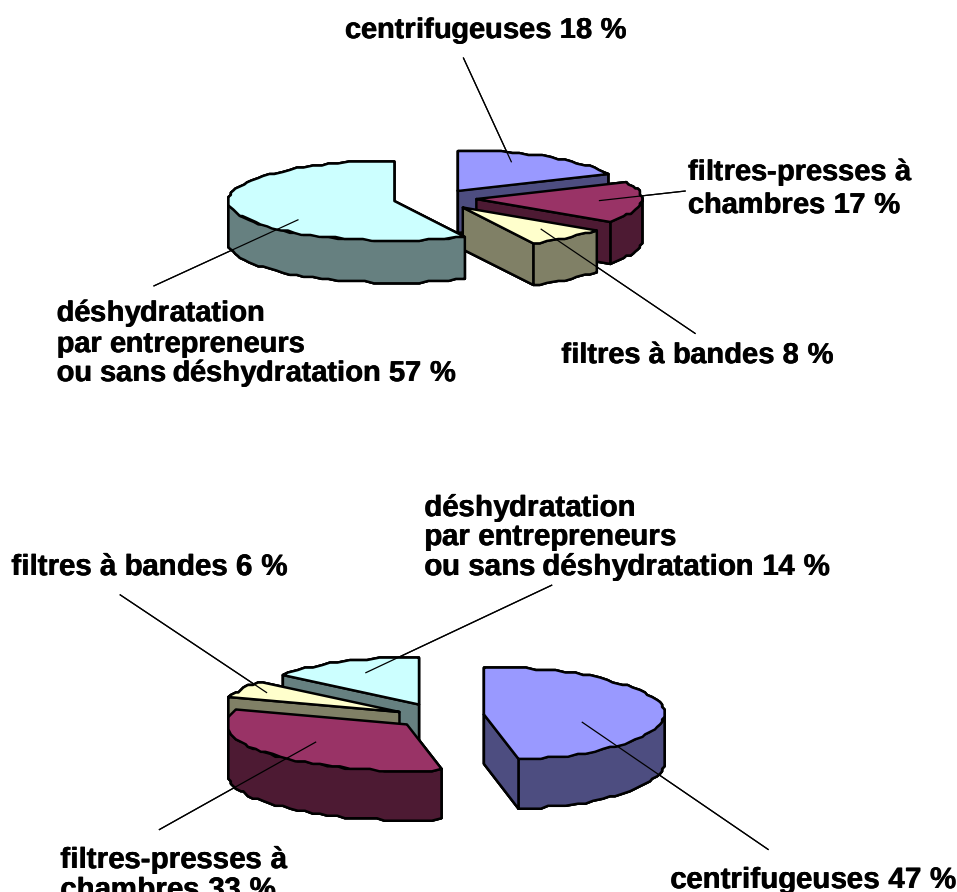


FIGURE 16 : LA DESHYDRATATION DES BOUES EN ALLEMAGNE (BASE EN HAUT : NOMBRE DE STEP, BASE EN BAS : EH)

Il devient clair qu'on utilise des centrifugeuses dans la plupart des stations d'épuration à cause de leur simplicité technique. Les filtres-presses à chambres occupent la deuxième place, surtout aux installations où on souhaite un haut degré de déshydratation ; les filtres à bandes sont à la dernière place. Le tableau 5 présente une compilation des degrés de déshydratation qui peuvent être atteints avec les différents modes de déshydratation ainsi que leurs consommations moyennes d'énergie.

2.3 Principe, conditions d'application

La déshydratation des boues peut être mise en oeuvre avec les agrégats techniques suivant :

- Filtre-presses à bandes (Figure 17)
- Filtre-presses à chambres (Figure 18) et
- Centrifugeuses (Figure 19).

Selon le type de boue et l'intensité de la déshydratation souhaitée, des aides sont nécessaires pour le processus (Figure 20).

La déshydratation mécanique exige du savoir-faire concernant la procédure technique et un investissement technique.

La déshydratation mécanique s'effectue sur le terrain de la station d'épuration et n'a pas d'influence sur l'environnement proche. Le fonctionnement de l'installation est une tâche revenant à l'opérateur de la STEP.

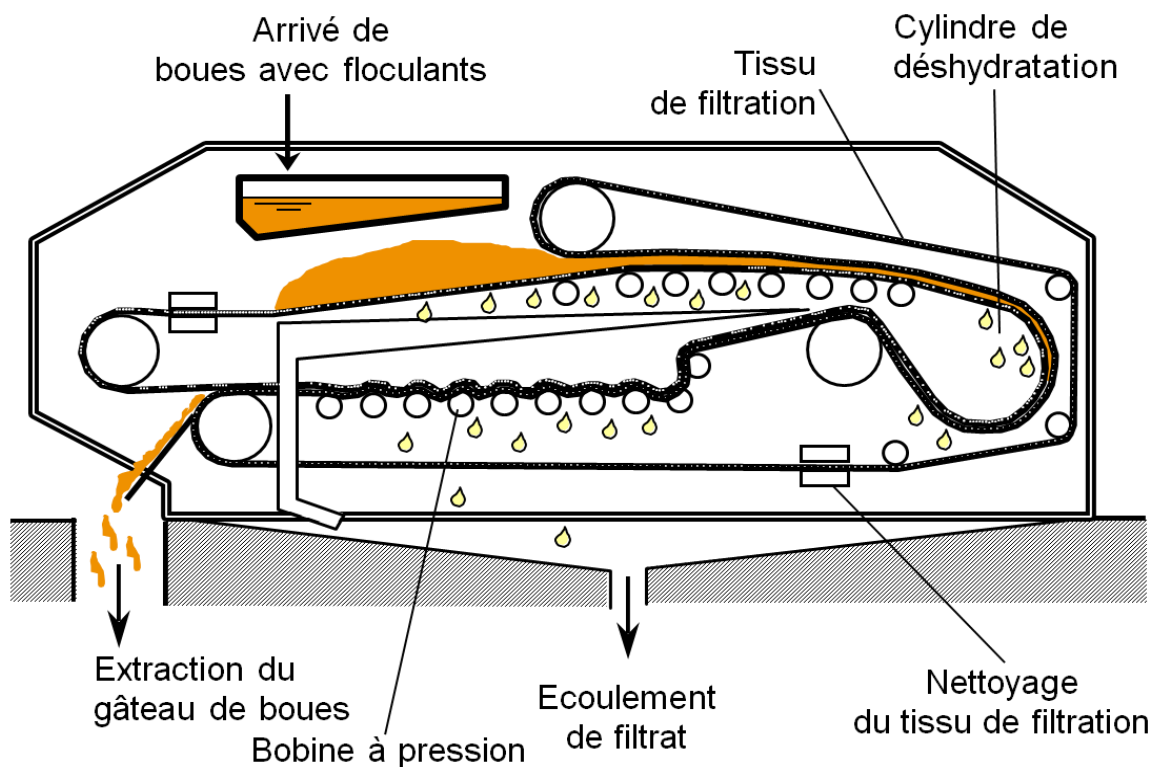


FIGURE 17 : SCHEMA DE FILTRE A BANDES

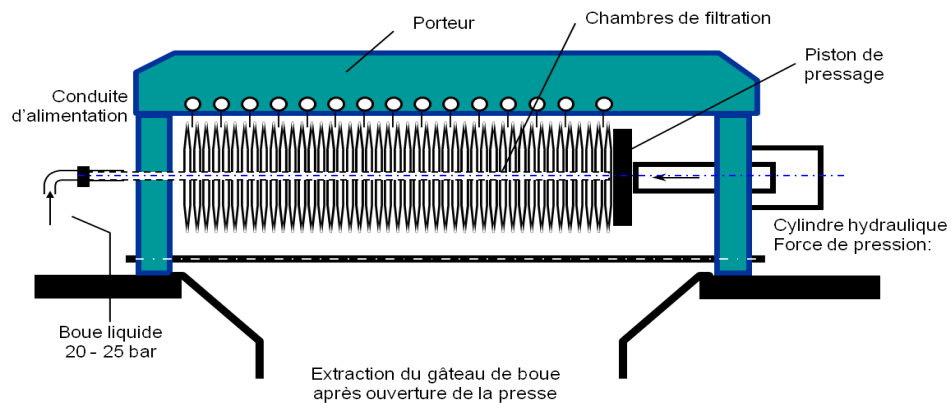


FIGURE 18 : SCHEMA DE FILTRE-PRESSE A CHAMBRES

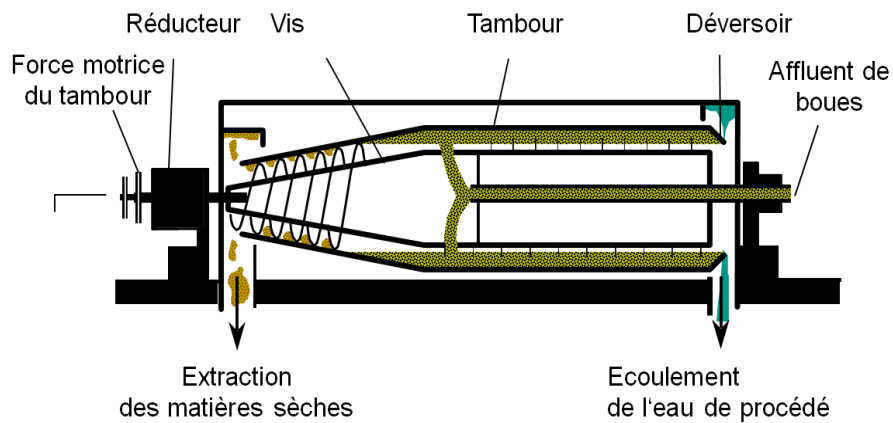


FIGURE 19 : SCHEMA DE CENTRIFUGEUSE

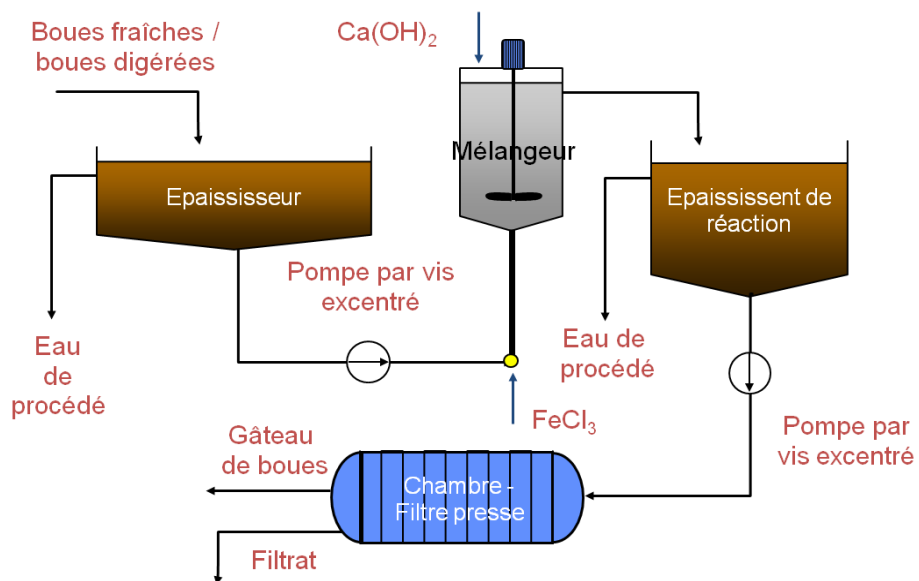


FIGURE 20 : SCHEMA ET FILIERES DE FILTRATION AVEC FILTRE-PRESSE A CHAMBRES

Le tableau suivant présente une comparaison des consommations spécifiques ainsi que les frais de consommation d'adjuvants de floculation en Allemagne.

TABEAU 5 : CONSOMMATION SPECIFIQUE ET FRAIS DE CONSOMMATION DES ADJUVANTS DE FLOCCULATION

Type d'agents	Quantité de dosage	Coûts [€/kg]
Agents de conditionnement organiques : polyélectrolytes (PE) cationiques polyélectrolytes (PE) polymères linéaires ou branchés, hydrosolubles, synthétiques	2 – 6 kg/t de résidu sec	5 – 10
Agents de conditionnement inorganiques : suspension d'hydroxyde de calcium [Ca(OH) ₂]	9 – 13 kg/m ³	0,1 – 0,125
Agents de conditionnement inorganiques : solution de sel de fer	2,5 – 10 kg/m ³	0,1 – 0,125

2.4 Avantages, inconvénients, contraintes

Le Tableau 6 présente la consommation spécifique d'adjuvants de floculation par rapport à la teneur en matière solide.

TABEAU 6 : CONSOMMATION D'ADJUVANTS DE FLOCCULATION POUR DIFFERENTS MODES DESHYDRATATION

Agréгат de déshydratation	Consommation d'adjuvants de floculation [kg/t MS]	
	produits poudreux (100 % de substance effective)	produits liquides (40 % de substance effective)
Centrifugeuse	2 – 5	4 – 10
Filtre-presse à chambres	1 – 4	3 – 8
Filtre-presse à bande	3 – 5	5 – 9

Le tableau 7 présente la consommation d'énergie pour les agrégats de déshydratation. La centrifugeuse consomme le plus d'énergie électrique.

TABEAU 7 : RENDEMENT DE DIFFERENTS MODES DE DESHYDRATATION ET CONSOMMATION D'ENERGIE

Agrégat de déshydratation	st. aérobie	st. anaérobie	Consommation d'énergie [kWh/t MS]
Centrifugeuse	20 - 25	25 – 32	30 – 56
Filtre-presse à chambres	< 28	jusqu'à 40	25 – 40
Filtre-presse à bande	< 22	jusqu'à 25	15 – 30

Le Tableau 8 présente les capacités de différentes machines de déshydratation. On obtient une plus siccité de la boue vidangée avec des filtres-presses à chambres.

TABEAU 8 : LES DIFFERENTS SEUILS DE SECHAGE EN FONCTION DE LA QUALITE DE BOUE

Capacité de différentes machines de déshydratation				
Qualité de boue	Centrifugeuse à PE ou Me ³⁺	Filtre-presse à bandes à PE ou Me ³⁺	Filtre-presse à chambres à PE ou Me ³⁺	
	MS [%]	MS [%]	MS [%]	
			Avec chaux	Sans chaux
Bonne déshydratabilité	> 30	> 30	> 40	> 45
Moyenne déshydratabilité	22 - 30	22 - 30	22 - 40	30 - 45
Mauvaise déshydratabilité	< 22	< 22	---	30 - 35

2.5 Recommandations pratiques

La déshydratation des boues par un filtre-presse à chambres est une procédure favorable au Maroc. Elle utilise moins d'électricité que les autres procédures. La presse peut être actionnée par du personnel non-spécialisé. Dans les zones rurales, constituées de petites villes et petits villages, il est recommandé d'acquérir un filtre-presse mobile qui peut être transporté entre les stations d'épurations par un camion.

3 Filières de traitement - Stabilisation

3.1 Introduction

On a souvent discuté si, en général, une stabilisation des boues serait nécessaire et quelle méthode de stabilisation serait à choisir. Concernant cette question, on a fait l'expérience que les nuisances olfactives observées lors de l'exploitation de stations d'épuration se dégagent presque toujours des boues non stabilisées qui ont été stockées provisoirement, volontairement ou involontairement. On ne peut alors renoncer à une stabilisation que dans le cas où la station d'épuration se trouve loin des habitations.



FIGURE 21 : DIGESTEURS (VOLUME 4 x 15 000 m³) DE LA STEP BOTTROP DE L'EMSCHERGENOSSENSCHAFT

En pratique, il existe deux méthodes de stabilisation: une stabilisation aérobie et une stabilisation anaérobie.

En général, la stabilisation aérobie présente l'inconvénient qu'elle consomme de l'énergie, tandis que, lors de la digestion anaérobie, on obtient de l'énergie. De plus, la stabilisation aérobie est d'une portée moins considérable que la stabilisation anaérobie. Outre l'empêchement d'odeurs et la production d'énergie, la stabilisation anaérobie, c.-à-d. la digestion des boues, présente aussi des avantages importants pour la déshydratation mécanique des boues. Il est nettement plus difficile de déshydrater les boues après une stabilisation aérobie.

En résumé, on peut constater que, pour les raisons mentionnées, la stabilisation anaérobie à une température de 37° C, avec un temps de séjour entre 20 et 30 jours et à une teneur en matières solides d'environ 5 % de MS est une technique très appropriée pour la stabilisation des boues dans les stations d'épuration.

Cette technique de stabilisation anaérobie est généralement pratiquée pour des installations de taille souvent supérieure à 50 000 EH.

La digestion présente les avantages suivants :

- la stabilisation de la boue et par conséquent l'évitement de nuisances olfactives
- la production de gaz de digestion qui peut être utilisé pour la production d'énergie
- l'amélioration de la déshydratabilité de la boue
- la réduction de la masse à éliminer (la gazéification des matières organiques dans la boue, c.-à-d. la transformation en CH_4 et CO_2 , réduit les quantités à éliminer par rapport à la masse sèche d'environ 30 %)

La méthode de stabilisation utilisée en général en Allemagne résulte de la Figure 22. Il devient clair que la stabilisation anaérobie (digestion) est préférée, comparée à la stabilisation aérobie. Lors des installations sans stabilisation, il s'agit d'un très petit nombre de grandes stations d'épuration qui ont leurs propres installations d'incinération. Pour cette raison, on pense qu'une stabilisation ne soit pas nécessaire. D'un autre côté, l'Emschergerossenschaft, qui n'a pas stabilisé les boues avant l'incinération jusqu'à environ 1990, a construit entre-temps des digesteurs à toutes ses stations d'épuration, à cause des nuisances olfactives insupportables.

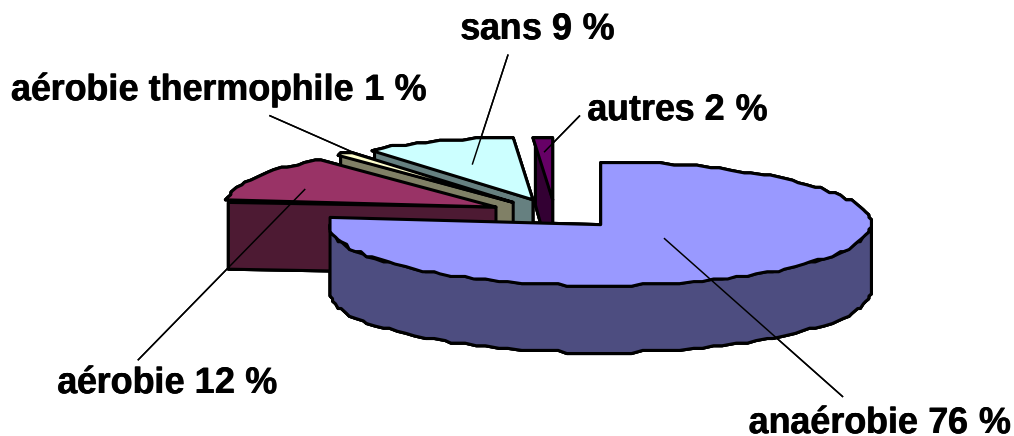
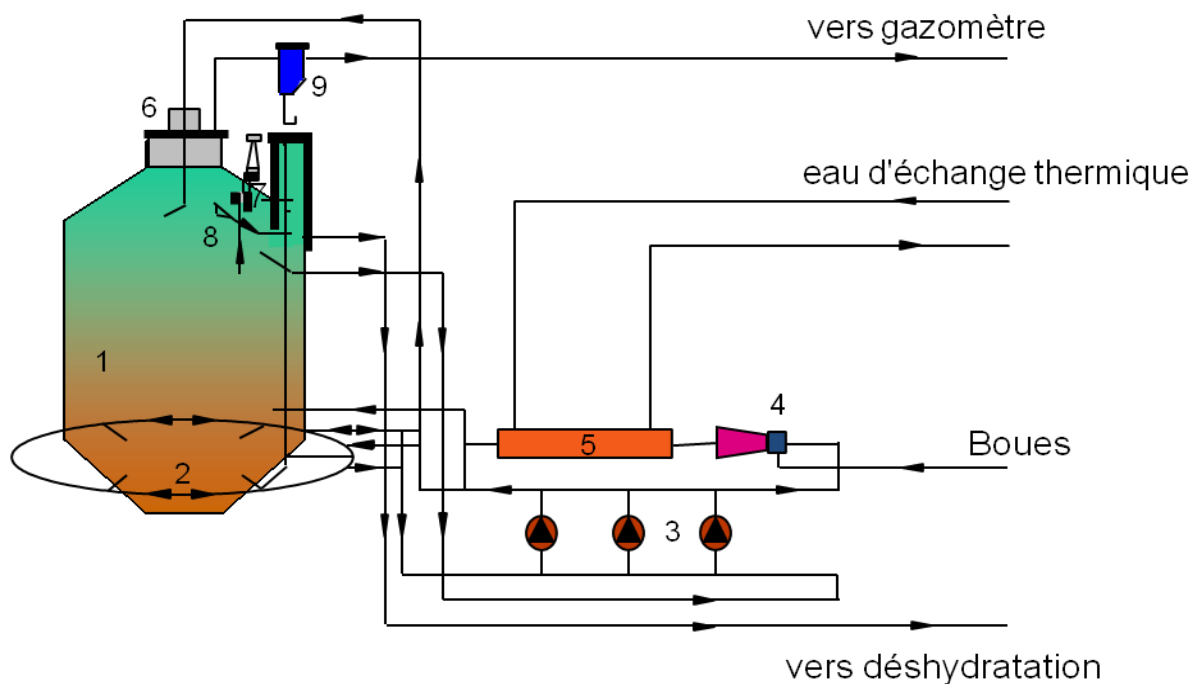


FIGURE 22 : LA STABILISATION DES BOUES EN ALLEMAGNE (BASE : EH)

Les procédés décrits (stabilisation aérobie avec épaissement final ou préépaississement suivi par digestion des boues) sont appliqués dans presque toutes les installations allemandes. Cette technique s'est imposée généralement.

3.2 Principe, Conditions d'application

La figure 23 présente la construction d'un réacteur pour la stabilisation anaérobie.

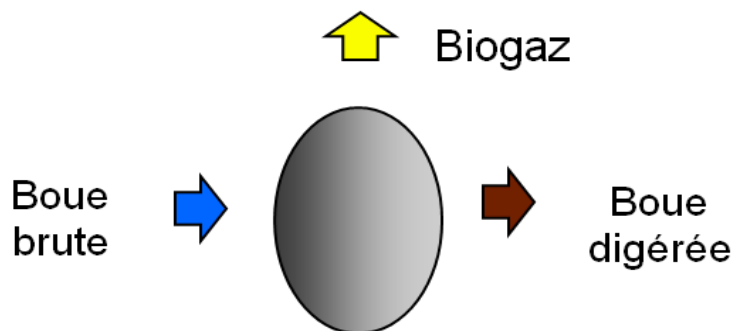


- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. Réacteur | 6. Poche de gaz avec bras de brassage |
| 2. Système rotatif de circulation | 7. Régulateur de niveau |
| 3. Pompe de circulation de boues et de boues d'échange thermique | 8. Extraction des boues flottantes |
| 4. Injecteur spécial de mélange de boues | 9. Brise mousse |
| 5. Echangeur de chaleur de boues à grand rendement | |

FIGURE 23 : CONSTRUCTION D'UN REACTEUR POUR STABILISATION ANAEROBIE

Le biogaz qui se produit lors de la stabilisation anaérobie peut être utilisé à des fins de chauffage, réutilisé sur la STEP elle-même. Le surplus est exploité par la production d'électricité.

La figure 24 illustre la production du biogaz lors de la stabilisation anaérobie.



Composition du biogaz :	méthane :	65 - 70 %
	gaz carbonique :	30 - 35 %
Gain spécifique de biogaz :	$G_E = 480 \text{ l/kg oMS}_{\text{ajouté}}$	
Puissance calorifique :	23.000 kJ/m ³	

FIGURE 24 : PRODUCTION DU BIOGAZ LORS DE LA STABILISATION ANAEROBIE

La figure 25 montre la production du biogaz en fonction du temps de réaction et de la température.

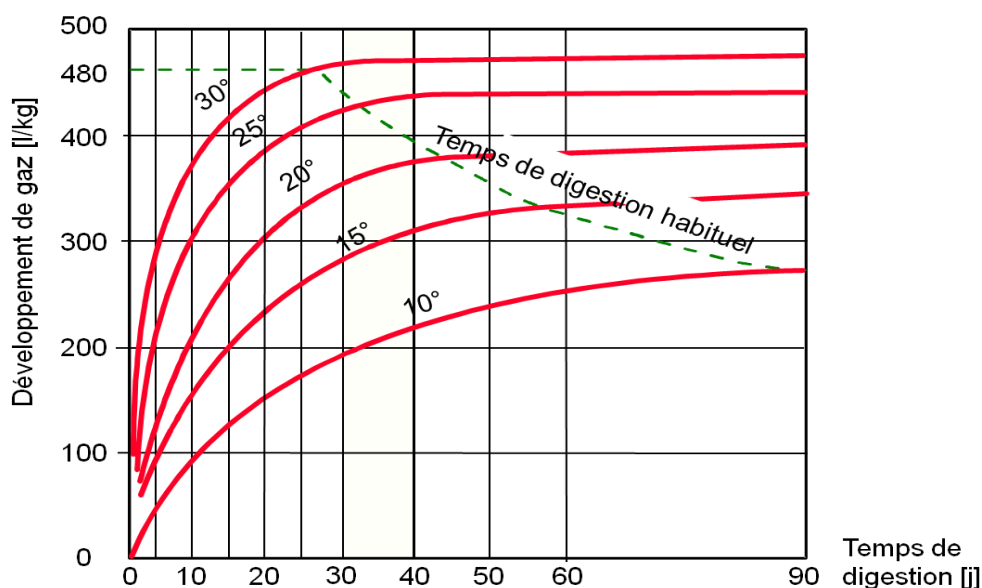


FIGURE 25 : DEVELOPPEMENT DE GAZ EN FONCTION DE TEMPS DE DIGESTION

Le tableau 9 montre des différences entre une stabilisation thermophile et mésophile.

TABEAU 9 : LES DIFFERENTS SEUILS DE SECHAGE EN FONCTION DU PROCEDE

Procédé	Avantages	Désavantages
Procédé thermophile	- métabolisme rapide - court temps de rétention - métabolisme complet - production élevée de gaz - désinfection effective	- concentration CO₂ plus forte - concentration CH₄ plus faible - Besoin énergétique supérieur
Procédé mésophile	- procédure plus simple - besoin énergétique pour l'échauffement moindre - meilleure stabilité de procédé	- volume de réacteur plus importante que pour proc. Thermophile - désinfection moins sûre que pour proc. thermophile

3.3 Avantages, inconvénients, contraintes

Le tableau 10 montre les avantages et inconvénients d'une stabilisation aérobie et d'une stabilisation anaérobie.

TABLEAU 10 : LES DIFFERENTS SEUILS DE SECHAGE EN FONCTION DE LA DESTINATION FINALE DES BOUES²³

	Stabilisation aérobie	Stabilisation anaérobie
Champs d'application	< 20.000 – 30.000 Equivalents d'habitants	> 20.000 - 30.000 Equivalents d'habitants
Avantages	Olfaction faible Processus rapide Fort rendement énergétique	Faible production de boues Faible besoin d'énergie Production de biogaz
Inconvénients	Forte consommation énergétique Forte production de boues Besoin en oxygène	Processus lent Grand volume de

Le tableau 11 montre les différences entre la stabilisation aérobie et la stabilisation anaérobie.

TABLEAU 11 : LES DIFFERENTS SEUILS DE SECHAGE EN FONCTION DU PROCESSUS

Processus	Aérobie et anaérobie	Anaérobie		Aérobie, liquide
Paramètre	Perte au feu [% de MS]	Teneur en acide acétique [mg/l]	Teneur en acides gras [mg/kg]	Rapport DBO/DCO
Non stabilisé	60 - 90	1.800 – 3.600	> 1.000	> 0,25
Stab. partiel	≤ 60	1.000 – 2.500	-	0,25 – 0,18
Stab. sous condition	45 – 55	100 – 1.000	300 – 1.000	0,18 – 0,15
Stab. complète	≤ 45	< 100	< 300	< 0,15

3.4 Recommandations pratiques

Pour toutes les filières de gestion des boues, on recommande de stabiliser les boues. La qualité hygiénique des boues est ainsi améliorée. Des boues stabilisées sont plus faciles à déshydrater.

Dans les petites STEPs (< 30.000 EH) une stabilisation aérobie est plus favorable qu'une stabilisation anaérobie. Pour les STEP plus grandes, une stabilisation anaérobie est recommandée.

²³ Source : Traiter et valoriser les boues. Collection. Ouvrage collectif OTV. Paris 86240 Ligugé OTV 1997.

4 Filières de traitement – Conditionnement - Stabilisation chimique des boues à la chaux

4.1 Introduction

Une seconde solution pouvant être efficace pour éviter les nuisances liées aux boues non stabilisées consiste en l'adoption d'une stabilisation chimique à la chaux des boues épaissies. Ce traitement permet, selon FNDAE (1990), à la fois d'éviter le problème des odeurs et de désinfecter les boues. Pour cela, la boue épaissie doit être intimement mélangée à un lait de chaux.

4.2 Principe, conditions d'application

La figure 26 montre le principe adopté dans cette stabilisation chimique.

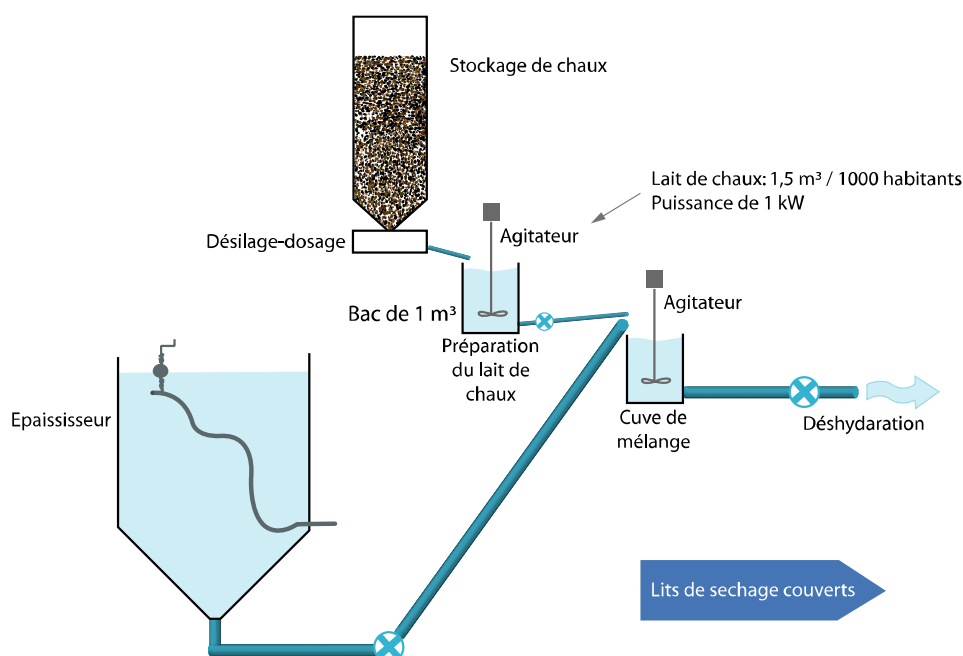


FIGURE 26 : SCHEMA DE PRINCIPE DU MODE DE STABILISATION CHIMIQUE DES BOUES (FNDAE, 1990)

Cette technique est peu consommatrice d'espace et permet une valorisation des boues. Toutefois, elle nécessite des mesures de sécurité en manipulant la chaux.

La stabilisation chimique des boues enrichies de chaux se fait sur le terrain de la station d'épuration et n'a pas d'influence sur l'environnement proche. Le fonctionnement de l'installation est une tâche revenant à l'opérateur de la STEP.

4.3 Recommandations pratiques

Cette procédure n'est appropriée que pour de petites STEP. Dans les grandes STEP par contre, elle peut constituer une étape de préparation à la déshydratation des boues.

5 Filières de traitement - Séchage solaire sur lits de séchage (séchage naturel)

5.1 Principe et schéma

Le séchage sur lits de séchage est une procédure simple utilisant l'énergie solaire thermique. La boue est conduite dans des bassins ouverts où elle est stockée un certains temps. Une partie de l'eau s'évapore grâce à l'énergie solaire ou suinte par le drainage et est alors évacuée.



FIGURE 27 : PHOTO DE LITS DE SECHAGE

La procédure est souvent appliquée dans la plupart des pays. Les mesures des bassins sont représentées dans la figure 28.

Selon EPA²⁴ la superficie requise en fonction du volume annuel de boue est rapportée dans la figure 29.

²⁴ Source : Estimating Sludge Management Costs. Handbook EPA/625/6-85/010 - EPA, 1985.

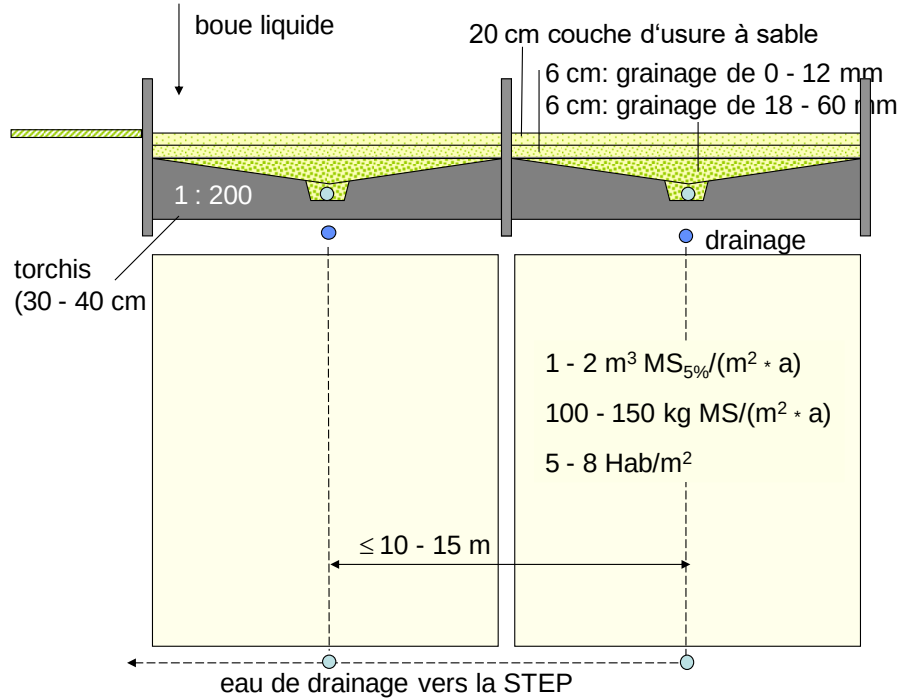


FIGURE 28 : DIMENSIONS DE LIT DE SECHAGE

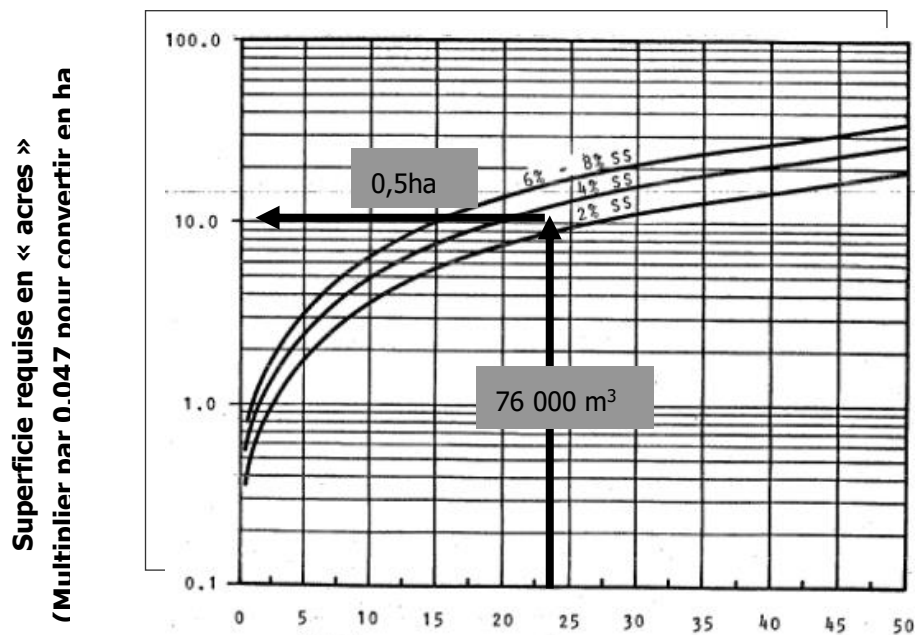


FIGURE 29 : SUPERFICIE REQUISE POUR LE SECHAGE NATUREL EN FONCTION DU VOLUME ANNUEL EN MILLIONS DE GALLONS (MULTIPLIER PAR 3785 POUR CONVERTIR EN M³)

Le séchage naturel des boues dans des lits de séchage est généralement associé aux actions suivantes : réduction de la teneur en eau, suppression de pathogènes et suppression des œufs d'Ascaris.

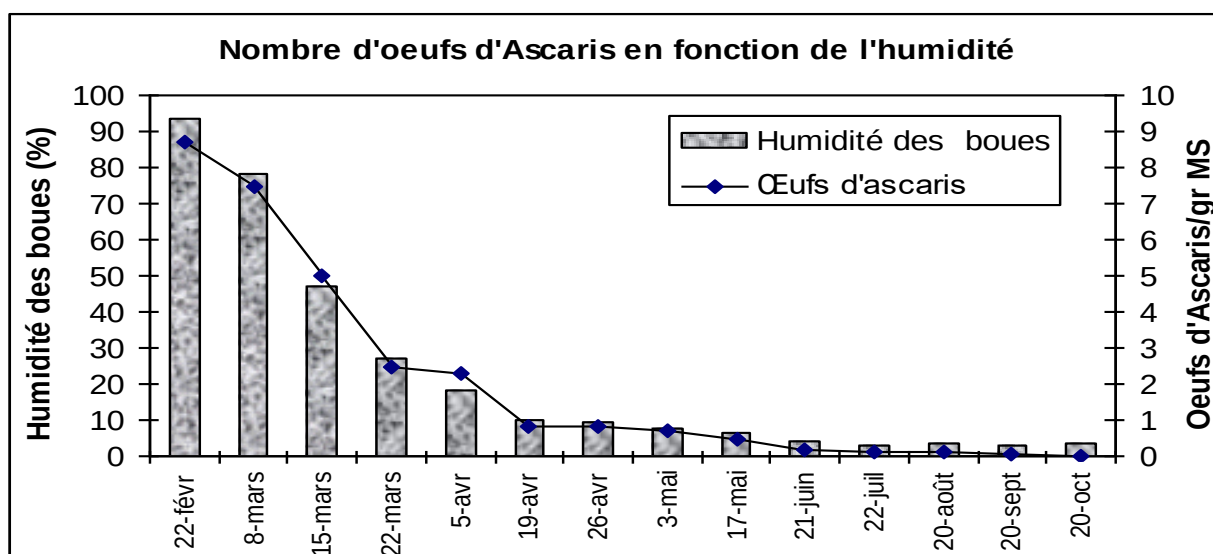


FIGURE 30 : HUMIDITE DES BOUES ET OEUF D'ASCARIS/ GR MS EN FONCTION DU TEMPS DU STOCKAGE

5.2 Contraintes

Ces pratiques de séchage ont montré toutefois d'autres inconvénients :

- Temps de séchage relativement long (dépassant un mois) ;
- Risque de mauvaises odeurs ;
- Risque de pollution des eaux souterraines lorsque les surfaces ne sont pas suffisamment imperméabilisées ;
- L'hygiène des opérateurs qui manipulent les boues n'est pas garantie ;
- Lieu de reproduction des germes et des insectes ;
- Difficultés de vidange et de remise en état des lits ;
- Nécessité d'une grande surface (emplacement au sol d'environ 1 m² pour 4 à 5 habitants raccordés).

5.3 Recommandations pratiques

La procédure est appropriée pour de petites STEPs, s'il y a suffisamment de surfaces disponibles.

6 Filières de valorisation – Séchage des boues avec lits plantés de roseaux

6.1 Principe et schéma

Il s'agit d'une technique en développement et consiste en des lits de séchage plantés. Ce type de procédé permet d'amplifier l'élimination de l'eau. En effet, en plus de la percolation par gravité et l'évaporation directe, il y a évapotranspiration par les plantes. Plusieurs types de végétaux peuvent être utilisés dont les plus importantes sont les roseaux (*Genus Phragmites*, *Phragmites australis*) d'où l'appellation *Phragmicompostage* et certaines graminées. Les lits à roseaux sont généralement privilégiés car ils requièrent moins de travail.

La station d'épuration du SIA du Pays d'Albon a une capacité de traitement de 13 000 Equivalents. Habitants et est de type boues activées. Elle reçoit les effluents domestiques et industriels provenant de quatre communes dont Albon.



FIGURE 31 : PHOTO DE STATION PHRAGMICOMPOSTAGE D'ALBON

Les boues sont extraites depuis le bassin d'aération et déshydratées sur **8 lits de type Phragmicompostage®** (lits de séchage plantés de roseaux) **totalisant 3750 m²**. Elles prennent alors une consistance solide (siccité supérieure à 30 %) et favorisent l'utilisation d'une filière de valorisation.

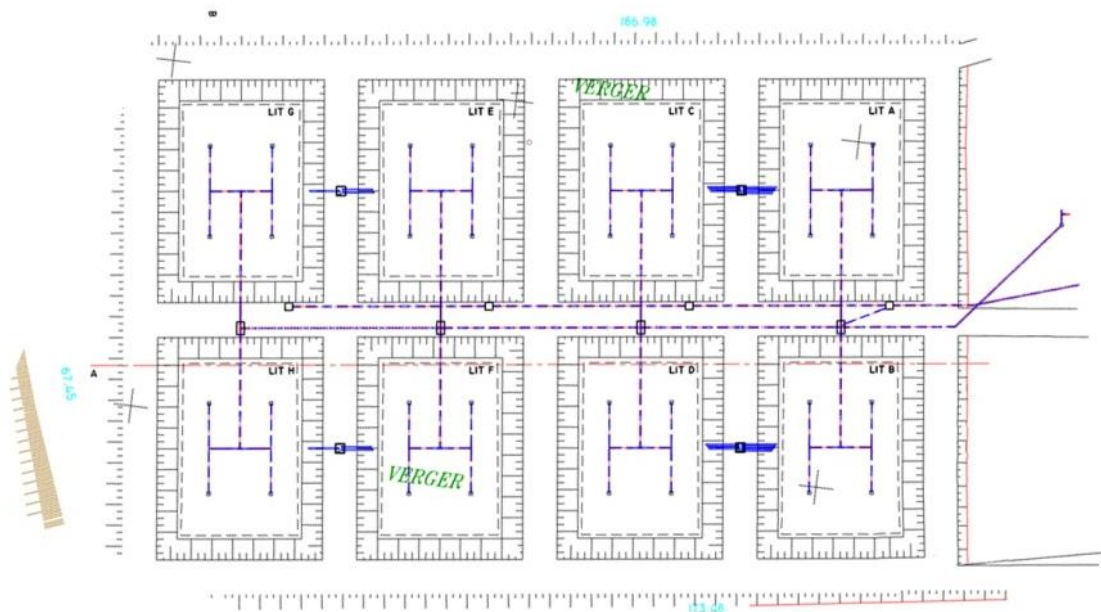


FIGURE 32 : SCHEMA DES LITS PLANTES DE ROSEAUX

Cette technique naturelle est une alternative au traitement des boues et constitue une première en France pour une STEP à l'échelle de 13 000 EH.

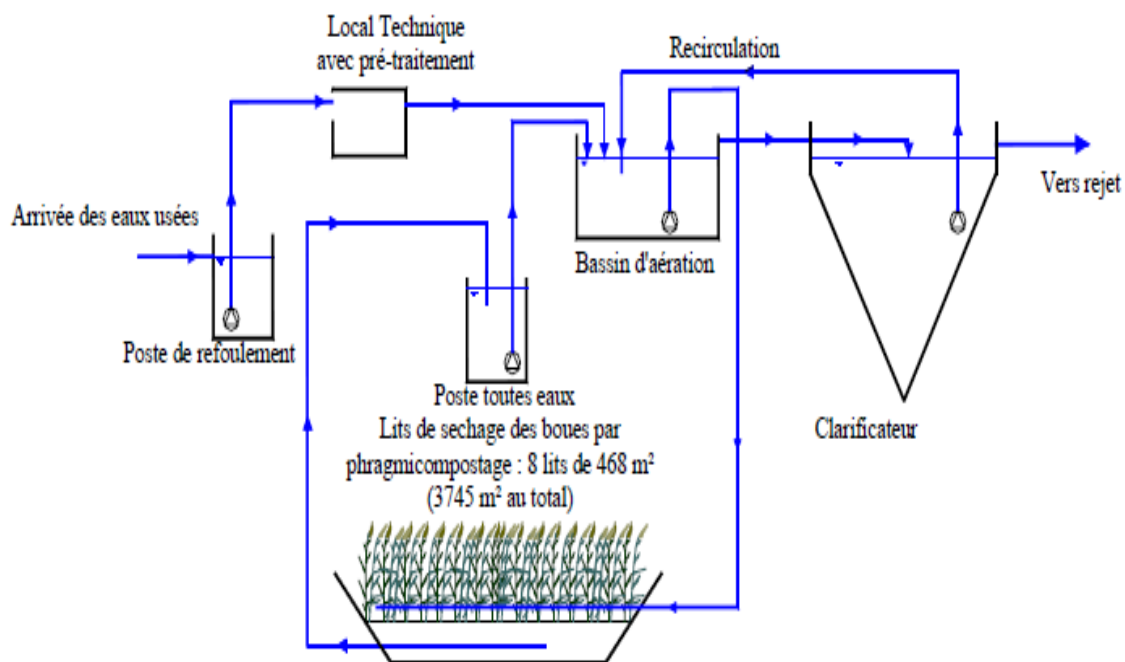


FIGURE 33 : SCHEMA DE PRINCIPE

6.2 Avantages

Le système racinaire (en rhizomes) très enchevêtré modifie les caractéristiques des boues. Il en résulte, une amélioration de la déshydratation, du drainage et des caractéristiques des boues notamment leur structure et leur porosité. Les principaux avantages de cette technologie sont les suivants :

- Une déshydratation efficace des boues
- Une solution à long terme (la durée de vie de l'installation est supérieure à 30 ans) avec des coûts d'exploitation très faibles
- Une amélioration de l'efficacité du fonctionnement de la station d'épuration en assouplissant la fréquence de soutirage des boues en excès.
- Une absence d'odeurs,
- Non utilisation des réactifs chimiques, donc de ne pas avoir de résidus chimiques dans les boues traitées
- Une fiabilité de fonctionnement même en hiver,
- La possibilité de créer un amendement de valeur fertilisante minérale et organique pour l'agriculture
- Gestion simple du sous-produit encombrant de l'épuration

Les résultats d'analyses, effectuées en Allemagne par IPP Consult-GTZ (2002) sur le produit résultant de la conversion biologique des boues par la méthode des lits plantés en graminées et/ou en roseaux, ont permis de constater :

- une décroissance considérable des Coliformes Fécaux, des Œufs de parasites et de Salmonelles après une période de conversion de deux mois et un temps de séjour de deux semaines. Les salmonelles ne sont plus trouvées dans le produit final. Les lits de séchage classiques requièrent plus de 4 mois pour la suppression des pathogènes et cela reste tributaire des conditions climatiques.

Comparée aux lits de séchage à sable, cette technique présente les avantages suivants :

- Faible investissement d'autant plus que les anciens lits de séchage à sable peuvent aussi être convertis en lits à roseaux ;
- Econome en main d'œuvre et frais de maintenance
- Esthétique du voisinage des STEP

Une filière de traitement des boues qui permet:

- un soutirage à tout moment, en fonction de la filière eau ;
- un stockage sur site, sans transport ;
- un traitement et un séchage à peu de frais, sans réactifs chimique, avec des percolats peu chargés et non septiques.

La plantation de roseaux et l'alternance dans l'alimentation pour:

- une perméabilité des boues pour un bon ressuyage (50% des pertes d'eau) ;
- puiser l'eau en profondeur grâce aux racines et à l'évapotranspiration (50% des pertes d'eau) ;
- bien oxygéner le milieu afin de stabiliser et minéraliser au mieux les boues, sans odeur.

Le curage du terreau produit, une opération:

- à faire une fois tous les 10 ans environ par lit, la 1ère fois n'intervenant qu'après 8 ans ;
- Simple, réalisable à la pelle mécanique.

Cette filière de traitement permet d'obtenir un produit final sec (30% de siccité), bien minéralisé,

- Sous la forme d'un terreau valorisable en agriculture*, en aménagement paysager.
- sous réserve de conformité selon la réglementation en vigueur

Devenir de la boue

Le produit converti obtenu lors des essais de démonstration conduits en Egypte par IPP - GTZ (2002) présente une structure granulaire rappelant celle d'un sol bien structuré et aéré (Photo ci-dessous). L'activité biologique mise en œuvre par des micro-organismes et les macro-organismes permet une humification de la matière organique fraîche des boues. Il s'agit donc d'un excellent produit d'amendement des sols.



FIGURE 34: BOUE DECOMPOSEE (PHOTO EMPRUNTEE DU RAPPORT DE SYNTHESE DE GTZ – IPP CONSULT (2002))

Eléments utiles pour la mise en place du système de lits à roseaux (USACERL, 1996)

Les lits sont construits de la même manière que les lits de séchage à sable. Les tranchées sont imperméabilisées et remplies de graviers et une couche de sable au dessus selon la succession suivante :

- Les Roseaux sont plantés dans la couche de sable et les tranchées sont submergées d'eau pour permettre la croissance des roseaux.
- Un mètre de côte au dessus du sable est maintenu pour permettre le stockage des boues.
- La hauteur utile de bassins permet l'accumulation de boues de 1.50 à 2 m de boues.



FIGURE 35: PHOTO PLANTATION DES ROSEAUX

Exploitation

Une personne suffit pour quelques heures par semaine (selon la capacité du système)

La surface est divisée en sections ou bassins (d'environ 1000 m²) qui sont remplis par les boues brutes pompées de manière séquentielle (deux semaines d'intervalle)

Une fois la plantation bien établie, des boues épaissies et stabilisées (3 à 5 % de matières solides) sont appliquées en couches de 10 cm à des intervalles de temps. Les lits reçoivent un apport de 20 à 25 cm de boues à un rythme défini qui permet une déshydratation très importante jusqu'à 30% de matière sèche ainsi qu'une très forte minéralisation.



FIGURE 36: PHOTO LITS IMPERMEABILISES AVEC UN SYSTEME D'ARROSAGE ET DE DRAINAGE



FIGURE 37: PHOTO LITS IMPERMEABILISES AVEC UN SYSTEME D'ARROSAGE ET DE DRAINAGE

Après une dizaine d'année, on laisse le sous – produit mûrir environ 6 mois avant de le réutiliser comme un compost pour l'amendement organique des sols.

La siccité peut atteindre 60% à 80% six mois après l'arrêt de l'alimentation selon les conditions climatiques.

On prévoit une récolte annuelle des roseaux.

La charge appliquée varie selon que la boue est aérobiquement digérée (BAED) ou anaérobiquement digérée (BAND) dans les gammes de valeurs suivantes :

- BAED: 9 to 95 kg/m²/an; selon EPA une moyenne de 81 kg/m²/an est acceptable, selon USACERL, une valeur de 52 est recommandée
- BAND: 9 to 57 kg/m²/an avec une moyenne de 22 kg/m²/an (USACERL).

Technique réutilisant les eaux usées épurées (installation on-site) ou les lixiviats des décharges (installation off-site)

Pour maintenir un environnement aquatique favorable à la croissance et au développement de la végétation, une partie des eaux usées épurées de la STEP peuvent être recyclées dans ce dispositif. Aussi, si une décharge se trouve à proximité, les lixiviats peuvent aussi y être recyclés.

Conditions optimales d'application

STEP produisant entre 5 000 et 15 000 tonnes de boues épaissies et stabilisées à 5 – 7 % de matière sèche.

6.3 Contraintes

Cette technologie exige une disponibilité de terrain et suffisamment d'eau pour maintenir la saturation du système.

Superficie requise : 1 hectare pour traiter 200 tonnes de boues brutes épaissies et stabilisées (à 5-7% de matière sèche).

6.4 *Ordre de grandeur de coût*

Fourchette de coût d'investissement (équipement + installation): 100 à 140 Euro/ tonne de MS.

Coût moyen d'amortissement et de maintenance : 30 Euros/tonne de boues à 7 %.

6.5 *Recommandations pratiques*

La procédure est appropriée pour des STEPs de taille moyenne, s'il y a suffisamment de surfaces disponibles.

7 Filières de traitement - Séchage des boues avec l'énergie solaire

7.1 Introduction

Le séchage solaire des boues en conditions contrôlées est une technique développée en tant qu'alternative aux autres méthodes de séchage thermiques très coûteuses à cause de leur forte consommation d'énergie et de leur faible rendement calorifique. Cette nouvelle technologie de séchage solaire sous serre connaît actuellement un essor important en Autriche, en Allemagne et dans d'autres pays comme la France, l'Italie et les USA.

La présente fiche technique constitue un condensé de présentation de cette technologie inspirée en grande partie de la présentation commerciale de Thermo – System (1) et d'autres références de travaux de recherche sur ce type de technologie.

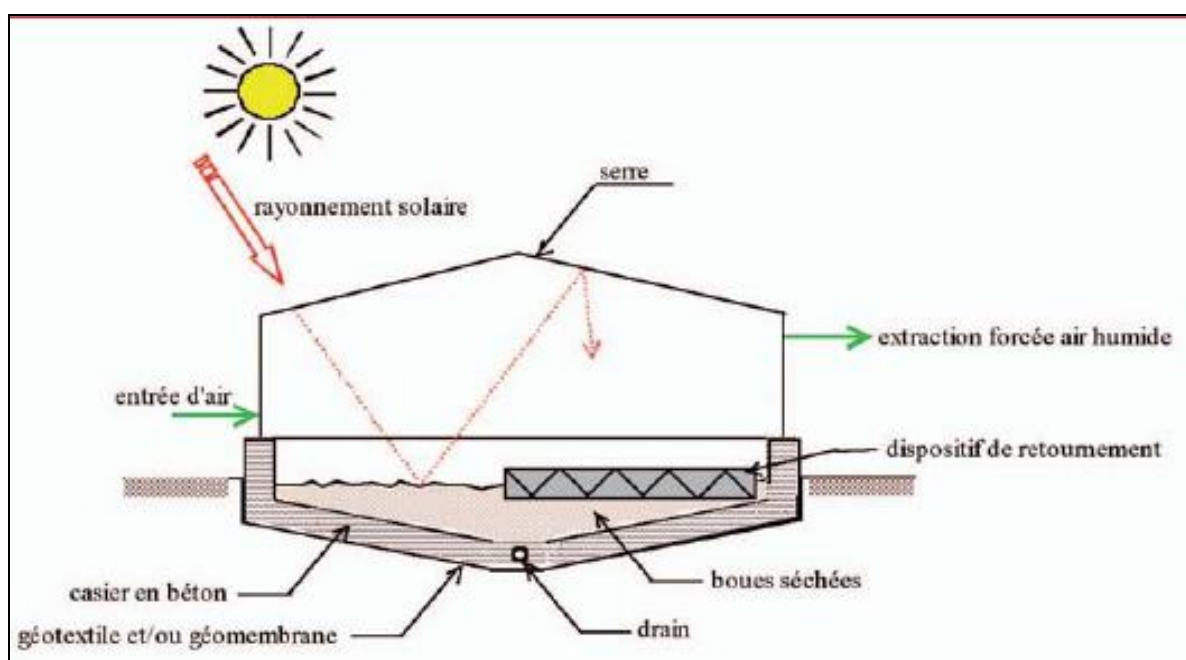


FIGURE 38 : SCHEMA SECHAGE SOLAIRE

Cette technologie est à la fois simple et robotisée. La serre est étanche et la circulation de l'air est maîtrisée. Les paramètres conditionnant l'efficacité du séchage sont contrôlés : la température et l'humidité de l'air, la vitesse du flux de l'air au-dessus des boues, la structure de surface des boues et la température des boues.

Après séchage, les boues sont sans odeur, biologiquement stabilisées et de siccité moyenne de 50 à 90 %. Le prétraitement préalable des boues consiste seulement en épaississement qui peut être avec ou sans agent flocculant. D'après Horn et al. (2004), l'avantage du procédé de Thermo-System par rapport à d'autres procédés basés sur l'énergie solaire consiste à pouvoir traiter des boues de siccité de 2 ou 3 %.



FIGURE 39 : ASSEMBLAGE DE PHOTOS DES STEP ADOPTANT LA TECHNOLOGIE DE SECHAGE SOLAIRE SELON LE PROCEDE THERMO-SYSTEM (PHOTOS DU FABRICANT)

7.2 Principe

Remplissage des boues dans les serres

Les serres sont remplies à l'aide de containers, véhicules de chargement ou chargeurs sur roues (Figure 40 et 41). Le remplissage peut être automatique à l'aide de pompes à boues ou des bandes de transport. L'étalement des boues sur la surface est assuré automatiquement par un engin appelé par les fabricants « sanglier électrique ». Cet engin a une hauteur d'environ 1.5 mètres (Figure 42).



FIGURE 40 : REMPLISSAGE DES BOUES, AVEC DES POMPES (D'APRES LE FABRICANT (1))



FIGURE 41 : REMPLISSAGE DES BOUES, AVEC LE CAMION (D'APRES LE FABRICANT (1))

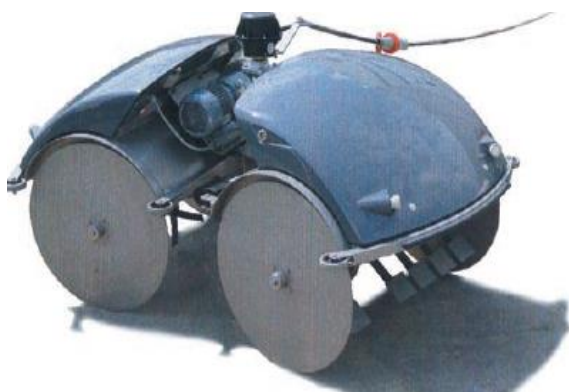


FIGURE 42 : ENGIN D'ETALAGE ET DE TRAVAIL SUPERFICIEL DES BOUES (SANGIER ELECTRIQUE) (D'APRES LE FABRICANT (1))

Processus de séchage

Le séchage se déroule de façon entièrement automatique et sans aucune intervention de l'exploitant, jusqu'au moment où le degré de siccité souhaité est atteint.

Vidange des boues séchées

La vidange de la ligne de séchage est assurée par un chargeur sur roues ou un déchargeur à godets. Le temps requis est faible compte tenu de la réduction importante de la masse des boues.

Couverture

La couverture est de différentes natures selon le fabricant. Le matériau le moins cher peut être adopté là où les risques de grêles et de neige sont quasi-nuls.

Besoin de surface

La surface dépend du climat, de la siccité finale et des caractéristiques des boues. Bien qu'il n'y ait pas d'expérience d'opération au Maroc il est probable que le séchage soit assuré en grande partie par l'énergie solaire. Toutefois, l'aération et la ventilation sont nécessaires.

Selon le fabricant Thermo-System, le ratio de la quantité annuelle de boue approximative par m² de surface pour les pays d'Europe centrale avec réutilisation de la chaleur perdue et aération mécanisée est estimé comme suit :

- Boue liquide de siccité de 5 % MS pour séchage à 45 % MS : 2,25 m³/(m².an)
- Boue déshydratée de siccité de 20 % pour séchage à 45 % MS : 3,20 m³/(m².an)

Ces quantités peuvent être nettement majorées dans les conditions climatiques du Maroc, ce qui est à vérifier par une unité pilote.

Période de séchage

La période de séchage dépend fortement des conditions climatiques, du type de boues et de la siccité initiale. Cette période peut être estimée entre 7 (en été) et 25 jours (en hiver) pour l'augmentation de la siccité de 20 à 45 %.

Terrain de séchage

Le sol des lits sous serre se compose d'une couverture de béton ou de l'asphalte, parce qu'on a besoin d'une surface lisse pour l'engin d'épandage et pour l'enlèvement des boues par tractopelle.

Consommation d'électricité

Selon le fabricant, la consommation énergétique moyenne est la suivante :

- Lignes de séchage pour boues liquides: 10 - 20 kWh/tonne d'eau drainée

- Lignes de séchage pour boues déshydratées : 20 - 30 kWh/tonne d'eau drainée

Encore une fois, la consommation d'énergie peut être nettement inférieure dans les conditions marocaines avec taux de mécanisation réduit.

Réduction de masse

Toujours selon le fabricant, la réduction de masse est la suivante :

- Lignes de séchage pour boues liquides: 90 - 97 %
- Lignes de séchage pour boues déshydratées: 50 - 70 %

TABLEAU 12 : PERFORMANCES DE SECHAGE DES BOUES AVEC L'ENERGIE SOLAIRE

Numéro de l'expérimentation (différentes saisons)	Boue Type	MS initiale	Matière sèche finale	Taux d'évaporation	Réduction des solides volatiles	CF	Consommation d'énergie
		Siccité	Siccité	kg/m ² .day	%	× 10 ⁶ cfu/g	kWh/t d'au évaporée
1	AP	15	82	6.9	4.1	0.6	32
2	DA	19	91	4.4	4.3	0.6	-
3	AP	12	88	2.9	3.6	0.2	44
4	DA	24	83	4.2	2.2	-	29
5	DA	20	70	5.0	7.1	0.023	-
6	DA	24	90	5.6	6.9	-	35

DA : Digestion anaérobique, AP : Aération prolongée

L'encadré suivant relate quelques résultats de test de ce type de technologie :

Résultats de test de la technologie Thermo-System dans la STEP de Brisbane Water's Wacol (Horn et al. 2004)

Les résultats confirment que cette technologie de séchage solaire est capable d'augmenter la siccité à plus de 95%. La période de séchage dépend fortement des conditions climatiques, du type de boues et de la siccité initiale. Cette période a été estimée entre 15 et 25 jours pour l'augmentation de la siccité de 20 à 75%. La consommation moyenne d'électricité est de 29 à 44 kWh/tonne d'eau extraite comparée à la fourchette de consommation de 70 à 110 kWh requise par les procédés conventionnels de séchage.

L'étude a recommandé une déshydratation mécanique préalable pour avoir une siccité d'environ 20% avant le séchage solaire.

Les nuisances dues aux odeurs existent mais pendant uniquement quelques jours à proximité des ventilateurs d'extraction. Toutefois, un bon retournement et donc une bonne aération des boues par le sanglier électrique permettent d'atténuer significativement le problème. En effet, la rapidité de séchage associée à une décomposition aérobie des boues atténue ces nuisances. Les pannes du sanglier électrique sont à maîtriser.

Pour les pathogènes, le système n'a pas permis d'atteindre les normes. Pour cela, il a été mentionné qu'en Allemagne, la classe A est atteinte (qualité biologique). Toutefois, une adition de chaux (0.1 à 0.2 kg/kg de matière sèche) à la fin du séchage est recommandé.

Une étude économique a été menée en comparant deux options : Option 1. Séchage solaire des boues de 12% à 75% et élimination en décharge des boues séchées et Option 2 : élimination des boues à 12% de siccité. Les résultats de cette étude de rentabilité montrent que dans cette situation précise, la technologie Thermo-system n'est rentable que lorsque le coût unitaire de la technologie existante dépasse 65 \$/tonne (soit près de 650 dhs/tonnes). Une déshydratation mécanique préalable des boues augmente les performances et la rentabilité économique de la technologie Thermo - System. Ces différents propos sont étayés par les illustrations suivantes

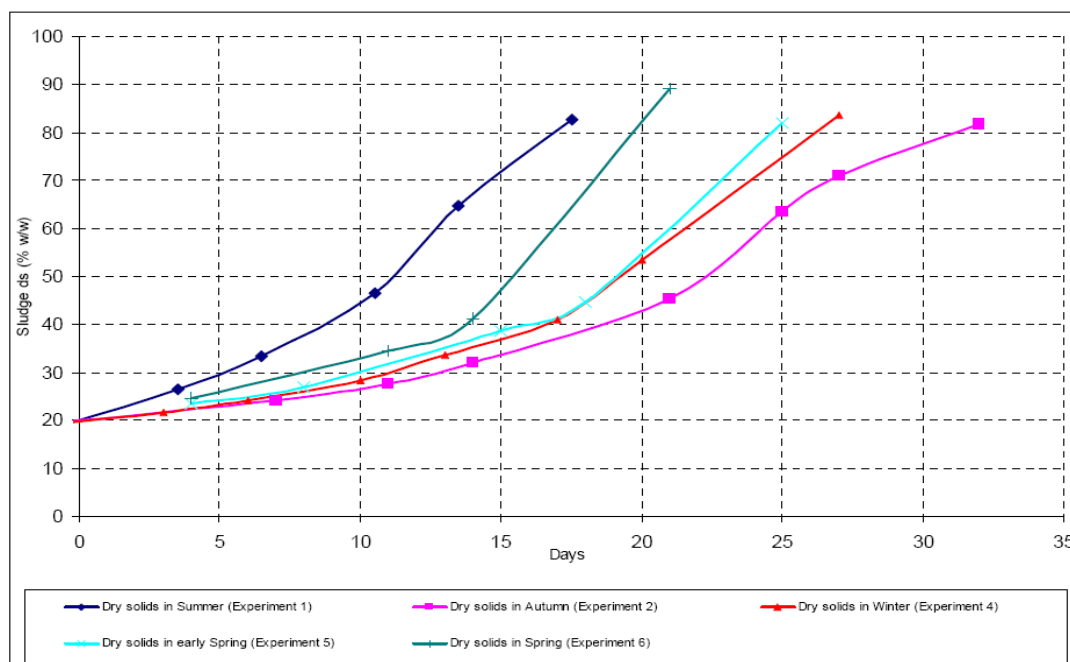


FIGURE 43 : EVOLUTION DE LA TENEUR EN MATIERE SECHE DES BOUES EN FONCTION DES SAISONS

Comme le montre cette figure, ces performances seraient très améliorées en conditions climatiques marocaines.

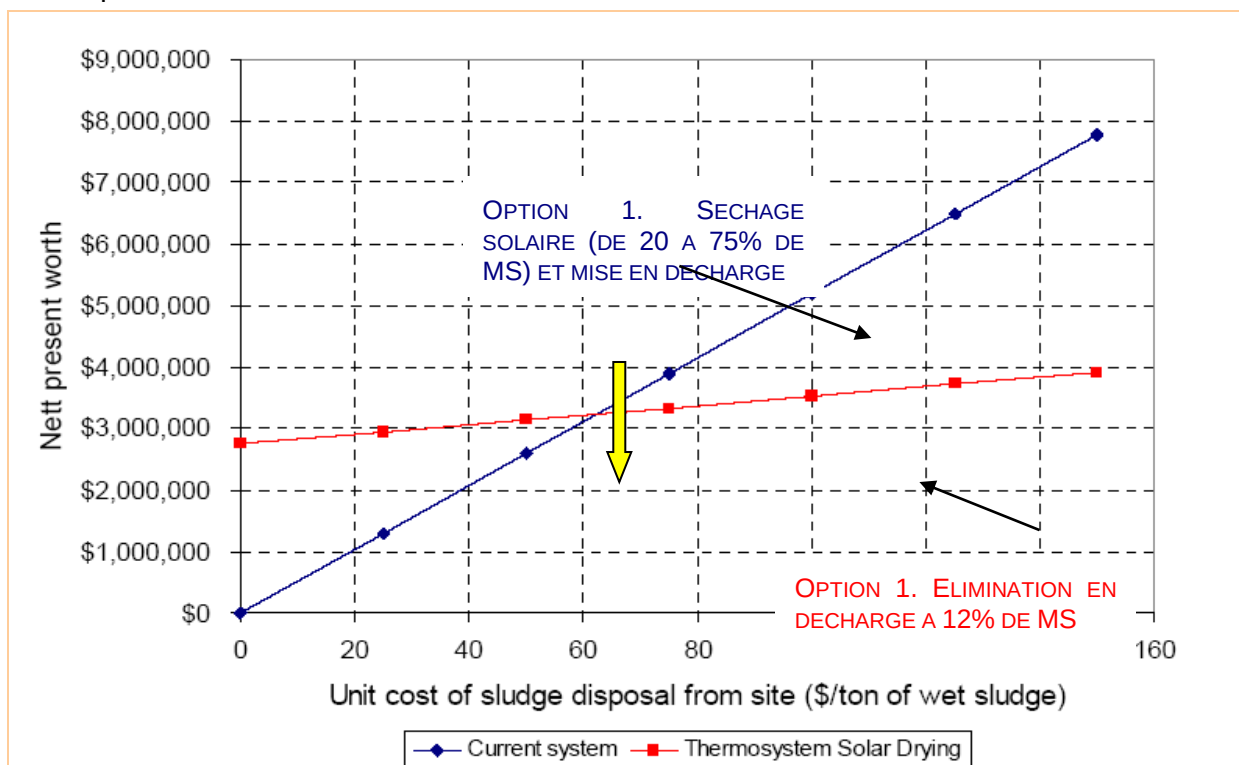


FIGURE 44 : RENTABILITE ECONOMIQUE DU SYSTEME

7.3 Déductions pour le cas du Maroc

Il ressort de ce qui précède que cette technologie peut être efficace pour les conditions de Maroc dans les zones de forte sensibilité du voisinage. Considérant les conditions climatiques très favorables au séchage solaire, tous les paramètres de performance devraient être améliorés par rapport aux valeurs citées auparavant.

Des options complémentaires peuvent être ajoutées :

- Chaulage à la fin du processus de séchage pour la suppression totale des pathogènes ; et
- Traitement des odeurs par aspiration de l'air de ventilation (de très courte période) pendant les 10 premiers jours de séchage. A propos des odeurs, le fabricant rapporte intégralement « Les émissions olfactives des lignes de séchage Thermo-System se situent en dessous du niveau existant chez les différentes stations d'épuration. C'est la raison pour laquelle, en règle générale, un traitement de l'air d'échappement n'est pas requis. Si jamais ce traitement s'avérait nécessaire, le post - équipement d'un système de traitement est possible à tout moment »

Pour ce qui est la siccité initiale des boues à mettre en séchage solaire, l'étude mentionnée plus haut recommande une déshydratation mécanique préalable jusqu'à une siccité d'environ 20 %. Cela sous entend que le système de déshydratation mécanique par filtre à bandes adopté actuellement peut être maintenu.

Toutefois, dans un but de comparaison de la rentabilité économique et des performances (siccité, rapidité de séchage, surface requise, odeurs) etc., on peut tester les options suivantes :

- Séchage solaire immédiatement après épaissement avec addition d'un flocculant au niveau des points d'alimentation pendant toute l'année (avec ou sans traitement des odeurs comme sous - options)
- Séchage solaire après épaissement avec addition d'un flocculant uniquement pendant l'hiver (avec ou sans traitement des odeurs comme sous - options)
- Séchage solaire après déshydratation mécanique par filtres à bandes (avec ou sans traitement des odeurs comme sous - options)

Pour s'assurer de la suppression des pathogènes, on maintient l'option d'ajout de la chaux à la fin de séchage.

La superficie requise peut être estimée en fonction du débit journalier des boues épaissies ou des boues déshydratées mécaniquement par filtre à bandes en se basant sur les ordres de grandeur fournies par le fabricant Thermo System.

Une fois les boues sont séchées par ce système, les options d'élimination et/ou de valorisation deviennent possibles.

7.4 Ordre de grandeur de coût

Selon l'expérience internationale (Cf. vues des installations ci-après), cette technologie est adaptée aux centres urbains allant de quelques milliers à plus de 300 000 habitants.

Les ordres de grandeur de coût d'installation sophistiquée par le fabricant sont (pour la tunisie) :

- Les coûts spécifiques dépendent de la mécanisation et du matériel de couverture. La variation est entre 250 à 350 DT/m² (42 à 60 DH/m²) de superficie.
- Pour une installation de 300 000 EH (5 500 t MS/an, 8 600 m²) : 2,6 millions DT (440 000 dirhams).

Cette technologie est actuellement installée dans près de 60 localités dans les pays suivants : Allemagne, France, Brésil, Australie et Autriche. Des vues de quelques installations sont illustrées par l'assemblage des photos suivant

7.5 Recommandations pratiques

La procédure est appropriée pour des STEPs de taille moyenne, s'il y a suffisamment de surfaces disponibles.

8 Filières de valorisation verte - compostage

8.1 Préambule

Comme il a été bien précisé dans le rapport principal, la mise en place d'une unité de compostage des boues requiert au préalable une étude de faisabilité qui traite les principaux éléments suivants :

- Quantité et qualité des boues produites
- Choix de technologies adaptées (faibles coûts, absence de nuisances olfactives etc.)
- Etude du marché du compost : possibilités d'écoulement du produit, besoins réels et potentiels en compost, produits concurrentiels, etc.

Une condition importante devra être respectée et réside dans la production d'un compost de bonne qualité : dans la constance de cette qualité et dans les bonnes pratiques de valorisation du compost en tant que produit d'amendement organique.

8.2 Co - compostage des boues avec d'autres déchets

Pour le cas spécifique des boues, il est plus judicieux de les co-composter avec d'autres déchets pour pouvoir réajuster le rapport C/N et avoir une structure du compost permettant de garantir une bonne aération et une bonne régulation de la teneur en eau dans les tas à composter.

Les déchets usuels et/ou agents structurants pouvant être mélangés aux boues sont les suivants :

- Déchets ménagers : ceci offre en plus l'opportunité de composter les boues avec les déchets ménagers au niveau des décharges des déchets ménagers municipaux.
- Déchets verts agricoles et urbains
- Copeaux de bois et bois de taille de l'arboriculture fruitière
- Sciure de bois

Les rapports C/N de quelques produits sont apportés dans le tableau 13.

TABLEAU 13 : TENEURS APPROXIMATIVES EN AZOTE ET RAPPORT C/N DE QUELQUES MATIERES ORGANIQUES COMPOSTABLES (GOOTAS, 1959 ; US-EPA, 1985 ; MUSTIN, 1987)

Matières	C/N
Ordures ménagères brutes	15 – 25
Déchets de poissons	-
Gazon coupé	12
Chiendent	19
Herbe coupée (moyenne de toutes catégories)	19

Matières	C/N
Fumiers bovin et ovin de ferme (moyenne)	12 - 14
Fientes de volailles	8 – 10
Carcasses de poulets	5
Résidus d'abattoirs mélangés	3
Fumier de cheval	30
Fanes de pomme de terre	26
Paille des céréales	90 – 120
Sciure fraîche de bois	511
Sciure pourrie de bois	208
Écorces de bois	220 – 490
Engrais verts	10
Algues marines	17
Marc de café	20
Papiers et cartons mélangés	120 – 170
Déchets de légumes	11 – 12

8.3 *Recommandations pratiques*

Ci-après, on rapporte des illustrations, pour inspiration, d'un modèle de compostage des déchets verts d'une intercommunale à Nannine en Belgique. Ce procédé consiste en une fermentation dans des enceintes bétonnées dotées d'un système d'aération forcée par aspiration. Au lieu d'insuffler l'air dans les tas de la matière à composter, on aspire l'air de l'atmosphère ambiante pour éviter la propagation des odeurs. L'air inspiré passe par des pipelines déposés à la base des tas, à travers les différentes enceintes en série et enfin à travers un bio filtre organique naturel.

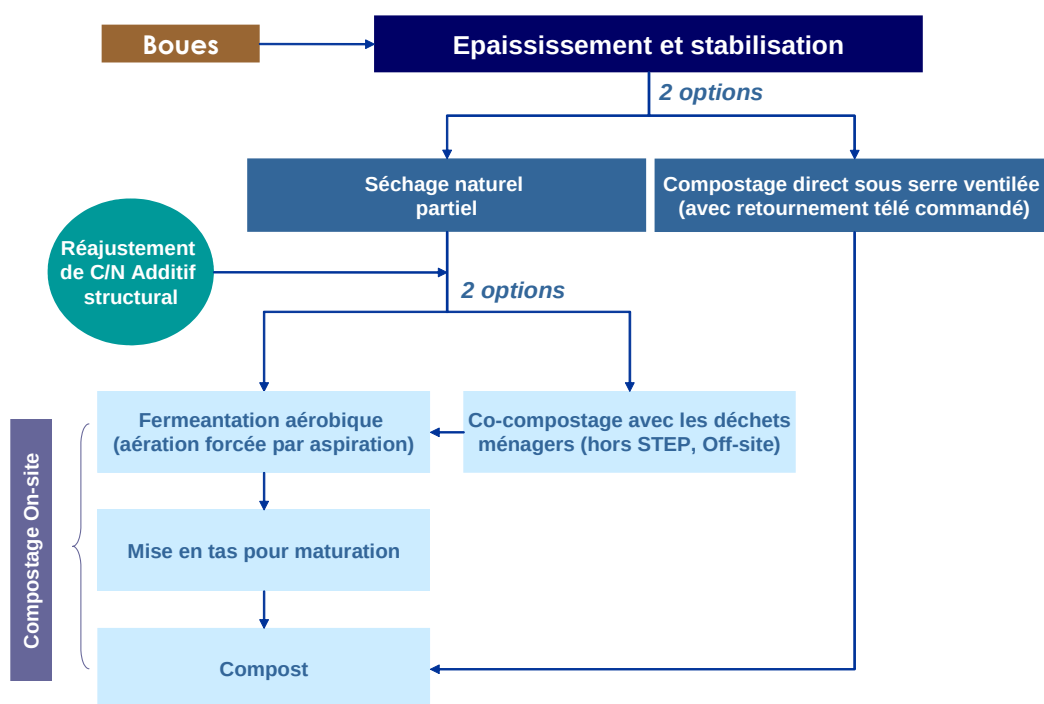


FIGURE 45 : FILIERE DE COMPOSTAGE

Le système d'aération (doté d'une station de commande) permet à la fois de contrôler le taux d'oxygène résiduel mais aussi la température.

Après la phase de fermentation qui dure en moyenne 4 semaines, on place le compost fermenté dans un hangar pour maturation pendant une durée de 4 semaines.

Pour appliquer ce système pour le cas des boues, il est indispensable de mélanger les boues avec un matériau permettant à la fois d'ajuster le C/N mais aussi la teneur en eau. Pour cela, il est recommandé de mélanger 3 parts de copeaux de bois avec une part de boues. Ceci permettra de faciliter l'uniformisation de la teneur en eau et d'assurer une porosité pour la circulation optimale de l'air.

9 Valorisation énergétique des boues dans des cimenteries

9.1 Principe et schéma

Une voie d'utilisation qui permet une valorisation complète des boues et sans résidus, c'est l'incinération commune des boues d'épuration lors de la production de ciment.

Avec les températures élevées dans les fours à ciment, en particulier les polluants organiques sont oxydés par voie thermique. Les matières inorganiques accumulées dans les cendres, y inclus les métaux lourds, sont fixées dans le clinker; à condition que les poussières dans les fumées soient séparées autant que possible et recyclées dans le processus d'incinération. Seul le mercure éventuellement contenu dans la boue ne peut pas être éliminé de cette manière.

Comme la production de ciment nécessite beaucoup d'énergie, de grandes quantités de combustibles (charbon, gaz naturel, pétrole) sont utilisées dans les fours à ciment. Pour le fabricant, il est économique de se servir des combustibles les plus avantageux. C'est pourquoi on utilise très souvent, outre le gaz naturel et le pétrole qui ont une haute valeur calorifique, de grandes quantités de charbon de ballast qui sont broyées et séchées sur place et insufflées sous forme de poussière dans le foyer.

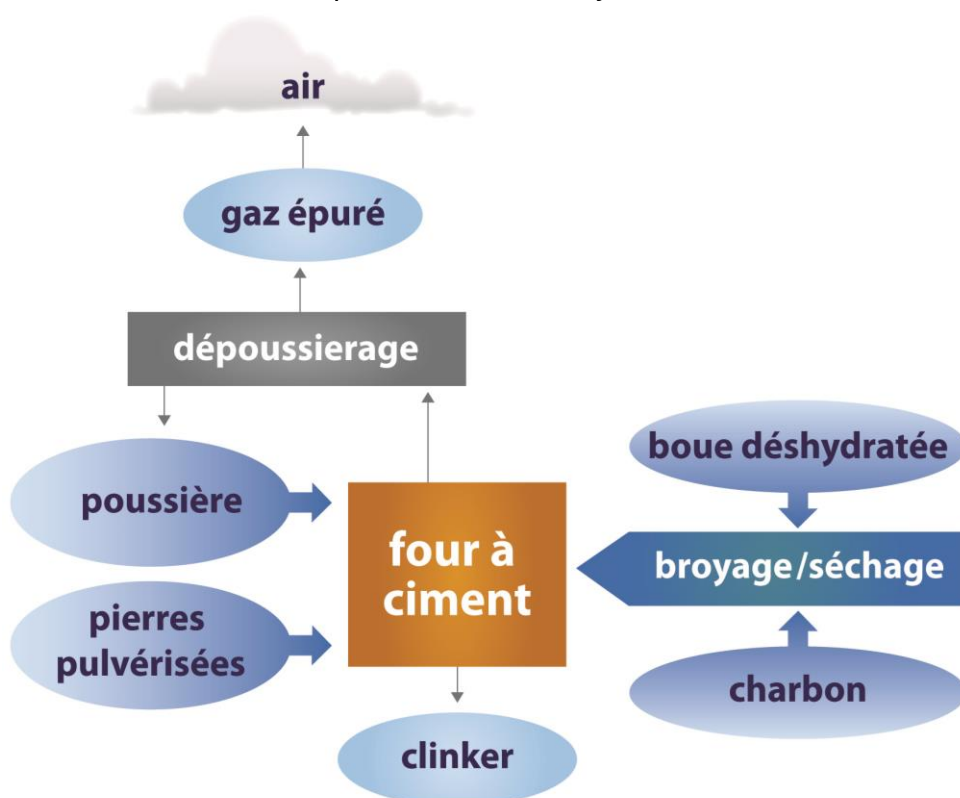


FIGURE 46 : ADDITION DES BOUES D'EPURATION DANS LE BROYAGE/SECHAGE DU FOUR A CIMENT

Les possibilités techniques de la valorisation des boues d'épuration dans l'industrie du ciment dépendent du combustible utilisé et de la technique de combustion. Si on utilise principalement du charbon de ballast comme source d'énergie, la boue peut être mélangée avec le charbon avant qu'il soit broyé et séché, puis les deux matières sont co-incinérées (Figure 46). La quantité additionnelle de boue dépend de la capacité d'évaporation du broyage-séchage, c'est pourquoi les boues devraient avoir une valeur calorifique d'environ

4.000 kJ/kg au minimum. Pour cette raison, seulement des boues déshydratées par des filtres-presses à chambres ou déshydratées à un haut degré par séchage naturel entrent en ligne de compte (dans cette gamme, les boues digérées et les boues brutes ont des pouvoirs calorifiques différents, à une teneur égale en eau).

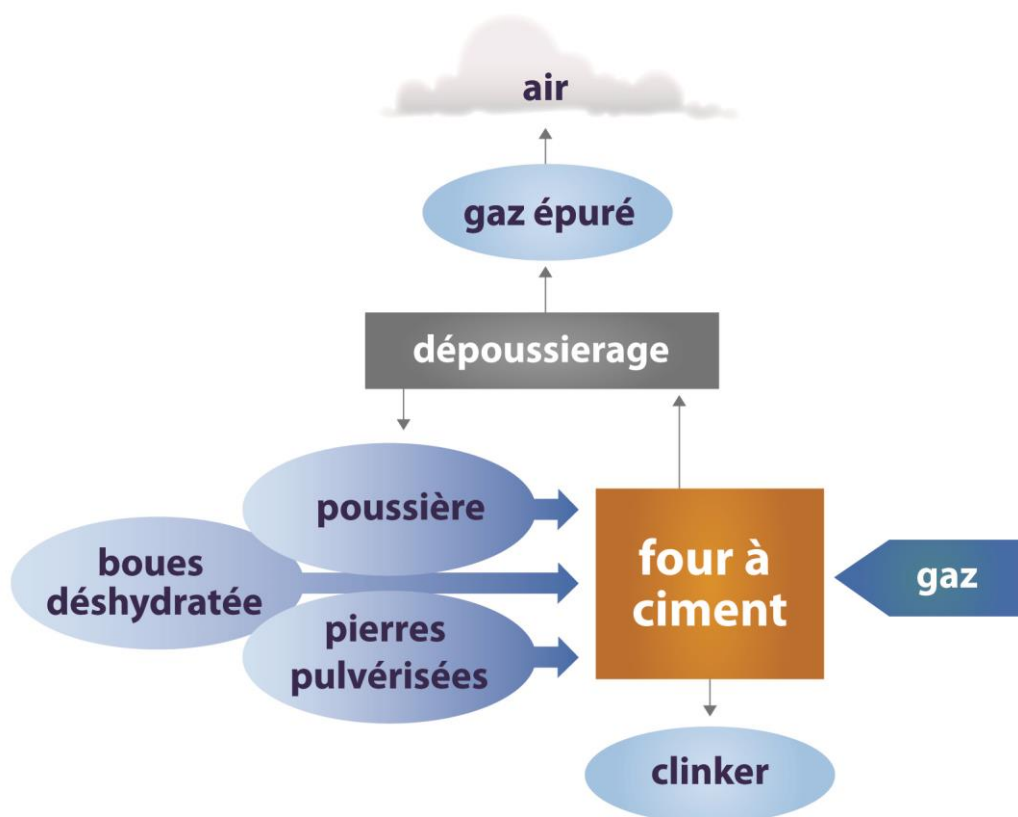


FIGURE 47 : ADDITION DES BOUES D'ÉPURATION AVEC LA PIERRE PULVERISÉE DANS LE FOUR DU CIMENT

Au contraire, si le four à ciment est chauffé avec du gaz naturel, on ne peut apporter les boues dans le four qu'avec la farine brute (Figure 47). Dans ce cas, la valeur calorifique des boues ne joue qu'un rôle secondaire ; car les quantités apportées sont faibles et la boue se fait à peine remarquer dans le bilan massique. Mais, en général, il y a des capacités suffisantes pour la boue d'épuration additionnelle à cause des grandes quantités de farine brute à incinérer pour la production du ciment.



FIGURE 48 : CIMENTERIE BEERENBURG (ALLEMAGNE) : RESERVOIR DE BOUES DESHYDRATEES (A GAUCHE), RESERVOIR DES PIERRES PULVERISEES (A DROITE)

En Allemagne, tous les deux procédés sont utilisés avec succès. Dans ce pays, comme généralement en Europe, les cimenteries s'efforcent de plus en plus, sous la pression des coûts des compétitifs, de substituer les combustibles fossiles par des déchets (huile usée, peinture, mais aussi des vieux pneus et ordures ménagères). A ce propos, l'opportunité d'utilisation des boues d'épuration est en développement.

Les aspects à considérer sont :

- les dépenses de construction pour la réception des boues d'épuration ;
- la capacité d'évaporation du four à ciment lui-même ou du broyage-séchage ;
- le dimensionnement des installations de dépoussiérage ;
- la capacité de séparation de l'installation de traitement de l'air pollué pour les métaux lourds volatils ; et
- les valeurs limites des substances additionnelles contenues dans les boues concernant la qualité du ciment.

Il est d'une importance capitale à quel point du procédé les boues (une matière à basse valeur calorifique et à haute teneur en matières organiques et en cendres) peuvent être alimentées dans le système thermique dans un four à clinker. Leur mélange avec la farine brute, suivi par leur chauffage progressif dans le préchauffeur entraînerait la libération plus ou moins incontrôlée de matières polluantes organiques (également des produits de carbonisation). Une alimentation par la soi-disant combustion principale risquerait de restreindre sérieusement la conduite des flammes et le contrôle de la température. Pour cette raison, le point d'alimentation à favoriser est le soi-disant calcinateur, (voir Figure 48) dans le cas où la cimenterie en est équipée. Les calcinateurs sont installés entre la zone de préchauffement (des températures jusqu'à 400 °C) et le four tournant (sintérisation, à des températures au-dessus de 1.200 °C). Ils ont la fonction de calciner déjà complètement (désacidifier : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) la farine de calcaire préchauffée avant son entrée dans le four tournant. Avec environ 900 °C, la température dans les calcinateurs est suffisamment élevée afin d'obtenir une destruction presque complète des matières organiques.

Comme c'est le cas des centrales, le mercure représente le paramètre critique en ce qui concerne la co-incinération des boues d'épuration. Contrairement à tous les autres métaux, cette matière est retenue par les filtres, selon l'état actuel de la technique, seulement de façon insuffisante.

A part le mercure et les matières organiques détruites, le contenu des combustibles entre presque complètement dans le produit « clinker ». Pour la co-incinération, la question de la qualité du produit est d'une importance particulière. Il faut considérer qu'avec la boue d'épuration, on apporte des matières brutes qui sont incluses dans la substitution matérielle. Il s'en voit que l'aspect énergétique représente la grandeur déterminante.

Il va d'abord être nécessaire de convaincre les exploitants des cimenteries des avantages de la valorisation des boues d'épuration.

9.2 Recommandations pratiques

La valorisation thermique des boues est une filière de traitement recommandable pour des régions comprenant un certain nombre d'installations à l'échelle industrielle comme des cimenteries ou des centrales électriques.

10 Etude de compatibilité environnementale des procédés de traitement des boues d'épuration

10.1 Introduction

Des études de compatibilité environnementale sont effectuées dans le cadre d'évaluations des risques pour l'environnement. Celles-ci ont pour but de définir le degré d'impacts directs et indirects des projets sur l'environnement (nature, société). Les résultats servent à décider de l'aptitude et de la conformité réglementaire du procédé en question. De telles études sont également utilisées pour pouvoir comparer divers procédés, p. ex. les procédés de traitement des boues d'épuration, dans le but de définir le procédé le mieux approprié pour une situation donnée.

Tout traitement des boues d'épuration a des impacts sur l'environnement et la santé humaine. Toute décision contre un risque lié à une option de traitement est en même temps une décision pour un risque lié à une autre alternative de traitement. Peut-on répondre de l'incinération des boues d'épuration dans ces conditions données ? Doit-on conseiller fortement ce procédé ? La valorisation agricole ou agronomique à court ou moyen terme signifie-t-elle moins de charges pour l'environnement et la santé humaine que l'incinération des boues d'épuration ? La mise en décharge a-t-elle des impacts moindres ? Ou bien les différences – absolues ou en comparaison avec d'autres problèmes environnementaux – sont-elles négligeables, au point de ne jouer aucun rôle fondamental dans la prise de décision ?

Au vu de ces questions fondamentales, il est conseillé d'étudier les impacts des diverses alternatives d'évacuation des boues d'épuration sur l'environnement et la santé humaine. Actuellement, les boues d'épuration peuvent être évacuées selon les options suivantes :

- Utilisation agricole (avec ou sans compostage ou conditionnement des boues avec de la CaO)
- Utilisation agronomique
- Mise en décharge (décharge simple ou mixte avec ou sans dessiccation préalable)
- Mono-incinération
- Incinération avec d'autres déchets
- Co-incinération dans les cimenteries

Les résidus liés à l'incinération quant à eux doivent être l'objet de diverses options de valorisation ou d'évacuation (mise en décharge, valorisation en tant que matériau avec ou sans post traitement préalable)

10.2 Démarche méthodique pour comparer les impacts environnementaux

Les étapes sont présentées dans la Fig. 1 selon les variantes de traitement.

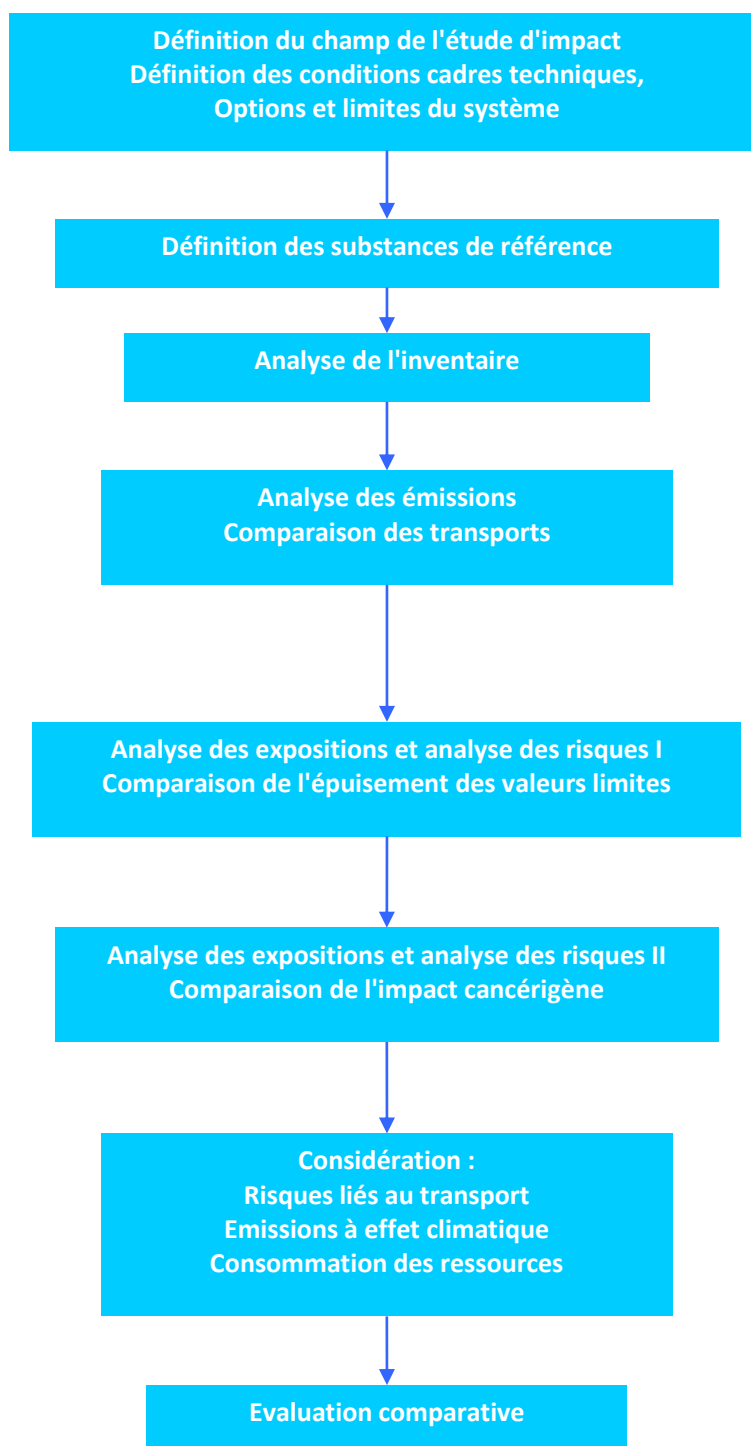


FIGURE 49 : SOUS-ETAPES DE L'ANALYSE ET EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIVERSES OPTIONS D'EVACUATION DES BOUES D'EPURATION

Il convient tout d'abord de définir les conditions cadres techniques des options devant être comparées. Une fois **les substances de référence définies**, **l'analyse de l'inventaire** déterminera les quantités de polluants traitées ou épandues (utilisation agricole ou agronomique) selon les variantes d'évacuation. Ces quantités de polluants représentent un potentiel toxique lié à l'option d'évacuation en question et pouvant agir sur l'environnement, indépendamment des rejets et effets délétères.

L'analyse des émissions sert à considérer le déversement du potentiel toxique représenté dans l'analyse de l'inventaire dans chacun des milieux environnementaux que sont l'air, l'eau et le sol. Les chemins d'émissions possibles y sont représentés avec les émissions obtenues. Sous le terme émissions, il convient de différencier les émissions [directes] (p.ex. effluent gazeux de l'incinération, charge polluante des sols) des émissions indirectes (transports, fabrication de précurseurs tels la CaO, polymères). Diverses émissions doivent également être prises en compte, comme l'économie de combustibles ou les substitutions d'engrais.

Dans l'étape suivante, **l'analyse des expositions** définit de quelles façons et dans quelles concentrations les polluants émis peuvent arriver jusqu'aux hommes. L'analyse des risques quant à elle, tente de déterminer les impacts sur la santé humaine.

Finalement, les options considérées sont soumises à une **évaluation comparative**. Les aspects des risques quantifiables et non quantifiables sont représentés de façon claire. Au vu de l'amplitude de la comparaison des risques, les principaux composants des risques sont bien identifiés et des mesures de minimisation sont proposées. Les besoins d'études nécessaires à la clarification des questions restantes sont également notifiés.

10.3 Conditions cadres techniques et limites du système

Le tableau 14 présente de façon exemplaire une vue d'ensemble des variantes d'évacuation des boues d'épuration sur une comparaison concrète de sites.

TABEAU 14 : VARIANTES DE SYSTEME A ETUDIER (EXEMPLE)

Variantes de systèmes	Utilisation agricole	Incineration des boues d'épuration
Options de dessiccation	Divers degrés de déshydratation mécanique et conditionnement	Déshydratation mécanique jusqu'à > 330 % TMS Dessiccation préalable sur l'installation Dessiccation préalable autre part
Options agricoles	Substitutions d'engrais synthétiques Avec ou sans conditionnement CaO	
Options de transport	A : état actuel (camion) B : transport ferroviaire	A : état actuel (camion) B : transport ferroviaire C : transport par conduites

La figure 50 donne un aperçu simplifié des domaines prédominants à prendre en compte lors de la comparaison des systèmes. Les divers systèmes devant être considérés de façon modulaire, ceux-ci peuvent être combinés entre eux, de même que plusieurs options de dessiccation et de transport. Lors de l'évaluation, il est important de ne pas considérer les charges liées à la production des divers systèmes (installations de séchage et moyens de transport). On ne considère donc que les impacts des substances contenues dans les boues

d'épuration ainsi que les impacts des moyens de production directs (p. ex. la CaO pour le conditionnement, l'électricité pour la déshydratation et le diesel ainsi que la "chaîne amont" (mesures de prétraitement)). Lors d'études similaires, on a pu constater que les émissions liées à la production de moyens de production sont minimales en comparaison.

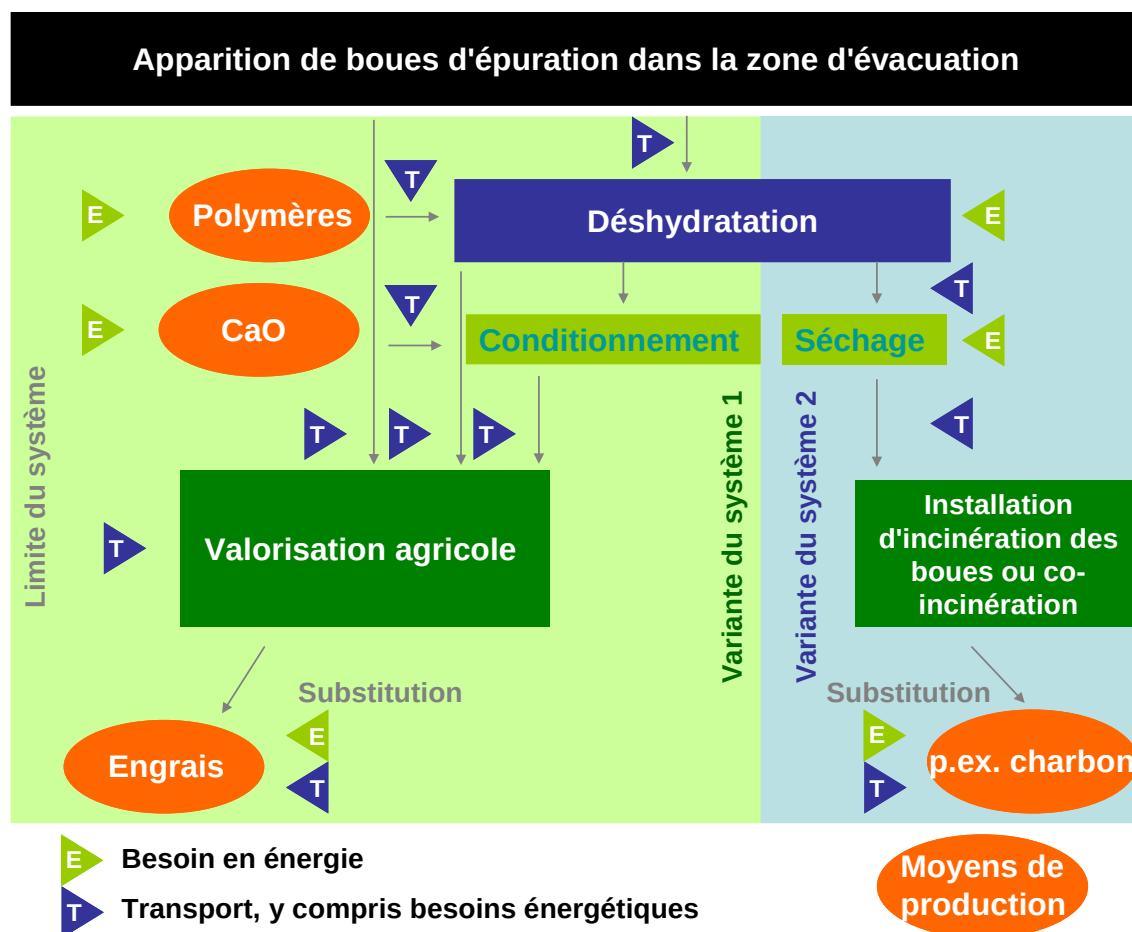


FIGURE 50 : SYSTEMES ETUDIES DANS L'ETUDE DE COMPATIBILITE ENVIRONNEMENTALE POUR L'EVACUATION DES BOUES D'EPURATION

10.4 Critères d'évaluation des charges environnementales

Il n'existe pas de procédé normalisé pour évaluer les divers impacts environnementaux. Il est conseillé de reprendre la démarche d'évaluation des impacts environnementaux utilisée dans le domaine d'écobilans de produits. Celle-ci est représentée dans le Tableau 15. On différencie pour ce faire les domaines de critères (p. ex. dommages dus aux émissions) des critères généraux (p. ex. effets néfastes pour la santé) et des critères affinés (p. ex. risque cancérigène). Des indicateurs doivent être définis pour les critères affinés retenus. Dans le cas du risque cancérigène, cela peut revenir à considérer le risque individuel ou le risque collectif maximal.

TABLEAU 15 : CRITERES ENVIRONNEMENTAUX POUR COMPARER LES SYSTEMES

Domaines de critères	Critères généraux	Critères affinés
Dommages dus aux émissions	Effets néfastes sur la santé humaine Effets néfastes sur l'environnement Impact sur l'atmosphère Autres impacts	Impacts toxiques chroniques Risque cancérigène Eutrophisation Acidification Endommagement direct d'organismes Effet de serre renforcé Destruction de l'ozone Nuisances sonores Rejets thermiques Pollution olfactive
Sollicitation directe des ressources	Consommation de matières premières et d'énergie Consommation du sol Endommagement des ressources biologiques	Consommation de ressources minérales Consommation d'énergies fossiles Consommation d'énergies renouvelables Consommation d'eau Consommation de surface Favorisation de l'érosion Diminution de la diversité Dégradation du paysage
Risque d'accident		Accidents de transport Risque de dysfonctionnement

Lors des études de compatibilité environnementale, l'abondance des critères possibles doit être limitée à un nombre praticable tout en permettant de tirer des conclusions adéquates, p. ex. :

- Apport de polluants dans les milieux environnementaux (air, sol, nappes phréatiques)
- Contrainte supplémentaire pour l'homme par action des polluants sur des valeurs seuils
- Contrainte supplémentaire pour l'homme par action des polluants sans valeurs seuils (p. ex. polluants cancérigènes)
- Impacts dus au transport des boues d'épuration ou résidus (trafic, risque d'accidents, émission de polluants)
- Degré de substitution d'engrais synthétiques

- Utilisation ou substitution de ressources énergétiques
- Effet sur le climat planétaire
- Caractéristiques de dépôt des résidus à traiter ou à mettre en décharge (option incinération)

10.5 Polluant pris en compte

Une des étapes primordiales de l'évaluation consiste à définir les polluants considérés. La loi prévoit la prise en compte de certaines données ; en règle générale, la palette de polluants pour lesquels des données sont accessibles, est comparable, divers polluants étant réglementés par la loi. On part donc des objectifs suivants :

Tous les polluants pertinents réglementés du point de vue des émissions doivent être pris en compte dans cette analyse ; de même, l'analyse des expositions doit prendre en compte au moins tous les paramètres pour lesquels une valeur d'émission est définie (en Allemagne "Technische Anleitung Luft" / Directives techniques air).

Tous les polluants présentant un degré pertinent de risque cancérigène seront pris en compte.

Tous les gaz traces considérés comme pertinents dans la comparaison des procédés seront pris en compte (CO₂, méthane, gaz hilarant (N₂O)).

Toute substance présentant un effet d'engrais sera prise en compte.

Bien évidemment, une liste de polluants ne peut jamais prétendre à l'exhaustivité. Cette carence étant présente pour les deux options d'une comparaison de systèmes, il suffit donc de vérifier qu'aucun paramètre important n'a été oublié. Le Tableau 16 comprend une liste utilisable des substances de référence.

TABLEAU 16 : LISTE DES SUBSTANCES DE REFERENCE POUR COMPARER LES VARIANTES DE PROCEDES D'EVACUATION DES BOUES D'EPURATION

Polluants	Raison de notification sur la liste					
	AL	IM	KL	KR	DU	WK
Paramètres totaux et polluants anorganiques						
Antimoine	x					
AOX			x			
Arsenic	x			x		
Plomb (Lead), Cadmium	x	x	x			
Calcium (sous la forme CaO)					x	
Chlore (anorganique)	x	x				
Chrome	x		x			
Fluor (anorganique)	x					
Carbone total	x					
Potassium (sous la forme K ₂ O)					x	
Cobalt	x					
Monoxyde de carbone (CO)	x	x				
Hydrocarbure (sans méthane)	x					
Cuivre	x		x			
Manganèse	x					
Nickel	x		x			
Phosphate (sous la forme P ₂ O ₅)					x	
Mercure	x		x			
Substances radioactives (J-131, Ra-226)				x		
Oxydes sulfuriques (sous la forme SO ₂)	x	x				
Particules de poussière	x	x				
Azote (sous la forme N ou NH ₄)					x	
Oxydes d'azote (sous la forme NO ₂)	x	x				
Zinc			x			
Polluants organiques						
Benzo(a)pyrène				x		
PCB, dioxine / furanne (TE)			x	x		
Gaz traces à effet climatique						
Protoxyde d'azote (N ₂ O)						x
Dioxyde de carbone (CO ₂)						x
Méthane (CH ₄)						x

AL = Règlementation des émissions des effluents gazeux

WK = Impact sur le climat planétaire

L'étude de compatibilité environnementale considère les chemins critiques pour l'eau, le sol et l'air. Les chemins critiques pour une valorisation agricole des boues d'épuration sont représentés à la Figure 51.

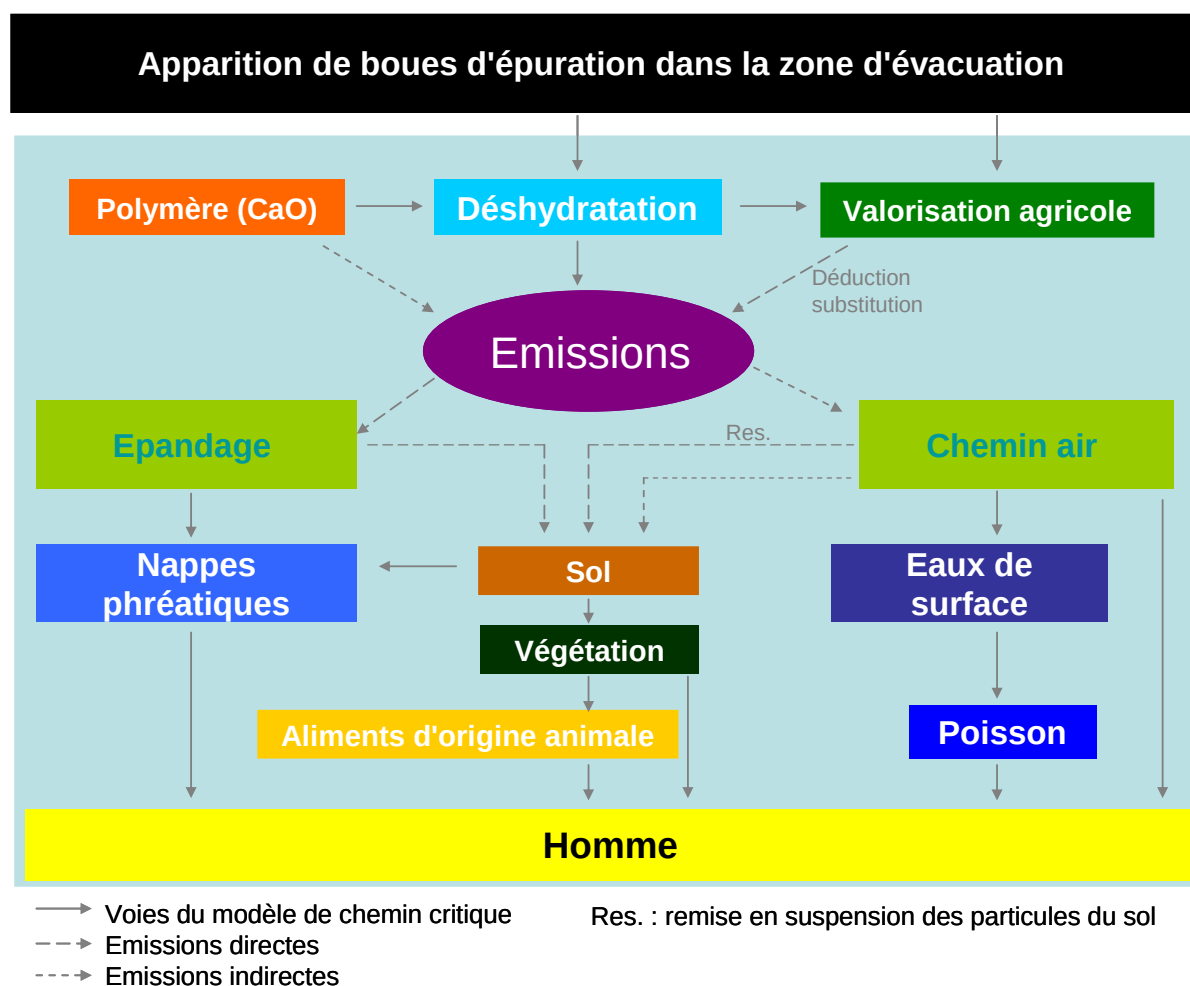


FIGURE 51 : CHEMINS CRITIQUE POUR VALORISATION AGRICOLE DES BOUES

10.7 Impacts environnementaux des diverses options d'évacuation des boues d'épuration

La comparaison des impacts environnementaux de l'évacuation des boues d'épuration est possible sur la base des données concrètes des sites. Cependant, le résultat spécifique permet également de tirer des conclusions quant à d'autres conditions cadres. Ci-dessous sont présentés les résultats et considérations particulières généralement admis. Un certain nombre de démarches conseillées sont ensuite regroupées dans une liste :

- Pour l'utilisation agricole des boues d'épuration, on prend en compte les émissions de CO₂ et NO_x liées au transport, lesquelles sont dues à la consommation de sources d'énergies fossiles pour l'épandage mécanique des boues d'épuration dans les champs.
- En guise de "crédit", on considère la substitution d'engrais en appliquant l'admission de nutriments en quantité insuffisante dans les sols concernés.
- Pour la valorisation agricole, les polluants contenus dans les boues d'épuration sont déchargés sur un vaste périmètre et stockés dans les sols. Pour les besoins d'estimation de l'exposition, on part des quantités possibles maximales de boues d'épuration.
- L'évaluation prend pour base la non-évacuation des polluants organiques et l'incorporation des boues d'épuration dans la couche supérieure du sol égale à 15 cm. Comme sol comparatif pour les valeurs du niveau initial de pollution, on prend un site réputé non chargé et situé à proximité de l'endroit prévu pour l'épandage des boues d'épuration. En règle générale, on constate que pour les polluants considérés, la charge supplémentaire liée à l'utilisation agricole est bien plus importante que celle escomptée via les émissions des effluents gazeux lors d'une co-incinération dans une cimenterie.

10.8 Evaluation comparative et résumé

Lors de la comparaison des impacts des diverses options d'évacuation des boues d'épuration, on examine pour chacune d'entre elles le degré d'atteinte des objectifs suivants :

- Impacts sur le climat planétaire
- Bouclage de la chaîne alimentaire
- Risques sanitaires individuels / collectifs, présents / futurs
- Besoins en surfaces

Le choix des objectifs dépend des données locales.

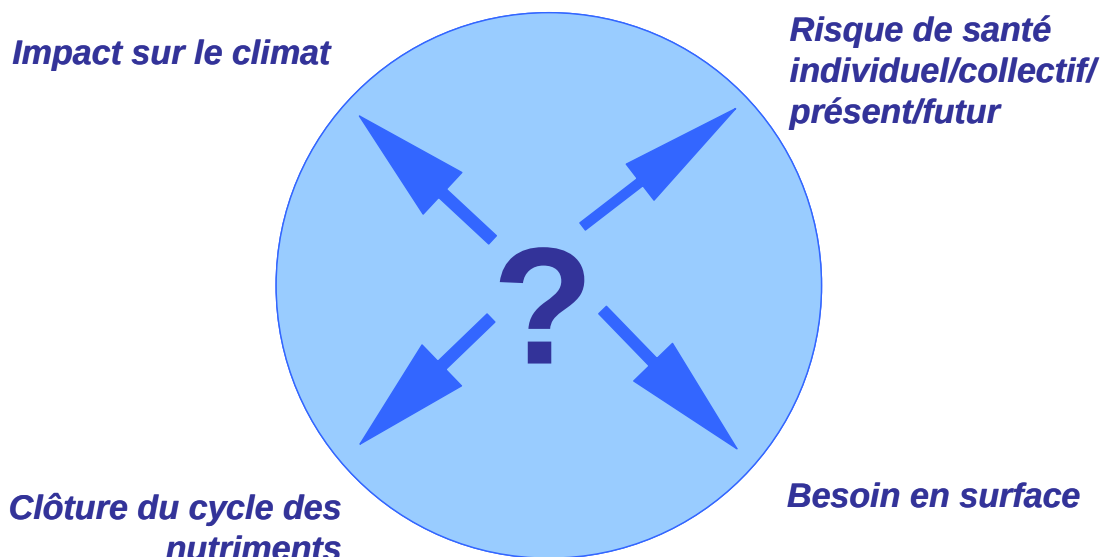


FIGURE 52 : CONFLITS D'OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX AVEC L'EVACUATION DES BOUES D'EPURATION

En guise d'exemple, on peut formuler les points suivants :

L'utilisation agricole est l'option présentant le volume de décharge le plus bas et les émissions en NO_x et CO₂ fossile les plus faibles. Si l'objectif premier est de boucler la chaîne alimentaire, l'utilisation agricole est donc à privilégier. Ces avantages sont également liés avec la plus haute contamination des sols ainsi qu'un risque cancérigène supplémentaire présent sur une zone de charge importante.

La mise en décharge des boues d'épuration est une solution défavorable aussi bien pour le bilan CO₂ et NO_x que pour la surface de décharge nécessaire. Si l'objectif est de maintenir dans les effluents gazeux les rejets de métaux lourds et de polluants organiques, potentiellement cancérigènes au taux le plus bas possible, l'option de la mise en décharge aura priorité.

A l'échelle de périodes historiques, on peut s'attendre à un suintement des eaux d'infiltration dans les nappes phréatiques, car il n'est pas possible de supposer que l'étanchéité de base sera assurée ni que les eaux d'infiltration seront collectées et traitées sur des centaines d'années. Les personnes présentes sur ses sites dans le futur seront donc soumises à un risque cancérigène.

Si le critère fondamental de décision est de minimiser la surface de la décharge tout en minimisant les risques sanitaires individuels et collectifs, alors l'incinération des boues d'épuration est actuellement la meilleure solution.

Pour peser le pour et le contre des divers critères d'évaluation, il est nécessaire de définir des échelles de valeur. Les responsables politiques doivent pour ce faire définir des objectifs de qualité environnementale. De façon générale, on peut affirmer que l'évaluation des contraintes environnementales laissent une certaine marge de manœuvre, à savoir qu'un procédé particulier ne saurait être retenu une fois pour toutes. D'autres critères comme la rentabilité et la sécurité de l'évacuation peuvent jouer un rôle plus important dans la décision concernant l'évacuation des boues d'épuration.

11 Éléments de contrôle et de surveillance

En attendant la réglementation des normes, on se propose ici de recommander quelques lignes de conduite en matière de système de suivi, de contrôle et de surveillance. Ce système concernera les composantes suivantes : les boues, les végétaux, les produits agricoles, le sol, les eaux souterraines et les eaux de surface.

Le flux de transfert des ETM ou pathogènes entre ces différentes composantes permet d'identifier les voies d'exposition à contrôler (Cf. figure 53).

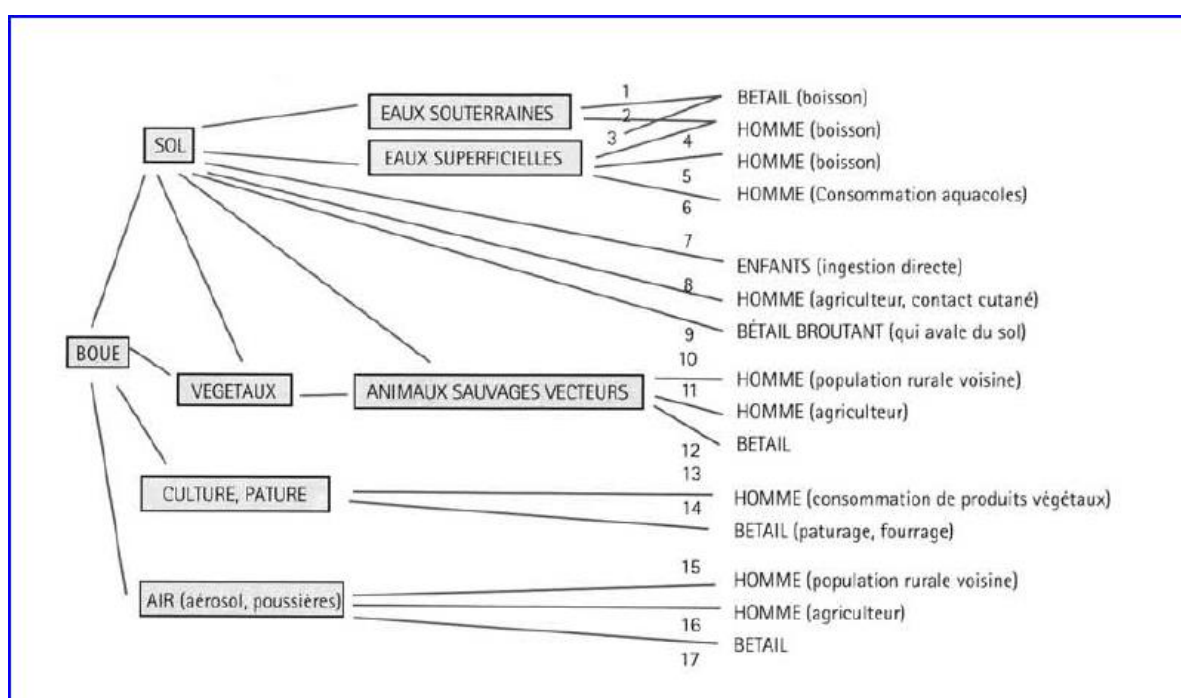


FIGURE 53 : VOIES DE TRANSFERT ET D'EXPOSITION DES PATHOGÈNES

11.1 Boues

Selon le Conseil de l'Union Européenne (1986), la liste minimale des paramètres qui doivent être analysés sont :

- Matière sèche (%)
- Matière organique (% de la matière solide)
- pH
- Macro éléments en % de la matière sèche
 - N total
 - N ammoniacal
 - Phosphore total
 - Potassium total
- Micro-éléments exprimés en mg/kg de matière sèche

- Cuivre
- Nickel
- Zinc
- Cadmium
- Plomb
- mercure
- Chrome
- Molybdène
- Sélénium
- Pathogènes

Après analyse des boues, les doses d'utilisation sont recommandées par un ingénieur ou technicien agronome sur la base de: (i) la composition des boues, (ii) les caractéristiques des sols, (iii) les précédents culturaux et (iiii) les besoins en éléments nutritifs des cultures. Les doses doivent, dans tous les cas, être ajustées pour éviter une accumulation d'éléments traces métalliques.

11.2 Végétaux

La phyto-toxicité est une situation provoquée par un excès de certains éléments dans le sol. Par exemple, chez les végétaux, il en résulte soit des désordres physiologiques, soit des accidents plus graves (lésions, dépérissement et finalement mort de la plante), soit une adaptation progressive des espèces au sol contaminé. Les symptômes (chloroses, dessèchement, chute des feuilles ou fleurs...) sont non seulement en rapport avec la concentration de l'agent toxique mais aussi avec sa forme chimique (Cr^{6+} nettement plus toxique que Cr^{3+}) (Delcarte, 1988 ; Cámara et al, 2000 ; Jain et Ali, 2000). La toxicité est déterminée en fonction de la biodisponibilité des éléments (Adriano *et al*, 1997).

Il serait donc judicieux de contrôler périodiquement la composition métallique des produits des végétaux cultivés obtenus dans des sols amendés avec des boues. Ce contrôle doit concerner toutes les espèces car il existe des plantes accumulatrices de métaux qui ne manifestent pas de symptômes de phyto-toxicité. Dans ce cas, la toxicité métallique est transférable dans les chaînes trophiques.

11.3 Sols

Sachant que la biodisponibilité des métaux lourds diffère d'un sol à l'autre et que les apports répétés de boues ou de compost de boues peuvent en engendrer une accumulation, il est prudent d'en contrôler la concentration des principaux dans le sol et de les comparer aux normes. Les principaux métaux lourds retrouvés dans les boues sont les suivants : Hg, Cd, Cu, Cr, Pb, Zn et Ni. Dans le cas où on procède au co-compostage des boues avec les déchets ménagers, cette liste doit être complétée par les éléments : As, Mo et Se.

11.4 Eaux

L'utilisation des boues dans des sols situés sur des nappes superficielles à faible niveau piézométrique ou des aquifères vulnérables peut engendrer des risques de pollution de ces eaux et particulièrement dans le cas d'utilisation des doses excessives sur des sols de texture sableuse.

L'épandage des boues à proximité amont des eaux de surface mérite aussi d'être contrôlé. En effet, il convient de contrôler le ruissellement des eaux à partir des zones d'épandage pour éviter la livraison de phosphore et d'azote et le déclenchement du phénomène d'eutrophisation.

11.5 Récapitulatif de quelques bonnes pratiques

Encore une fois, en attendant la réglementation des conditions d'utilisation des boues en agriculture (Cf. partie relative aux aspects institutionnels et réglementaires), on se propose de rapporter un certain nombre de précautions et de conseils concernant l'utilisation des boues d'épuration en agriculture :

- Les boues doivent être conformes aux normes (à mettre en place pour le Maroc)
- Les conditions de l'épandage doivent correspondre aux besoins des cultures pour éviter des excès pouvant engendrer des effets néfastes sur l'environnement
- Incorporer les boues au sol et les distribuer de manière uniforme
- Le pH du sol doit être de préférence supérieur à 6 (cas de la majorité des sols marocains) pour atténuer les risques de pollution par les éléments traces et leur transfert dans les chaînes alimentaires
- Analyser les boues produites tous les six mois (matières sèches, matières organiques, pH, N, P, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn)
- Ne pas épandre des boues sur des cultures consommées à l'état cru. Un délai de six mois entre l'épandage des boues et la mise en place de la culture est recommandé. Les boues ne pourront donc être épandues qu'une année sur trois lorsque le sol est laissé en jachère
- Eviter l'application des boues sur des pentes fortes caractérisées par un ruissellement excessif et particulièrement à l'amont des retenues dont les bassins versants amont sont vulnérables à l'érosion (il s'agit de 22 bassins qui sont identifiés par le HCEFLCD)
- Appliquer des doses modérées aux sols de texture sableuse pour éviter la percolation des lixiviats vers les eaux souterraines
- Eviter l'application des boues dans les jardins et pelouses de maisons très fréquentées par les enfants
- Eviter l'utilisation des boues pour les cultures à tubercules.

11.6 Aspects sanitaires

Le personnel qui sera en contact direct ou indirect avec les boues à n'importe quel maillon de la filière (Producteur de boues, manipulateurs, usagers) devra faire l'objet de recommandations et de protection sanitaire. Il faudra en particulier porter attention à :

- ne pas avoir de contact direct dermique pour des boues non hygiénisées
- veiller à la vaccination du personnel de la filière (mise en place de sensibilisation de la vaccination par le Ministère de la Santé).

11.7 Indicateurs de performance de la gestion de la filière « boues »

La bonne gestion de la filière « boues » dans les STEPc permet à la fois de garantir un fonctionnement optimal du procédé d'épuration et d'éviter les nuisances olfactives et les impacts négatifs sur l'environnement. Aussi, comme le montre la figure 54, la filière des boues commence au niveau des ouvrages d'épuration primaires et secondaires, passe par les procédés d'évacuation et de traitement pour arriver enfin aux destinations finales (décharge, valorisation verte ou énergétique). Ces destinations impliquent aussi des opérateurs, des gestionnaires, des usagers et des consommateurs,

Ainsi, en plus du système de suivi et de surveillance, on propose d'adopter des indicateurs d'appréciation des performances de gestion au niveau de tous les maillons.

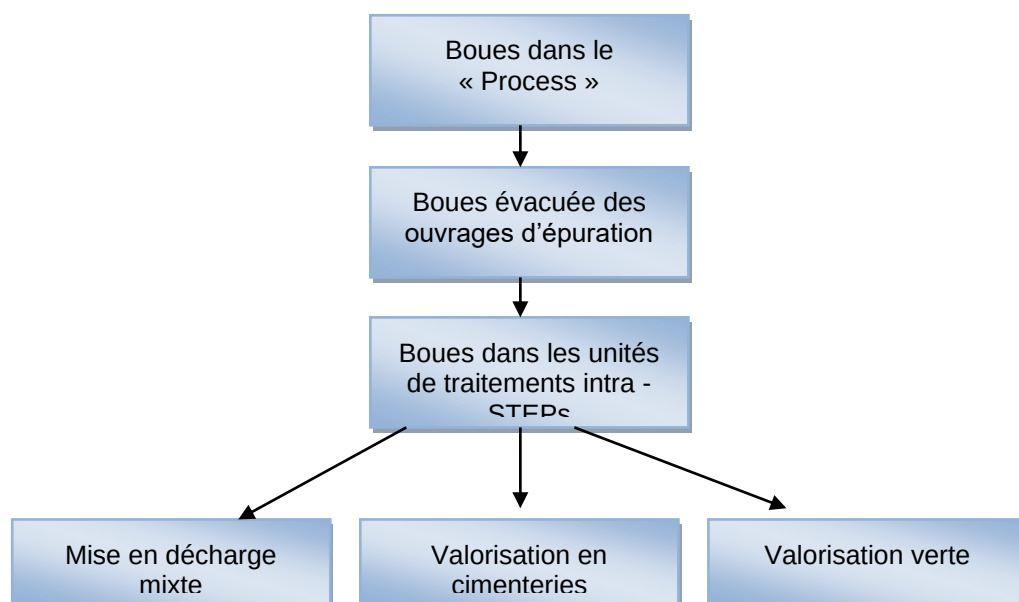


FIGURE 54 : DESCRIPTION DE LA FILIÈRE « BOUES »

Les indicateurs de performance sont associés aux différents maillons comme le montre la figure 55

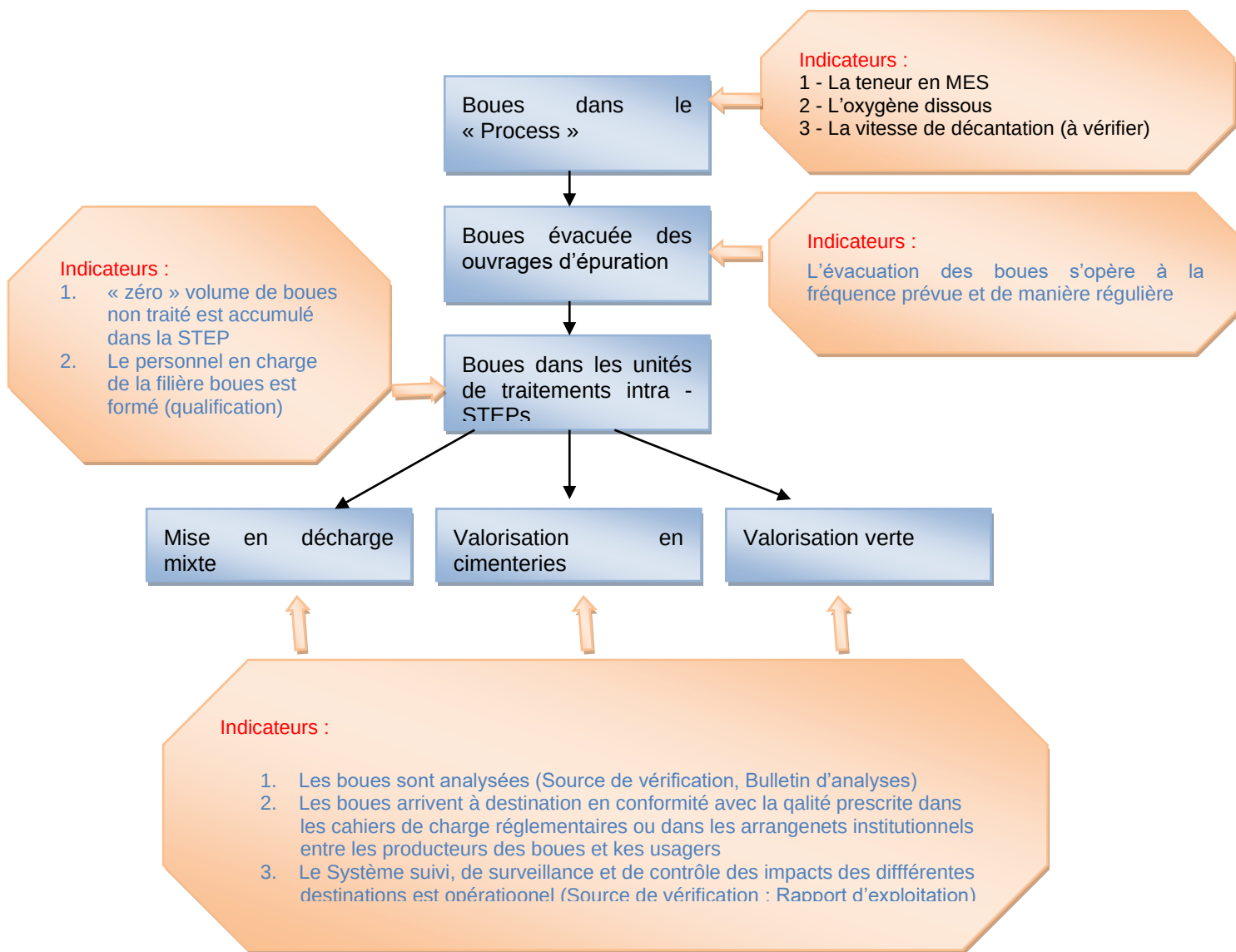


FIGURE 55 : INDICATEURS DE PERFORMANCE DE LA FILIERE BOUES

12 Contexte réglementaire marocain

Le Maroc ne dispose pas en 2010, d'une réglementation spécifique sur les boues. Cependant certains textes peuvent concerner les modalités d'élimination des boues et leurs impacts : (i) Dahir 25 août 1914, (ii) la Loi 28-00 relative à la gestion des déchets, (iii) la Loi 12-03 relative aux études d'impacts sur l'environnement et la Loi 10-95 sur l'eau. Ces éléments, présentés dans le rapport de la phase 1 sont repris ci-après.

12.1 Dahir 25 août 1914

Le Dahir du 25 août 1914 portant réglementation des établissements insalubres, incommodes et dangereux exige dans son article 5 que le mode et les conditions d'évacuation des déchets et des résidus desdits établissements soient définis préalablement à toute autorisation.

L'arrêté viziriel du 13 octobre 1933, pris pour l'application du dahir de 1914 et portant classement de ces établissements, classe les dépôts des boues et d'immondices dans la première classe en raison des inconvénients que ces boues et immondices pourraient engendrer. Ces inconvénients consistent en odeur, en altération des eaux et en danger des mouches. Cette classification soumet ce type d'installation au système d'autorisation tel que défini par ledit Dahir.

12.2 Loi 12-03 relative aux études d'impacts sur l'environnement

La liste des projets assujettis à l'étude d'impact sur l'environnement mentionne, en plus des établissements insalubres, incommodes ou dangereux classés en première catégorie, deux types d'installations qui sont en relation directe avec les boues, et qui sont renfermées dans la deuxième catégorie. Il s'agit des **installations de stockage ou d'élimination de déchets quel que soit leur nature et leur mode d'élimination ainsi que les stations de traitement des eaux usées et ces ouvrages annexes**. Ces ouvrages annexes des stations de traitement des eaux usées sont entre autres ceux destinés au traitement de boues.

12.3 Loi 10-95 sur l'eau

La loi 10-95 sur l'eau a été élaborée dans l'objectif principal de la préservation des ressources en eau et la lutte contre la pollution. Elle a consacré le **Chapitre VI** pour identifier une stratégie de lutte contre la pollution des eaux. Cette loi stipule dans son **article 52**, qu'aucun déversement, écoulement, rejet, dépôt direct ou indirect dans une eau superficielle ou une nappe souterraine susceptible d'en modifier les caractéristiques physiques, y compris thermiques et radioactives, chimiques, biologiques ou bactériologiques, ne peut être fait sans autorisation préalable accordée, après enquête, par l'agence de bassin. A cet article vient s'ajouter l'**article 53**, qui stipule que tout déversement, écoulement, rejet, dépôt direct ou indirect dans une eau superficielle ou une nappe souterraine visé à l'article 52 existant à la date de publication de la présente loi, doit, dans un délai fixé par l'agence de bassin, faire l'objet d'une déclaration.

12.4 Loi 28-00 relative à la gestion des déchets

Les boues ont le caractère d'un déchet selon la loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets, qui stipule que tout résidu résultant d'un processus d'extraction, exploitation, transformation, production, consommation, utilisation, contrôle ou filtration, et d'une manière générale, tout objet et matière abandonnés ou que le détenteur doit éliminer pour ne pas porter atteinte à la santé, à la salubrité publique et à l'environnement est considérée comme déchets.

De ce fait, les boues seront régies par les mêmes exigences et obligations de la loi en matières de stockage, élimination et valorisation de déchets.

Statuts des boues industrielles selon la loi 28-00 :

La loi 28-00 a identifié trois classes de décharge selon le type de déchets.

- Décharge classe 1 : Déchets ménagers et assimilés ;
- Décharge classe 2 : Déchets industriels, médicaux et pharmaceutiques non dangereux, déchets agricoles, déchets ultimes et inertes ;
- Décharge classe 3 : Déchets dangereux.

Les boues issues de traitement des eaux usées industrielles peuvent être considérées comme étant des déchets industriels, destinés aux décharges de type classe 2 dans la loi 28-00, qui stipule que tout déchet résultant d'une activité industrielle, agro-industrielle, artisanale ou d'une activité similaire est dit déchet industriel. Vu que toutes les activités industrielles n'ont pas le même degré d'acuité et nocivité vis-à-vis de dégradation de ressources naturelles, on peut distinguer entre boues considérées comme **déchets industriels non dangereux** et celles classées comme **déchets dangereux**. Donc on peut constater que le statut (catégorie de déchet) de boues industrielles issues de traitement des eaux usées industrielles n'est pas figé, et sa détermination nécessite une intégration de plusieurs facteurs.

En application des articles 29 et 83 de la loi n° 28-00, les déchets sont inventoriés et classés, en fonction de leur nature et de leur provenance, dans un catalogue dénommé " Catalogue Marocain des Déchets ", ce catalogue a identifié les déchets dangereux et tenté de définir les caractéristiques du danger inhérent à ce type de déchets. Le tableau ci-après résume les dispositions réglementaires régissant les boues industrielles, issues de traitement des rejets liquides, dans le Catalogue Marocain des Déchets « CMD », dont l'extrait de ce dernier est mentionné dans la partie annexe de la présente étude, l'extrait se focalise surtout sur la mise en évidence du statut des boues issues du traitement des eaux usées industrielles, comme simple déchets industriels ou classées comme déchets dangereux.

Le caractère dangereux n'est cependant pas clairement défini : quel type de polluant ? quel niveau de concentration ? etc...

TABEAU 17 : DISPOSITIONS REGLEMENTAIRES REGISSANTES LES BOUES INDUSTRIELLES DANS LE CMD

Boues considérées comme déchets non dangereux	Boues considérées comme déchets dangereux
- Boues issues de traitement in situ des effluents de toutes les activités agro-alimentaires. - Boues issues du traitement in situ des effluents d'industrie de production et de transformation de papier, de carton et de pâte à papier - Boues provenant du traitement in situ des effluents d'industrie du cuir et de la fourrure (avec ou sans chrome) - Boues provenant de traitement in situ des effluents de toutes les activités industrielles non citées avant, et qui ne contiennent pas de substances dangereuses	Boues provenant de traitement in situ des effluents de toutes les activités industrielles non citées dans la rubrique de Boues considérées comme déchets non dangereux, et qui contiennent de substances dangereuses.

En résumé, la boue issue de traitement des effluents industriels est classée dans un premier ordre dans la catégorie des **déchets industriels**, si cette boue contient des substances dangereuses elle migre vers la catégorie de **déchets dangereux**. En mettant en valeur le constat du statut des boues, issues de traitement des effluents agro-alimentaires, dans le CMD on peut oser à classer cette boue comme **déchets assimilés** à ceux ménagers, mais ce postulat n'est vrai que sur la base d'une confirmation d'un rapport d'analyse exigé et élaboré par un laboratoire agréé.

Etant donné que les boues issues de traitement des effluents industriels sont considérées comme déchets selon la loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets, ces boues devraient être soumises aux exigences et dispositions de la présente loi en matière de stockage, traitement et élimination. On tentera de parcourir ci-après quelques destinations :

- Mise en décharge

La réglementation marocaine distingue trois classes de décharges contrôlées pour assurer une élimination environnementale des déchets. Ces classes sont comme suit :

- **Classe 1:** décharge contrôlée destinée aux déchets ménagers et assimilés ;
- **Classe 2:** décharge contrôlée destinée aux déchets industriels, médicaux et pharmaceutiques non dangereux, des déchets agricoles, des déchets ultimes et inertes ;
- **Classe 3:** décharge contrôlée destinée aux déchets dangereux.

Donc, étant donné que le statut de boues industrielles est clair dans la loi, on peut retenir que les boues industrielles classées comme déchets dangereux seront éliminées dans la décharge de classe 3. Pour celles considérées comme déchets industriels seront éliminées

dans la décharge de la classe 2, comme elles peuvent être, selon **l'article 48** de la présente loi, reçues par une décharge de la classe 1 moyennant certains aménagements spécifiques, ce qui ouvre une opportunité pour les industriels pour se débarrasser de leurs boues dans une décharge communale, à condition qu'une redevance soit payée à la commune par ces industriels générateurs de déchets.

Dans le cas où les boues industrielles (spécifiquement du secteur agro-alimentaire) sont acceptées comme déchets assimilés à ceux ménagers, ces boues peuvent être transportées et déposées dans des endroits séparés au sein des décharges contrôlées des déchets ménagers, selon **l'article 26** de la loi 28-00.

La contrainte majeure de la mise en décharge des boues réside dans la teneur élevée en eau. Ce qui peut engendrer différents problèmes, qui sont (i) la prolifération des odeurs et des rangers, (ii) la contamination des eaux souterraines par les lixiviations (iii) les émissions des gaz (méthane et dioxyde de carbone). Donc le traitement de ces boues est nécessaire afin d'assurer une élimination sûre et respectueuse de l'environnement (Cf. § 8).

- Incinération

L'incinération et la co-incinération sont aussi des options pouvant être préconisées comme voies d'élimination des déchets, mais pour les boues industrielles le co-processing dans les cimenteries semble être l'option la mieux indiquée pour leur élimination.

Ces procédés (incinération et co-incinération des déchets) font actuellement l'objet d'un projet de décret, qui définit les procédures administratives applicables aux installations d'incinération et de co-incinération, ainsi que les exigences techniques et les valeurs limites des émissions et des rejets issus de ces installations. Ces valeurs limites des émissions atmosphériques ont concernées à la fois les installations d'incinération des déchets, les cimenteries pratiquantes le co-processing ainsi que les installations thermiques de co-incinérations des déchets.

- Valorisation des boues en agriculture

L'article 83 de la loi 28-00 prévoit la fixation par voie réglementaire les normes et les prescriptions techniques relatives aux méthodes de valorisation des déchets.

Aucun projet de décret concernant ce volet n'est en cours, mais la définition de ces normes et ces prescriptions techniques, pour le cas des boues, doit être raisonnée en tenant compte : (i) des différentes formes de valorisation des boues en agriculture, sylviculture et dans la réhabilitation des sols dégradés et (ii) des impacts éventuels susceptibles d'avoir lieu sur les plantes, les sols et les ressources en eau souterraines et de surface.

La loi 28-00 présente toutefois quelques limites qui seront certainement comblées dans le futur proche :

- La classification des boues industrielles comme déchets assimilés à ceux ménagers sur la base d'une étude technique n'est faisable qu'en présence d'un référentiel de normes qui déterminent les seuils permettant de juger l'assimilation d'un déchet aux déchets ménagers, ce qui n'est pas prévu par l'article 26 qui postule cette possibilité d'assimilation.

- Le Catalogue Marocain des Déchets a fait l'objet de classer les déchets, y compris les boues issues de traitement des effluents industrielles, de désigner les déchets dangereux et de définir les caractéristiques du danger inhérentes à ce types de déchets (**Explosible, Comburante, Extrêmement inflammable, Facilement inflammable, Inflammable, Irritante, Nocive, Toxique, Corrosive, Infectieuse, Toxique vis-à-vis de la reproduction, Mutagène, Dangereux pour l'environnement**). Mais le terme danger reste vague sans détermination des seuils limites et quantifiables en différents éléments sources du danger, permettant de trancher entre boues industrielles considérées comme déchets dangereux et celle classées non dangereuses.

Statuts des boues urbaines selon la loi 28-00

Comme il a été mentionné auparavant, différents types de déchets sont définis par la loi 28/00. Toutefois, une difficulté persiste quant à la classification des boues urbaines parmi les autres catégories des déchets définis dans ladite loi. En effet, on ne peut pas conclure sur l'appartenance de ces boues à l'une ou l'autre des trois catégories de déchets.

Par ailleurs, l'article 26 de la loi stipule que les déchets provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales peuvent être assimilés aux déchets ménagers sur la base d'un rapport d'analyse exigé, en cas de nécessité, par la commune et élaboré par un laboratoire agréé.

L'absence d'un référentiel de normes qui détermine les seuils permettant de juger l'assimilation d'un déchet aux déchets ménagers, de surcroît son élaboration n'est pas prévue, empêche toute solution d'assimiler les boues issues du traitement des eaux usées urbaines aux déchets ménagers et assimilés.

En somme, on peut dire qu'à ce stade, le cadre réglementaire relatif à la gestion des boues résiduaires d'origine urbaine reste insuffisant ou pas clairement défini en raison de la difficulté de classer les boues urbaines dans la liste des déchets définis par la loi 28-00 d'une part, et l'absence d'une base de référentiel de normes qui détermine les seuils permettant de juger l'assimilation de ces boues aux déchets ménagers, d'autre part, de ce fait les gestionnaires des stations d'épuration urbaines trouveront des difficultés de gérer leurs boues conformément à la loi, en l'occurrence l'élimination de ces boues dans les décharges contrôlées, surtout avec l'immense quantité des boues urbaines qui seront en évolution perpétuelle consécutive aux avancées du programme national d'assainissement liquide.

L'absence des textes d'application comme les normes et les prescriptions techniques relatives à la mise en décharge contrôlées et à la valorisation qui précisent les modalités et les procédures de la mise en œuvre de plusieurs dispositions réglementaires indispensables pour une gestion rationnelle et durable des déchets en général et les boues urbaines en particulier révèle aussi un autre vide réglementaire.

13 Références bibliographiques

ADEME (2001) : Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture : Fiche technique 3832 élaborée par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration.

CEN European Committee for Standardization (Hrsg.) (2007): TC 308 Guide 10, 2007 Characterisation of sludges – Good practice for utilisation in agriculture ([http://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/BT_TF151_WI_CSS99044_PBDE_\(E\)_2762007.pdf](http://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/BT_TF151_WI_CSS99044_PBDE_(E)_2762007.pdf))

Department of Environmental Protection in State of Maine. 2003. Reed beds - Alternative Method for Sludge Treatment

Esser, D. 2003. Traitement des boues par Phragmicompostage Agence de Savoie

GTZ – IPP Consult, 2002. Sewage Sludge Conversion in Egypt

FNDAE, 1990. Les systèmes de traitement des boues des systèmes d'épuration dans les petites collectivités. Documentation technique N° 9.

Horn, S., Barr, K., McLellan, J., Bux, M.. 2004. Accelerated air-drying of sewage sludge using a climate-controlled solar drying hall. Brisbane Water, GPO Box 1434, Brisbane, QLD 4001, Australia et University of Hohenheim, Institute 495, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart, Germany

NN (2009) : Le Maroc des Régions 2008. Juin 2009, ISBN 798-9981-20-238-X,

Roy Consultants Group. 2000. Sludge Treatment with Reed Bed TechnologyFA5-02-96

Seginer and M. Bux. 2005. "Prediction of Evaporation Rate in a Solar Dryer for Sewage Sludge". Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript EE 05 009. Vol. VII. October, 2005.

Thermo-System Industrie- und Trocknungstechnik GmbH. Germany. Web Adress. www.thermo-system.com

Umweltbundesamt (2009) : Anforderung an die Novellierung der Klärschlammverordnung unter besonderer Berücksichtigung von Hygieneparameter, ISSN 1862-4804, Texte 05-09.

USACERL (Us Army Construction Engineering Research Laboratory), 1996. Alternative sludge dewatering techniques at wastewater treatment facilities