

Technologie de séchage solaire des boues des stations d'épuration des eaux usées et son impact sur la gestion des boues au Maroc

T.A.A. ARISILY¹, A. HAJJI¹

(Reçu le 19/05/2019; Accepté le 10/07/2019)

Résumé

La gestion des boues est un problème majeur dans les stations d'épuration des eaux usées (STEP), son coût peut aller jusqu'à 60% du coût d'exploitation de ces dernières. L'objectif de ce travail est de faire le point sur le séchage solaire de ces boues au niveau mondial et ensuite analyser son impact sur la gestion des boues au Maroc. Le séchage solaire des boues se fait dans des serres pouvant être ouvertes, fermées ou chauffées. La performance d'une serre est évaluée par sa capacité évaporatoire (CE). La CE varie de 2,2 à 12 kg d'eau évaporée par m² et par jour selon le climat du site d'installation, la saison de l'année et le type de technologie installée. La CE constitue aussi le paramètre majeur du dimensionnement des serres de séchage solaire. L'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer le coût d'exploitation par rapport au séchage conventionnel. Le coût d'investissement varie de 250 à 500 €/m² et le coût d'exploitation de 20 à 250 €/tonne de matière sèche (MS) par an, selon la technologie installée. L'utilisation des boues séchées comme biocombustible est de plus en plus adoptée. Concernant le Maroc, d'ici 2030, avec la finalisation du programme national d'assainissement (PNA), environ 900 millions de m³ d'eaux usées seront traitées par an. Ce traitement engendrera environ 2 millions de tonnes de boues par an à 25% de siccité. En matière de gestion des boues, la technologie utilisée consiste à installer des serres de séchage solaire comme c'est le cas des villes de Marrakech, Laayoune, Ben Guerir et Youssoufia. Dans l'hypothèse de traiter la moitié de la production de boues à l'horizon 2030 par le séchage solaire, l'estimation des coûts s'élève à 2 milliards de Dirhams (197 M€) pour l'installation et 750 millions de Dirhams (68 M€) pour une exploitation de 20 ans. Le séchage ne représente qu'une étape dans la gestion des boues, une ou plusieurs filières d'élimination et/ou de valorisation doivent être encore mises en place. Le co-compostage des boues avec les déchets verts est une application qui est en cours d'étude et de test au Maroc. Du côté de la réglementation, aucune loi spécifique à la gestion des boues des STEP n'est mise en place officiellement, mais d'autres lois sur la protection de l'environnement et de l'eau peuvent déjà être appliquées dans la gestion des boues.

Mots clés: Séchage solaire des boues, STEP, serre, valorisation énergétique, gestion des boues, Maroc.

Solar drying technology of wastewater sludge and its impact on Morocco sludge management

Abstract

Sludge management is a major problem in wastewater treatment plants (WWTPs), its cost can reach up to 60% of the global operating cost. The objective of this work is to review the solar drying technology of wastewater sludge worldwide and then analyze its impact on sludge management in Morocco. The sludge solar drying is done in greenhouses that can be open, closed or heated. The performance of a greenhouse is evaluated by its drying rate (DR). The DR varies from 2.2 to 12 kg of evaporated water per m² per day depending on the climate of the installation site, the season of the year and the type of technology installed. The DR is also a major parameter in the design of a sludge solar drying plant. The use of solar energy reduces the operating costs compared to conventional drying. The investment cost varies from 250 to 500 €/m² and the operating cost from 20 to 250 €/tonne of dry matter (DM) per year, depending on the technology installed. The use of dried sludge as a biofuel is increasingly being adopted. In Morocco, by 2030, with the completion of the national sanitation programme (PNA), about 900 million m³ of wastewater will be treated per year. This treatment will generate about 2 million tonnes of sludge per year with 25% dryness degree. In terms of sludge management, the technology used consists of installing solar drying greenhouses, as in the cities of Marrakech, Laayoune, Ben Guerir and Youssoufia. Assuming that half of the sludge production by 2030 will be treated by solar drying, the estimated costs are 2 billion Dirhams (197 M€) for the installation and 750 million Dirhams (68 M€) for a 20-year operation. Drying is only one step in sludge management, one or more disposal and/or recovery processes still need to be put in place. The co-composting of sludge with green waste is an application that is being studied and tested in Morocco. On the regulatory side, no specific laws for WWTPs sludge management are formally in place but other environmental and water protection laws can already be applied.

Keywords: Solar drying of sludge, WWTP, greenhouse, energy recovery, sludge management, Morocco

INTRODUCTION

Les stations d'épuration des eaux usées (STEP) sont des installations qui ont pour objectif de dépolluer les eaux usées. Cette dépollution est nécessaire pour protéger l'environnement ainsi que la santé publique. Avec la pénurie d'eau dans certaines régions, ainsi que la croissance de la population et des activités économiques, les eaux usées traitées des STEP sont considérées actuellement comme une source importante d'eau et pourront être utilisées dans l'agriculture ou d'autres applications convenables. Cependant, le traitement induit la production d'une quantité importante de boue dont la gestion constitue une problématique pour les STEP.

Au Maroc, la réalisation des STEP dans 330 villes et centres urbains d'ici 2020 figure parmi les objectifs du Plan National d'Assainissement (PNA) marocain (Ouahidi, 2012). Une station d'épuration des eaux usées produit des boues avec une humidité supérieure à 90% (Bianchini *et al.*, 2015) et une quantité d'environ 150 à 200 kg par équivalent habitant (EH) et par année (Cerra *et al.*, 2014). Ces boues doivent être évacuées des STEP. Avant de les envoyer vers leur destination finale, des traitements ayant pour objectifs d'éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement ainsi que la nuisance olfactive doivent être effectués. Les coûts des traitements et l'envoi vers une ou plusieurs destinations finales constituent le coût d'exploitation de la filière boue, ce coût est élevé et peut aller jusqu'à 60% du

¹ Unité de Recherche du Génie des Procédés et Environnement, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

coût d'exploitation totale de la STEP (Kurt *et al.*, 2015). Parmi les traitements appliqués, le séchage des boues est présent dans plusieurs STEP. Le séchage a l'avantage de diminuer considérablement le volume et la masse des boues à gérer grâce à l'élimination de l'eau. Cette diminution permettra une réduction du coût de stockage, de manutention et de transport. Mais le séchage est une opération énergivore, l'utilisation des séchoirs fonctionnant avec les énergies conventionnelles induit un coût élevé de cette opération. L'utilisation de l'énergie solaire est une solution intéressante et déjà appliquée sur plusieurs STEP actuellement.

L'objectif de ce travail est d'abord de faire le point sur le séchage solaire des boues au niveau international, et ensuite analyser son impact sur la gestion des boues au Maroc.

Dans la première partie de l'article, nous allons présenter des généralités concernant les serres, leurs composantes, leurs performances et leurs principales limites. Nous donnerons aussi un aperçu sur leurs dimensionnements, leurs consommations énergétiques, leurs coûts d'investissement et d'exploitation ainsi que sur la valorisation énergétique des boues séchées en tant que biocombustible. La deuxième partie de l'article, consacrée à la gestion des boues au Maroc, présente l'état actuel et une projection jusqu'en 2030 de la production des boues. On y donne aussi une analyse de la situation de la gestion des boues ainsi que les cadres réglementaires liés aux boues au Maroc.

SÉCHAGE SOLAIRE DES BOUES

L'utilisation de l'énergie solaire pour le séchage des boues date des années 1910, à Philadelphie aux États-Unis, sur des lits de séchage simple. C'est dans les années 1990 que l'idée du séchoir solaire ou serre pour les boues a été développée par les chercheurs allemands, Tilo Conrad et Markus Bux, professeurs à l'Institut Technique Agricole de l'Université de Hohenheim, dont les premières unités industrielles pour le traitement de boues d'épuration ont été mises en service en 1996 (Adler, 2008).

Généralités

Une serre est une structure formée par des parois (murs et toits) totalement ou partiellement transparentes et qui peut être complètement fermée ou ouverte. Initialement, la serre a été utilisée pour la production agricole (Prakash et Kumar, 2013) et dans les régions froides (Rodríguez *et al.*, 2010). Actuellement, elle est utilisée dans différents domaines tels que le chauffage des maisons, l'aquaculture, ainsi que le séchage à basse température des produits agricoles (Prakash et Kumar, 2013).

Les serres de séchage des boues, illustrées dans la figure 1, peuvent être classées comme suit:

Serre ouverte: circulation naturelle de l'air, ne possède pas de portes et avec des ouvertures sur la partie basse et haute afin de favoriser la convection naturelle;

Serre fermée: circulation forcée de l'air (ventilateurs), avec des entrées d'air (ventelles);

Serre fermée avec chauffage complémentaire: serre fermée qui utilise une autre source complémentaire de chauffage. Cela permet à la serre de fonctionner lors des jours sans soleil, d'avoir un séchage quasi-régulier durant toute l'année et de diminuer la surface de la serre (Veolia, 2014). Deux techniques sont principalement utilisées pour le chauffage complémentaire: le chauffage du plancher et le chauffage de l'air. Pour le chauffage du plancher, une source pratique d'énergie est l'eau traitée à la sortie de la station d'épuration, cette source est exploitée à l'aide d'une pompe à chaleur (Perret et Canler, 2014; Veolia, 2014). L'air peut être chauffé par un aérotherme (Perret et Canler, 2014).

Composantes d'une serre de séchage des boues

Les composantes d'une serre peuvent varier en fonction de plusieurs paramètres tels que la performance à atteindre, le budget, l'emplacement du site... Les principaux éléments sont présentés dans le tableau 1, élaboré à partir des informations de Perret et Canler (2014).

Des composantes optionnelles peuvent être installées en fonction des besoins, comme l'installation d'un plancher chauffant ou une unité de désodorisation de l'air en sortie de la serre.



Figure 1: a) Serre ouverte, b) Serre fermée, c) Serre chauffée

Tableau 1: Composantes d'une serre de séchage des boues

Composantes	Propriété/Matériaux	Rôles
Charpente	Inoxydable/acier galvanisé	Structure porteuse
Parois	Transparente/plastique, verre ou polycarbonate	Séparation avec le milieu extérieur, effet de serre
Plancher	Imperméable / béton	Réception de la boue
Ventilateurs d'extraction	Inoxydable/-	Renouvellement de l'air intérieur
Ventilateurs de déstratification	Inoxydable/-	Homogénéisation de l'air intérieur, amélioration de l'échange convectif
Système de retournement	Inoxydable/-	Renouvellement de la surface d'évaporation, prévention de l'anaérobie

Performance d'une serre et ses principales limites

La performance d'une serre est généralement évaluée par sa capacité évaporatoire (CE), qui est définie comme étant la masse d'eau évaporée par unité de surface et par unité de temps:

$$CE = \frac{\text{Masse d'eau évaporée par jour (kg/j)}}{\text{Surface de la serre (m}^2\text{)}}$$

Cette capacité est majoritairement dépendante des conditions climatiques (rayonnement solaire, température, humidité de l'air, ...), du lieu d'installation, donc elle est différente selon la situation géographique et les saisons de l'année, ainsi que du type de serre installé. Les résultats de certaines études sont donnés dans le tableau 2 pour donner un ordre de grandeur sur la performance de ces serres.

Bien que dans la majorité des études rapportées dans la littérature, les auteurs recommandent l'application du séchage solaire des boues pour le lieu où l'étude est effectuée, les limites suivantes sont aussi soulignées: son besoin en surface élevée (Amadou, 2007), sa dépendance aux conditions climatiques et sa capacité à ne produire que des boues aux alentours de 70% de siccité et de classe B. Ce type de boue peut présenter un risque dans certaines conditions, sauf avec l'ajout de sources de chauffage supplémentaires, mais augmentera le coût (US Water Environment Federation, 2014).

Dimensionnement des serres de séchage des boues

Le dimensionnement a pour finalité principale de définir la surface des serres à installer pour le séchage d'une production annuelle de boue donnée. Selon le type de serre à installer, la connaissance de la capacité évaporatoire est nécessaire pour le dimensionnement. Le dimensionnement peut se faire en prenant une moyenne annuelle des capacités d'évaporation mensuelles ou en se basant sur la capacité évaporatoire du mois le plus défavorable. L'utilisation de la moyenne annuelle est plus raisonnable car elle permet d'avoir une surface inférieure à celle de l'utilisation du mois le plus défavorable. En plus, pendant ces dernières périodes, la serre peut jouer un rôle de stockage.

Afin d'estimer la capacité évaporatoire, trois approches sont observées. La première est l'expérimentation à l'aide d'une serre pilote installée sur le lieu et des tests sont réalisés pendant au moins une durée d'une année afin de déterminer une capacité évaporatoire moyenne ainsi que les capacités évaporatoires de tous les mois. Cette démarche a été suivie pour l'étude réalisée en Grèce par Mathioudakis *et al.*, (2013). La deuxième approche consiste en le développement d'un modèle empirique ou un modèle boîte noire. Dans cette démarche, la capacité évaporatoire ainsi que les conditions environnementales

sont enregistrées lors de plusieurs expériences, ensuite un ou plusieurs modèles sont développés. Seginer et Bux (2006) présentent dans leur travail trois modèles empiriques pour la modélisation de la capacité évaporatoire en se basant sur les données d'une station de séchage solaire des boues de la ville de Füssen, Allemagne. Parmi ces trois modèles, le modèle multiplicatif développé représente le mieux les données enregistrées. Ce modèle est reporté dans l'équation suivante:

$$CE = \rho Q_v 1.962 \times 10^{-11} \times (R_o + 1100)^{2.322} (T_o + 13.0)^{1.292} (Q_v)^{-0.577} \times (Q_m + 0.0001)^{0.013} (\sigma + 0.26)^{-0.353}$$

Où, ρ (kg air/m³): masse volumique de l'air, Q_v (m³/(m²h)): débit d'extraction des ventilateurs, R_o (W/m²): radiation solaire, T_o (°C): température de l'air extérieur, Q_m (m³/(m²h)): taux de déstratification des ventilateurs, σ (kg MS/kg boue): siccité de la boue.

La troisième approche consiste en une modélisation des phénomènes de transfert de matière et de chaleur durant le séchage solaire des boues. À partir de cette modélisation, la capacité évaporatoire peut être déterminée en fonction des conditions climatiques du lieu à évaluer. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens ces dernières années. Parmi ces travaux, on peut citer celui de Slim *et al.*, (2008), qui a consisté en une modélisation du séchage solaire des boues assisté d'une pompe à chaleur, et celui de Ben Hassine *et al.*, (2017), qui est une modélisation et simulation des transferts de chaleur et de matière durant le séchage solaire des boues avec introduction des conditions climatiques réelles.

Consommation énergétique et coûts d'une serre

La consommation énergétique d'une serre est constituée de l'énergie thermique nécessaire pour l'évaporation de l'eau dans la boue et l'énergie électrique pour le fonctionnement des équipements. Pour les différents types de serre, sauf le cas des serres chauffées, l'énergie nécessaire pour l'évaporation de l'eau est assurée par le soleil donc ne constitue pas un coût pour l'exploitant. Ce gain en énergie constitue l'avantage majeur des serres par rapport au séchage thermique classique.

La consommation d'énergie électrique est fonction du type de serre (ouverte, fermée sans chauffage ou fermée avec chauffage) ainsi que le degré d'équipements (avec unité désodorisation ou pas) et leur mode de gestion (automatisée ou manuelle), mais d'une manière générale cette consommation est faible par rapport au séchoir thermique classique (Meyer-Scharenberg et Pöppke, 2010; Mathioudakis *et al.*, 2013). Le tableau 3, inspiré de Perret et Canler (2014), présente les ordres de grandeurs de la consommation énergétique des serres en fonction du type.

Tableau 2: Capacité évaporatoire des serres de séchage des boues

Pays/Ville	Type de serre	CE (kg m ⁻² j ⁻¹)	Saison	Référence
Maroc, Marrakech	Serre fermée sans chauffage	3,3	Moyenne annuelle	RADEEMA, 2015
France/-	Serre fermée sans chauffage	2,2	Moyenne annuelle	Perret et Canler, 2014
France/-	Serre fermée avec chauffage	4,7 à 5,5	Moyenne annuelle	Perret et Canler, 2014
Chine/Shanghai	Serre ouverte (Laboratoire)	3,3	Été	Zhao Lei et al., 2009
Chine/Shanghai	Serre ouverte (Laboratoire)	2,2	Automne	Zhao Lei et al., 2009
Grèce/Kavala	Serre fermée sans chauffage	8 à 12	Été	Mathioudakis et al., 2013

Le coût d'une serre est constitué de son coût d'investissement ou d'installation ainsi que son coût d'exploitation. Ces coûts sont principalement fonction du type de serre ainsi que son niveau d'équipements et d'automatisations.

Le coût d'installation est en grande partie constitué du coût du génie civil (préparation du site, route d'accès, plancher en béton, ...), de la serre (charpente, parois et ouverture), des équipements (ventilateurs, système de retournement, ...), des installations électriques (câbles, protections, éclairages, ...) et des systèmes de surveillance et de contrôle (Mathioudakis *et al.*, 2013).

Le coût d'exploitation est constitué par le coût énergétique de fonctionnement de la serre ainsi que de la maintenance et entretien.

D'après la littérature le coût d'investissement par unité de surface varie autour de 250 à 500 € m⁻² (Slim, 2008; Kurt *et al.*, 2015), et le coût d'exploitation varie autour de 40 à 105 € par tonne de matière sèche traitée (Meyer-Sharenbeg et Pöppke, 2014; Garanto, 2016).

Afin d'avoir plus de détails récents ces coûts ainsi que les installations, le tableau 4 présente des exemples d'installations réalisées ou des cas d'étude.

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES BOUES EN BIOCOMBUSTIBLE ET PLACE DU SÉCHAGE

À la fin des traitements des boues, elles peuvent être éliminées ou valorisées. L'élimination consiste en un dépôt des boues à la décharge, cette pratique est abandonnée progressivement dans plusieurs pays dû au caractère organique des boues, ou l'envoi des boues dans un centre d'incinération sans valorisation de la chaleur produite. Pour la valorisation, elle suit principalement deux voies: la valorisation en agriculture et foresterie, soit par épandage directe ou après compostage, ainsi que la valorisation

énergétique. Dans cette dernière, les boues peuvent être utilisées en tant que biocombustible comme dans le cas de l'incinération et production de chaleur et/ou d'électricité.

Ces dernières années, on constate un intérêt croissant de la valorisation de ces boues comme biocombustible afin de produire de l'énergie électrique et thermique dans des unités de valorisation énergétique des déchets (Bianchini *et al.*, 2015; Safuan *et al.*, 2014). Ces dernières sont souvent des unités d'incinération des déchets (ménagers et autres) permettant de produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Aux États-Unis, 460 de ces unités sont installées dans plusieurs États, avec plus de 13 Gigawatts électrique de puissance (Global Energy Observatory, 2017).

Le séchage des boues est une étape importante avant leur utilisation en tant que combustible. Les raisons sont qu'à l'état de faible siccité, les boues vont constituer des éléments de refroidissement pour ces destinations, comme les fours, les brûleurs ou les incinérateurs (Amadou, 2007), et la récupération directe de l'énergie n'est pas possible (Bianchini *et al.*, 2015). De plus, pour être un combustible de bonne qualité, les boues doivent contenir moins de 20% d'eau (Safuan *et al.*, 2014; Garanto, 2016). Le pouvoir calorifique inférieur des boues, jusqu'à 12,5 -15,8 MJ kg⁻¹ à 90% de siccité (Garanto, 2016), est ainsi comparable aux les autres biomasses utilisées comme combustible (Bianchini *et al.*, 2015), et elles peuvent être considérées comme un substitut au charbon (Garanto, 2016).

Dans son travail, Garanto (2016) présente le système de séchage solaire des boues «Passavant» dont le diagramme de flux est donné dans la figure 2, avec des données d'un projet de Pesa Medioambiente Sau comme exemple. Le système est composé de deux grandes parties: la partie séchage des boues sous serre et la partie production d'électricité. Les boues déshydratées (20 à 30% MS) sont séchées dans une serre. Les boues séchées (85% MS) sont ensuite utilisées pour alimenter le brûleur d'un système de

Tableau 3: Consommation énergétique des serres de séchage des boues (Perret et Canler, 2014)

Type de serre	Caractéristiques	Consommation (kWh/TEE*)
Serre ouverte	Sans ventilation et sans désodorisation	30 à 70
	Avec ventilation et sans désodorisation	70 à 100
Serre fermée	Avec ventilation et désodorisation biologique	100 à 200
	Avec ventilation et désodorisation chimique	Jusqu'à 1000
	Avec ventilation et sans désodorisation	150 à 250
Serre fermée avec plancher chauffant	Avec ventilation et sans désodorisation	150 à 250
	Avec ventilation et désodorisation	250 à 1100

*TEE: Tonne d'Eau Évaporée

Tableau 4: Coûts d'investissement et d'exploitation d'une serre de séchage des boues

Pays, Ville/Type de données	Maroc, Marrakech/Réelles	Grèce, Kavala/Étude	Nicaragua, Managua/Réelles	France, Villepreux/Étude
Taille de la STEP (*EH)	1 300 000	80 000	1 100 000	45 000
Production de boues (**tonne/an)	75 000	7 300	25 900	2 600
Surface (m ²) et type de la serre	42 320 Fermée	4 320 Fermée	8 850 Ouvert avec déstratificateurs	1 800 Avec plancher chauffant
Coût d'investissement (M€)	12,7	1,9	5,0	1,6
Coût spécifique (€/m ²)	301	440	565	881
Coût d'exploitation (€/tonne MS.an)	14	-	40	253
Références	RADEEMA, 2015; Thermo-System, 2017	Mathioudakis <i>et al.</i> , 2013	Meyer-Sharenbeg et Pöppke, 2014	SOFIES SA, 2014

*Équivalent habitant, **Tonne de boue brute par an

production d'électricité à vapeur. Le chauffage du plancher et de l'air de la serre est une possibilité en utilisant l'énergie provenant de la partie production d'électricité, comme la récupération de l'énergie à partir de l'eau utilisée pour condenser la vapeur saturée à la sortie de la turbine à vapeur. L'électricité produite peut être envoyée dans un réseau d'électricité. Les cendres produites peuvent être valorisées dans des cimenteries ou envoyés à la décharge.

GESTION DES BOUES AU MAROC

La santé publique, le respect de l'environnement et l'insuffisance de l'eau sont les facteurs qui ont poussé les autorités marocaines à concentrer plusieurs efforts ces dernières années sur l'assainissement et la gestion de l'eau. Plusieurs programmes ont été lancés dans ce sens depuis le début des années 2000. Parmi ces programmes on peut citer le programme national d'assainissement (PNA). Le PNA, qui a été lancé depuis 2005, a pour objectif principal la réhabilitation et l'extension du réseau d'assainissement, le branchement et le renforcement du réseau pluvial ainsi que la réalisation des stations d'épuration pour équiper 330 villes et centres urbains d'ici 2020 (Ouahidi, 2012). Il est inscrit dans ce programme que le niveau de raccordement global au réseau d'assainissement en milieu urbain à atteindre est de 80% en 2020 et 100% en 2030; et le volume des eaux usées traitées à atteindre est de 80% en 2020 et de 100% en 2030. Donc, d'ici trois à dix ans, le volume d'eau usée et le nombre de station d'épuration augmenteront quantitative-

ment, et d'après les prévisions le volume d'eau usée traitée atteindra les 900 Mm³/an à l'horizon 2030 (Ministère de l'agriculture et de la Pêche Maritime, 2011). Le traitement de ce volume générera inévitablement une quantité importante de boues qui nécessitent plus d'attention.

Production de boues

Actuellement, le Maroc compte plus de 131 STEP dont les principales technologies de traitement sont le lagunage naturel, la boue activée et le lagunage aéré (Netherlands Enterprise Agency, 2018). Les détails sur les technologies ainsi que les capacités de traitement de ces STEP, qui sont enregistrés en fin 2016, sont présentés dans le tableau 5.

Les traitements des eaux usées génèrent une quantité importante de boue. En 2014, cette quantité était d'environ 98 000 tonnes de MS (Netherlands Enterprise Agency, 2018), c'est-à-dire environ 392 000 tonnes de boues humides après déshydratation mécanique, et estimée à 110 000 tonnes de MS, c'est-à-dire 440 000 tonnes de boues humides après déshydratation mécanique, à l'horizon 2020.

En utilisant la valeur typique maximale du Maroc de DOB5, qui est de 560 mg/L, ainsi qu'en admettant que le traitement d'une capacité d'un EH produira 50 g de MS par jour, le traitement des 900 millions de m³ d'eaux usées à l'horizon 2030 produira environ 420 000 tonnes de MS ou 1 680 000 tonnes de boues humides après déshydratation mécanique. Cette quantité a été estimée à 500 000 tonnes de MS ou 2 000 000 de tonnes de boues humides après

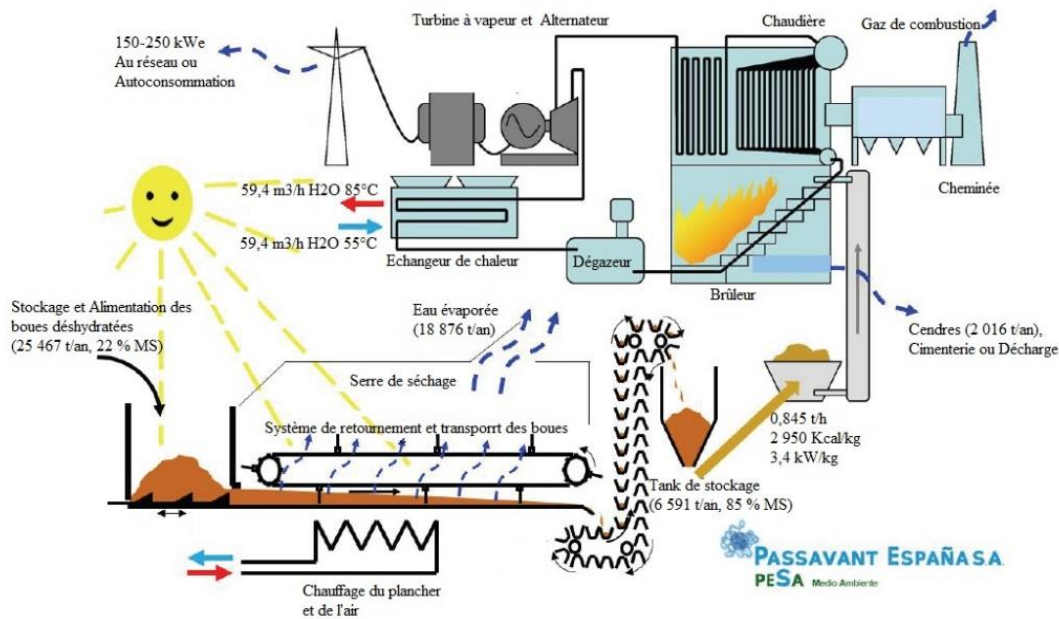


Figure 2: Diagramme de flux du système de séchage solaire des boues Passavant (Garanto, 2016)

Tableau 5 : Technologies, Capacité de traitement et nombre des STEP au Maroc (Netherlands Enterprise Agency, 2018)

Technologie	Capacité de traitement (m ³ /jour)	Nombre	Pourcentage en nombre (%)	Pourcentage en capacité (%)	Capacité moyenne
Lagune naturelle	193 869	80	61	9	2 423
Boue activée	348 007	18	14	15	19 334
Lagune aérée	78 990	10	8	3	7 899
Pré-traitement et rejet en mer	1 571 131	8	6	70	196 391
Lit bactérien	32 202	8	6	1	4 025
Infiltration Percolation	32 419	4	3	1	8 105
Autres	3 030	3	2	0,1	1 010
Total	2 259 648	131	100	100	17 249

déshydratation mécanique par le Bureau d'études Phénixa (Phénixa, 2010). Ces estimations de production de boues sont synthétisées dans le tableau 6.

L'évolution de la production de boues est représentée dans la Figure 3, qui a été obtenue à partir d'une compilation des données de Netherlands Enterprise Agency (2018) et du Bureau d'étude Phénixa (2010), en admettant une augmentation linéaire entre les années 2020 et 2030.

Dans la Figure 3, on observe que la quantité des boues estimée à l'horizon 2030 est augmentée d'un facteur d'environ 4,5 par rapport à celle de 2020. Cette augmentation est expliquée par la réalisation des objectifs du PNA à cet horizon.

Gestion des boues au Maroc et analyse de l'impact du séchage solaire

Au Maroc, les devenir des boues ne sont pas encore définis et constituent une problématique pour les gestionnaires des STEP. En général, ces boues sont évacuées dans les décharges, comme le cas de la STEP de Fès (Afgane, 2016) et l'a été pour la STEP de Marrakech, ou à des endroits proches des STEP comme le cas de Nador, à quelque mètre de la lagune (Zerrouqi, *et al.*, 2011). Ces pratiques présentent des risques pour l'environnement et influencent le fonctionnement de la décharge. En effet, la pollution du sol et de la nappe phréatique par les lixiviats ainsi que la production des gaz à effet de serre (non contrôlée) issue de la décomposition de ces boues sont possibles, et ces phénomènes sont accélérés par la pluie (Zerrouqi, *et al.*, 2011; Afgane, 2016). Pour la décharge, les boues peuvent induire le mal fonctionnement des engins utilisés, produire de mauvaises odeurs et du gaz toxique (H_2S) pour les ouvriers (Afgane, 2016).

Réalisations et projets relatifs aux boues

Afin de diminuer les effets néfastes des pratiques mentionnées ci-dessus sur l'environnement et sur les décharges, des installations des serres de séchage des boues ont été réalisées, comme dans le cas des villes de Marrakech, Yousoufia et Ben Guerir. D'autres projets d'installations sont en cours de réalisation, comme le cas de la ville de Layoune. La figure 4 présente les serres de séchage des boues de la ville de Yousoufia et de Ben Guerir (Thermo-System, 2017).

L'installation de la ville de Marrakech (Figure 5) représente actuellement la plus grande installation solaire pour le séchage des boues au monde. Cette installation a été réalisée par les entreprises Thermo-System et Waterleau, avec une surface de séchage de 40 320 m² et a la capacité de traiter 75 000 tonnes de boues avec une siccité de 22% par année. L'objectif est de sécher les boues jusqu'à 80% de siccité. Le coup d'investissement de cette installation est de 140 millions de Dirhams (12,7 M€). Le coup d'exploitation est environ 150 DH/t MS (14 €/t MS) par an (Thermo-System, 2018).

L'installation de ces séchoirs solaire des boues représente l'état principal actuel des réalisations dans la gestion des boues au Maroc, ce qui fait que beaucoup d'opportunités sont présentes pour différents acteurs dans cette filière, notamment dans la valorisation de ces boues.

Un autre projet en cours de discussion et d'essai au Maroc durant ces dernières années est le co-compostage des boues des STEP avec les déchets verts. Cette voie n'est pas officiellement pratiquée sur les boues des STEP mais des études et des essais prometteurs ont été réalisés. On peut citer le projet de recherche et d'expérience pilote mené par le laboratoire d'écologie et d'environnement (L2E) de la faculté des sciences Semlalia de Marrakech,

Tableau 6: Estimation de la production de boues au Maroc

Année	2014	2020	2030
Production de boue humide à 25% de MS (tonnes/an)	392 000	440 000	2 000 000

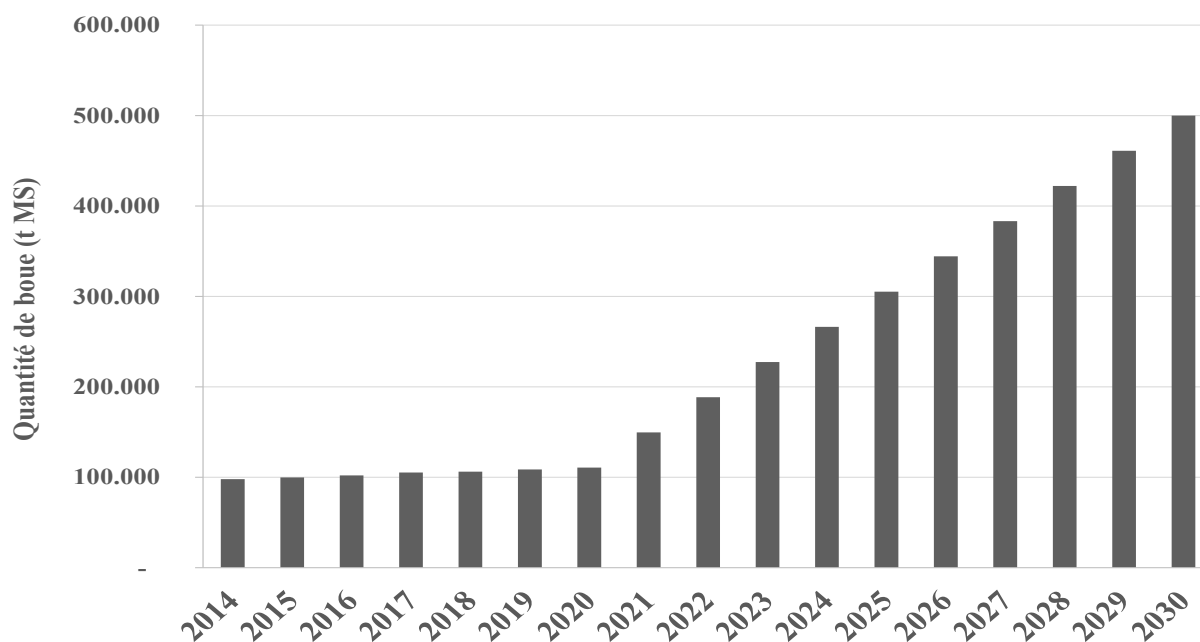


Figure 3: Estimation de la production des boues au Maroc

lequel a été financé par le ministère délégué chargé de l'Environnement et soutenu par de nombreux partenaires. Cette expérience pilote a été réalisée dans la STEP de la ville de Chichaoua (Jacob, 2016). La figure 6 représente cette plateforme pilote.

Limites du séchage solaire et réflexion sur les autres voies

Les serres solaires ont montré leurs avantages dans les régions à fort ensoleillement, comme le cas du Maroc. Cela diminue fortement le coût d'exploitation de la filière boue, notamment sur l'énergie, le stockage et le transport. Mais le coût d'investissement de ces serres est élevé ainsi que leurs besoins en surface. Dans le cas de la production des boues à l'horizon 2030, c'est-à-dire les 500 000 tonnes de MS, une estimation des coûts sur la base de l'installation des serres de Marrakech est donnée ci-après. En tenant compte du fait que toutes ces boues ne seront pas forcément traitées par le séchage solaire, nous allons faire une estimation sur la moitié de la quantité à traiter, c'est-à-dire les 250 000 tonnes de MS. Un coût d'investissement d'environ 2 milliards de Dirhams (197 M€) ainsi qu'un coût d'exploitation sur 20 ans d'environ 750 millions de Dirhams (68 M€) sont à prévoir. Il est à mentionner que le prix des terrains ne sont pas inclus dans cette estimation et ne sont pas souvent inclus dans les coûts d'installation des serres publiés.

Du fait de ces coûts élevés, une attention particulière doit être portée au dimensionnement de ces serres, notamment sur la précision de la méthode. Le séchage solaire des boues est une opération complexe, donc une modélisation assez délicate. Les constructeurs se basent souvent sur leurs expériences afin d'améliorer leurs méthodes de dimensionnement, mais pour le Maroc ces expériences sont à ses débuts donc des études sont encore nécessaires afin d'établir une méthode de dimensionnement acceptable.

D'un autre côté, le séchage des boues n'est qu'une étape intermédiaire qui permettra principalement la diminution de la quantité de boues à gérer, donc les coûts, ainsi que les pollutions environnementales. D'après ces analyses, les gestionnaires de boues au Maroc ont encore besoin d'identifier la ou les voies d'élimination et/ou valorisation optimales pour leurs STEP. Plusieurs possibilités d'élimination et de valorisation sont possibles, certaines sont des technologies qui sont déjà éprouvées et d'autres sont en cours de développement. Des précautions doivent être alors prises pendant leurs choix. Parmi ces technologies on peut citer l'incinération et valorisation de la chaleur produite en énergie thermique ou électrique, le compostage et l'épandage agricole, l'oxydation par voie humide...

L'installation de ces technologies est onéreuse, et avec les multitudes de choix qui existent, une approche rationnelle doit être suivie afin d'arriver à l'élaboration d'une voie d'élimination et/ou de valorisation optimale.

Réglementation et Stratégie Nationale

Actuellement, sur le plan national, aucune réglementation ni stratégie spécifique à la gestion des boues des STEP n'est mise en place officiellement, et ces lacunes constituent des obstacles pour le développement de ce secteur (Netherlands Enterprise Agency, 2018). L'élaboration de ces réglementation et stratégies trouvent leur importance



Figure 4: Serres de séchage des boues à Youssoufia (a) et Ben Guérir (b), Maroc (Thermo-System, 2017)



Figure 5: Serres de séchage des boues à Marrakech (Thermo-System, 2019)



Figure 6: Plateforme pilote de co-compostage de la STEP de Chichaoua, Maroc (Jacob, 2016)

aussi bien dans la protection de l'environnement et de l'eau que dans l'aide aux gestionnaires des STEP. En fixant les normes à suivre, les gestionnaires sauront quoi faire pour les boues et les risques sur l'environnement seront maîtrisés. D'un autre côté, cela diminuerait la réticence de la population envers l'utilisation de ces boues dans d'autres secteurs, comme par exemple en agriculture dans le cas où elles respectent les normes.

Pour le moment, d'autres lois sur la protection de l'environnement et de l'eau peuvent déjà être appliquées dans la gestion des boues. On peut mentionner les trois lois suivantes (Afgane 2016): la Loi n°28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination, la Loi 10-95 sur l'eau et la Loi 11-03 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement.

Selon la Loi n°28-00, les boues ont le statut de déchet industriel. Ce dernier est défini comme «tout déchet résultant d'une activité industrielle, agro-industrielle, artisanale ou d'une activité similaire» (Loi 28-00, 2006). Cette loi a pour objet de «prévenir et de protéger la santé de l'homme, la faune, la flore, les eaux, l'air, le sol, les écosystèmes, les sites et paysages et l'environnement en général contre les effets nocifs des déchets» (Loi 28-00, 2006).

La Loi 10-95 sur l'eau s'intéresse à l'organisation de «la répartition et le contrôle de l'utilisation des ressources en eau et d'en assurer également la protection et la conservation» (Loi 10-95, 1995).

La Loi 11-03 a pour objet «d'édicter les règles de base et les principes généraux de la politique nationale dans le domaine de la protection et de la mise en valeur de l'environnement». Il est inscrit dans cette loi des règles et principes qui visent à protéger l'environnement contre toutes formes de pollution et de dégradation, quelle qu'en soit l'origine (Loi 11-03, 2003).

Afin d'élaborer des Lois spécifiques à la gestion des boues, les autorités marocaines peuvent s'inspirer des lois et/ou directives qui sont déjà appliquées dans d'autres pays. On peut citer la directive 86/278 de la Communauté économique européenne relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture (Le conseil des communautés Européennes, 1986). On peut aussi citer la partie 503, titre 40 du Code des Régulations Fédérales des États-Unis, qui regroupe des normes pour l'utilisation ou l'élimination des boues d'épuration. Cette partie établit des normes, comprenant des exigences générales, des limites de polluants, des pratiques de gestion et des normes opérationnelles, relatives à l'utilisation finale ou à l'élimination des boues d'épuration appliquées sur le sol, placées sur un site d'élimination en surface ou brûlées dans un incinérateur (U.S e-CFR, 2019).

CONCLUSION

À l'issue de ce travail qui a pour objectif de faire le point sur le séchage solaire des boues au niveau mondial et ensuite analyser son impact sur la gestion des boues au Maroc, une classification des serres de séchage des boues a été présentée. On distingue les serres ouvertes, fermées et chauffées. Une serre peut être composée d'éléments suivants: la charpente (matériaux inoxydables recommandés),

les parois (plastique, verre ou polycarbonate), le plancher (généralement en béton), les systèmes de ventilation (d'extraction et de déstratification), le système de retournement et d'autres composantes optionnelles comme une installation de gestion d'odeur. La performance d'une serre est fonction des conditions climatiques du lieu, des saisons et du type de serre installée. En moyenne, une serre peut avoir une capacité évaporatoire comprise entre 2,2 et 12 kg d'eau évaporée par m² et par jour. La connaissance de cette capacité est nécessaire pour le dimensionnement des serres, elle peut être déterminée par expérience, par une modélisation empirique ou par la modélisation des phénomènes de transfert de matière et de chaleur durant le séchage solaire des boues. La consommation énergétique d'une serre varie de 20 à 1 100 kWh par tonne d'eau évaporée selon le type et les éléments constituant la serre. Le coût d'investissement par unité de surface varie autour de 250 à 500 €, et le coût d'exploitation varie autour de 20 et 250 € par tonne de matière sèche traitée, tous les deux coûts sont fonction du type de serre et ses éléments constituant. Bien que le séchage solaire soit une méthode caractérisée par un faible coût énergétique et non polluante pour l'environnement, il présente les principales limites suivantes: une forte dépendance aux conditions climatiques et une nécessité d'une grande superficie. Sur la finalité des boues, trois voies sont possibles, l'élimination, la valorisation en agriculture et en foresterie ainsi que la valorisation énergétique. Le séchage a une place importante dans la valorisation énergétique car à 90% de siccité, le pouvoir calorifique inférieur des boues s'élève jusqu'à 12,5 – 15,8 MJ kg⁻¹. Dans cet état, les boues peuvent être utilisées comme un substitut du charbon. Une solution prometteuse développée actuellement pour valoriser ces boues est leur utilisation comme combustible dans des unités de valorisations énergétiques. Ces dernières sont des unités de production d'électricité et/ou de la chaleur à partir des déchets.

Sur la gestion des boues au Maroc, la quantité produite augmentera avec l'avancement du PNA. Cette quantité est estimée à 2 millions de tonnes de boues à 25% de siccité par an à l'horizon 2030. L'installation des serres sur des STEP au Maroc permettra la diminution de la quantité de boue à traiter et limitera leurs impacts environnementaux. Ces installations représentent l'état actuel des réalisations dans la gestion des boues au Maroc, ce qui fait que beaucoup d'opportunités sont présentes pour différents acteurs dans cette filière, surtout dans la valorisation de ces boues. Dans l'hypothèse de traiter la moitié de la production de boues à l'horizon 2030 par le séchage solaire, l'estimation des coûts s'élève à environ 2 milliards de Dirhams (197 M€) pour l'installation et à 750 millions de Dirhams (68 M€) pour une exploitation de 20 ans. Le séchage ne représente qu'une étape dans la gestion des boues, une ou des filières d'élimination et/ou de valorisation doivent être encore mises en place. Le co-compostage des boues avec les déchets verts est une application qui est en cours de discussion et d'étude au Maroc mais qui n'est pas encore adoptée officiellement. Du côté de la réglementation, aucune loi spécifique à la gestion des boues des STEP n'est mise en place officiellement, mais d'autres lois sur la protection de l'environnement et l'eau peuvent déjà être appliquées dans la gestion des boues telles que la Loi 28-00, la Loi 10-95 et la Loi 11-03.

BIBLIOGRAPHIE

- Adler E. (2008). Les boues d'épuration se dorent la pilule au soleil. *Repères*, pp. 86-87.
- Afgane R. (2016). Valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées Fès (STEP-Fès). Mémoire de fin d'étude Master Géo-ressources et Environnement, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.
- Amadou A. (2007). Modélisation du séchage solaire sous des boues des stations d'épuration urbaines. Thèse de doctorat, Strasbourg, France.
- Hassine N.B., Chesneau X., Laatar A. H. (2017). Modélisation and Simulation of Heat and Mass Transfers during Solar Drying of Sewage Sludge with Introduction of Real Climatic Conditions. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10: 651-659.
- Bianchini A., Bonfiglioli L., Pellegrini M., Saccani C. (2015). Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant. *Waste Management* 42: 159-165.
- Phénixa (2010). Réutilisation des eaux traitées et valorisation des boues. Consulté le Novembre 2018, sur <http://www.phenixa.com/reference/hydraulique-ref/reutilisation-des-eaux-traitees-et-valorisation-des-boues-ref/>
- Cerra I., Desagnat M., Dubart R., Juven L., Zhou N., Ziani, H. (2014). Traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités. Montpellier, France.
- Chen Z., Afzal M.T., Salema A.A. (2014). Microwave Drying of Wastewater Sewage Sludge. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2: 282-286.
- Ferreira D. (2006). L'enclavement de la montagne marocaine: conséquences sur les peuples de montagne et actions possibles pour le désenclavement. Récupéré sur Base.d-p-h: <http://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-7052.html>
- Garanto O. (2016). Solar Sludge Drying Technology and Dried Sludge as Renewable Energy-Closing the Loop. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4: 221-229.
- Global-Energy-Observatory (2017). GlobalEnergyObservatory. Consulté le Janvier 2017, sur <http://globalenergyobservatory.org/list.php?db=PowerPlants&type=Waste>
- Jacob S. (2016). Chichaoua un projet de compostage de boues 100% marocain. Récupéré sur L'Economiste.com: <https://www.leconomiste.com/article/1000134-chichaoua>
- Jolis D., Sierra N. (2014). Enhanced biosolids drying with a solar thermal application. *J. Fundam. Renewable Energy Appl*, 4: 142.
- Kurt M., Aksoy A., Sanin F. D. (2015). Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. *Water research*, 82: 47-57.
- Le conseil des communautés Européennes (1986). Directive du conseil relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. *Journal officiel des communautés européennes*, 6-12.
- Zhao L., Chen D., Xie J. (2009). Sewage sludge solar drying practise and characteristics study. In 2009 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1-5). IEEE.
- Loi-10-95. (1995, Septembre 20). Loi sur l'eau. *Bulletin officiel* n°4325.
- Loi-11-03. (2003, Juin 19). Loi relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement. *Bulletin officiel* n°5118.
- Loi-28-00. (2006, Décembre 7). Loi relative à la gestion des déchets et à leur élimination. *Bulletin Officiel* n°5480.
- Mathioudakis V.L., Kapagiannidis A.G., Athanasoulia E., Paltzoglou A.D., Melidis, P., Aivasidis A. (2013). Sewage sludge solar drying: Experiences from the first pilot-scale application in Greece. *Drying Technology*, 31: 519-526.
- Meyer-Scharenberg U., Pöppke M. (2010). Large-scale solar sludge drying in Managua/Nicaragua. *Wasser und Abfall*, 12: 26.
- Ministère de l'agriculture et de la Pêche Maritime (2011). Projet de Renforcement des Capacités sur l'Utilisation sans danger des Eaux Usées en Agriculture.
- Netherlands Enterprise Agency (2018). Business Opportunities report for reuse of wastewater in Morocco.
- Ouahidi H. (2012). Fiche de projet de coopération dans le secteur de l'eau au Maroc. Consulté le Janvier 2016, sur AGIRE Maroc: www.agire-maroc.org/fiches-projets-cooperation.
- Perret J.M., Canler J.P. (2012). Le séchage solaire des boues de station d'épuration: état de l'art et retours d'expériences. *Techniques Sciences Méthodes*, 11: 111-130.
- Pirasteh G., Saidur R., Rahman S.M.A., Rahim N.A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31: 133-148.
- Prakash O., Kumar A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29: 905-910.
- RADEEMA, R. (2015). AO n° 134/15/ASST: Réalisation et exploitation d'une unité de séchage solaire des boues de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech. Dossier de consultation des entreprises, Pièce n°4.2 PTP données générales.
- Rodríguez E., Kubota C., Giacomelli G.A., Tignor M.E., Wilson S.B., McMahon M. (2010). Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Computers and electronics in agriculture*, 70: 105-116.
- Safuan Z.M., Hassanb S., Faizairic M. (2014). Thermal Drying of Malaysian Sewage Sludge. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 3: 1-5.
- Seginer I., Bux M. (2006). Modeling solar drying rate of wastewater sludge. *Drying Technology*, 24: 1353-1363.
- Slim R., Zoughaib A., Clodic D. (2008). Modeling of a solar and heat pump sludge drying system. *International journal of refrigeration*, 31: 1156-1168.

SOFIES (2014). Étude de faisabilité d'un projet pilote d'écologie industrielle et territoriale: Étude de la valorisation des boues de la station d'épuration de Villepeux. www.plainedeversailles.fr

Thermo-System (2017). Communication personnelle.

Thermo-System (2018). La plus grande installation de séchage solaire du monde à Marrakech entre en service. Consulté le Octobre 2018, sur <http://www.thermo-system.com/fr/entreprise/annonces-actuelles/annonces-actuelles-detail/news/weltgrosste-solare-trocknungsanlage-in-marrakech/>

Thermo-System (2019). Actualités-Réalisations. Consulté le Mars 2019, sur [thermo-system.com](https://www.thermo-system.com/index.php/fr/actualites): <https://www.thermo-system.com/index.php/fr/actualites>

U.S e-CFR (2019). Part 503, Title 40, Standards for the use or disposal of sewage sludge. United States.

Veolia. (2014). Traitement des boues. Consulté le janvier 2017, sur http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/2829,Brochure_Solia_OTV_LR.pdf

Water-Environnement-Federation (2014). Drying of Wastewater Solids. Consulté le Janvier 2017, sur <http://www.wrrfdata.org/NBP/DryerFS/DryingWWsolids.html>

Zerrouqi Z., Sbaa M., Chafi A., Elhafid D. (2011). Investigation du lessivage des stocks de boues d'épuration de Nador: Étude sur terrain et apport de l'expérimentation. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 24: 371-381.