



HAL
open science

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne de boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

Céline Davidas

► **To cite this version:**

Céline Davidas. Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne de boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03574861

HAL Id: dumas-03574861

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03574861v1>

Submitted on 15 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne des boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

DAVIDAS Céline

Promotion Bretagne

Spécialisation

3^{ème} année

Exploitation / Travaux

Tuteur École

M. LAURENT Julien

Maître de conférences ENGEES
& Laboratoire Icube

Maître d'Apprentissage

M. PYZAK Daniel

Chef du service Traitement
des Eaux Usées - MEL

SEPTEMBRE 2020

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) pour l'accompagnement mis en place durant ces trois années d'apprentissage et spécifiquement durant cette importante période qu'est le travail de fin d'étude.

L'opportunité m'a été donnée d'intégrer le service Traitement des Eaux Usées (TEU) de la Métropole Européenne de Lille. Que mon maître d'apprentissage, M. PYZAK Daniel, Chef du service TEU, trouve ici l'expression de ma gratitude pour son entière disponibilité.

Je remercie M. LAURENT Julien, Maître de conférences ENGEES & chercheur au Laboratoire Icube mais aussi mon tuteur-école pour cette étude, pour son expertise en matière de traitement des eaux usées. Il a su m'orienter afin que je suive le fil de ma problématique.

Les collaborations fructueuses avec Mme DEHON Claire, Ingénieure process eau assainissement de l'unité fonctionnelle Exploitation des Stations d'épuration, et M. NGUYEN Duy Tai, Chargé de mission de valorisation des boues de la même unité fonctionnelle, m'ont été d'un grand secours. Je reste touchée par leur bienveillance et leur amitié tout au long de ces trois années.

J'associe à mes remerciements M. HOURIEZ Eric, Conducteur Etudes et Travaux de l'unité fonctionnelle Etudes et Travaux, qui a pris soin de répondre avec précision à tous mes questionnements, sans oublier :

- Mme MOTTE Catherine, Cheffe de service adjointe du service TEU et Responsable de l'unité fonctionnelle Etudes et Travaux, qui s'est montrée disponible pour répondre à mes questions et m'orienter vers des personnes clés.
- M. JACQUIN Maxime, électromécanicien de l'unité fonctionnelle Pilotage et Régie Directe, pour sa disponibilité pour effectuer les visites de terrain et échanger en matière de traitement de boues des stations d'épuration dont il a la charge.

Je souhaite remercier toutes les personnes du service Traitement des Eaux Usées avec qui j'ai pu échanger et apprendre.

Mon tuteur école, M. WANKO Adrien, Maître de conférences ENGEES & Laboratoire Icube, n'est pas oublié. Il a su m'orienter durant ces trois années d'apprentissage et ses bons conseils et son encadrement m'ont été d'une aide précieuse.

Enfin, que tous ceux qui de près ou de loin ont contribué, dans leurs champs de compétences respectifs, à me fournir des conseils ou des ressources tant au niveau moral, pédagogique que technique, soient amplement remerciés.

RÉSUMÉ

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne des boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier.

Le devenir des boues liquides d'épuration est une problématique qui se pose dès la conception des stations de traitement des eaux usées. Il faut dès lors choisir et dimensionner la filière de traitement des boues qui sera la plus pérenne et adaptée. Cependant, dans un contexte d'intégration de nouvelles communes à son territoire, la Métropole Européenne de Lille (MEL) a dû reprendre à sa charge la gestion de deux stations d'épuration (Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier) dont les filières de traitement des boues liquides ne correspondaient pas aux orientations de son schéma directeur. Pour pallier à ce problème, elle a mis en place une solution de déshydratation de boues par unités mobiles mais celle-ci s'avère coûteuse. De plus, le compostage prévu pour ces boues est confronté à des évolutions réglementaires.

La résolution de cette problématique étant plus que nécessaire, j'ai eu l'opportunité de m'y investir et de mener une étude en plusieurs phases.

La première phase de cette étude a permis de dresser un état des lieux de la gestion des boues d'épuration par la MEL et de rassembler les données scientifiques, techniques et réglementaires nécessaires à la compréhension de la thématique « boues d'épuration ». Le fonctionnement actuel des stations ciblées a aussi été analysé d'un point de vue technique et financier ainsi que les évolutions attendues en termes de charges à traiter. La deuxième phase a été de proposer des solutions alternatives et de définir leurs faisabilités techniques et leurs impacts financiers et environnementaux. L'application de la méthode Electre I a permis d'analyser ces propositions et de déterminer le choix de la filière à mettre en œuvre. Et enfin, en dernière étape, la filière choisie a été dimensionnée et présentée.

ABSTRACT

Choice and sizing of a long-term treatment sector for liquid sludge from Radinghem-en-Weppes and Bois Grenier sewage treatment plants

Starting from every wastewater treatment plant design project, long-term treatment of sewage sludge is among the main issues of a project owner. Therefore, choice and sizing of the sludge treatment process have to be well thought out in order to select the most suitable solution. However, in a context of integration of new cities into its territory, the European Metropolis of Lille had to take over the management of two modest sewage treatment plants (Radinghem-en-Weppes and Bois Grenier) whose treatment sectors liquid sludge did not fit with its master plan. To overcome this problem, the Metropolis sets up a solution for dewatering sludge using dewatering sludge mobile units, but that is costly. Moreover, the composting planned for this sludge is facing regulatory changes.

The resolution of this problem being more than necessary, and I conduct a multi-phases study.

The first phase of this study made it possible to draw up an inventory of the sewage sludge management by the MEL and to gather the scientific, technical and regulatory data necessary for the understanding the "sewage sludge" topic. The current operation of the target stations was also analyzed from a technical and financial point of view as well as the expected developments in terms of loads to be processed. The second phase was to suggest alternative solutions and define their technical feasibility, their financial and environmental impacts. The application of the Electre I method made it possible to analyze these proposals and determine the choice of the sector to be implemented. Finally, in the last phase, the chosen sector was sized and presented.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	3
ABRÉVIATIONS, SIGLES ET SYMBOLES	6
LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES GRAPHIQUES	8
LISTE DES FIGURES	8
INTRODUCTION	9
1. Contexte et objectifs de l'étude	10
1.1. La MEL : gestionnaire du cycle de l'eau de son territoire	10
1.2. Contexte historique des boues d'épuration de la MEL	11
1.3. Des évolutions en 2017 : intégration de nouvelles stations d'épuration au territoire de la MEL	13
1.4. Des réflexions à mener pour l'avenir des boues : L'objectif de cette étude	13
1.5. Caractéristiques et évolutions attendues pour les stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier	14
2. Compréhension de la thématique : les boues de leur origine à leur valorisation	19
2.1. Origine et caractérisation des boues d'épuration	19
2.2. Production et valorisation des boues en France et à la MEL	21
2.3. L'épandage agricole des boues d'épuration	22
2.4. Le compostage des boues d'épuration	25
2.5. Filière de traitement des boues pour les petites stations d'épuration de la MEL	26
3. Etat de lieux des filières de traitement des boues liquides de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier	28
3.1. Stockage et épaissement dans le silo à boues	29
3.2. Déshydratation par une Unité Mobile de Déshydratation de Boues (UMDB)	29
3.3. Compostage	30
3.4. Gestion de la file boue par les équipes d'exploitation	30
3.5. Caractérisation des boues traitées : en termes de qualité et quantité	30
3.6. Déshydratation ponctuelle par UMDB : un coût élevé à optimiser	31
3.7. Coûts de la filière de traitement de boues liquides	33
3.8. Emissions de gaz à effet de serre de la filière	34
4. Proposition de filières alternatives à l'UMDB	35
4.1. Déshydratation mécanique : filtre de type presse à bandes combiné d'une table d'égouttage	36
4.2. Lits de séchage plantés de roseaux	39

4.3. Mélange de boues de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier avec les boues d'Houplin Ancoisne	43
4.4. Choix de la filière alternative adaptée aux STEP ciblées	51
5. Dimensionnement de la filière choisie : Lits de Séchage Plantés de Roseaux	54
5.1. Production de boues	54
5.2. Charge surfacique.....	55
5.3. Nombre d'unité	55
5.4. Extraction des boues	56
5.5. Composition des lits	56
5.6. Alimentation et drainage des lits	57
CONCLUSION	58
BIBLIOGRAPHIE.....	59
ANNEXES.....	61
ANNEXE 1 – Localisation et composition du territoire de la Métropole Européenne de Lille	61
ANNEXE 2 – Définitions des paramètres qui caractérisent les boues.....	62
ANNEXE 3 – Stabilisation et hygiénisation des boues	64
ANNEXE 4 – Filières de traitement classiques.....	65
ANNEXE 5 – Filières de traitement des petites STEP de la MEL	66
ANNEXE 6 – Espace des voiries des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier	67
ANNEXE 7 – Bilan des analyses 2018 et 2019 : STEP Bois Grenier et Radinghem-en-Weppes.....	68
ANNEXE 8 – Extrait d'une des facture de la déshydratation de la lagune Aubers	72
ANNEXE 9 – Ecart du tonnage en matières sèche entrée/sortie par un mauvais dosage de polymère	72
ANNEXE 10 – Comparaisons technico-économique des techniques de déshydratation mécanique.....	73
ANNEXE 11 – Critères doctrine mélange.....	75
ANNEXE 12 – Synoptique de la station d'épuration d'Houplin Ancoisne	76
ANNEXE 13 – Tableaux des coûts du traitement déclinées par projet	77
ANNEXE 14 – Emissions de gaz à effet de serre du traitement et de la valorisation des boues liquides de Radinghem-en-Weppes en fonction de chaque projet	82
ANNEXE 15 – Espace disponible aux abords des STEP de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier .	88
ANNEXE 16– Coût d'investissement des LSPR de la STEP Radinghem-en-Weppes	88
ANNEXE 17 – Electre I : famille technique et famille environnement	89
ANNEXE 18 – Note de calcul des longueurs et largeurs des LSPR.....	91

ABRÉVIATIONS, SIGLES ET SYMBOLES

AC Assainissement Collectif

ANC Assainissement Non Collectif

BG Bois Grenier

CGA Coût Global Actualisé

CGCT Code Général des Collectivités Territoriales

CTO Composés Trace Organique

DBO5 Demande Biologique en Oxygène pendant 5 jours

DEA Direction Eau Assainissement

EH Equivalent-habitant

ETM Élément-Trace Métallique

HA Houplin Ancoisne

INRAE Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

ISDND Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux

Kg eqCO2 kilos équivalent de dioxyde de carbone

MEL Métropole Européenne de Lille

MM Matières Minérales

MO Matières Organiques

MO Maître d'Ouvrage

MS Matières Sèches

NH4 Azote Ammoniacal

PLU Plan Local d'Urbanisme

RW Radinghem-en-Weppes

SMAEL Syndicat Mixte d'Adduction des Eaux de la Lys

STEP STation d'EPuration

TMB Tonnes de Matières Brutes

TMS Tonnes de Matières Sèches

TEU Traitement des Eaux Usées

TeqCO2 Tonnes équivalent de dioxyde de carbone

UMDB Unité Mobile de Déshydratation de Boues

VA Villeneuve d'Ascq

€ Euros

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESTINATIONS DES BOUES DECLINEES PAR STEP (SOURCE : SCHEMA DIRECTEUR MEL)	12
TABLEAU 2 : EVENEMENTS PLUVIEUX DES AGGLOMERATIONS RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	15
TABLEAU 3 : TAUX DE DESSERTE DES AGGLOMERATIONS DE RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	16
TABLEAU 4 : TYPE DE RESEAU ET EFFLUENTS PRESENTS SUR LES AGGLOMERATIONS RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	17
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES DEBITS ET CHARGES D'ENTREES DES STATIONS D'EPURATION RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	17
TABLEAU 6 : NORMES DE REJETS DES STATIONS D'EPURATION (SOURCE : MEL)	17
TABLEAU 7 : PRESENTATION DE LA FILE EAU DES STATIONS D'EPURATION RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	18
TABLEAU 8 : CONSISTANCE DES BOUES EN FONCTION DE LA SICCITE (SOURCE : SIAEPA)	21
TABLEAU 9 : DIFFERENTES FILIERES DE TRAITEMENT DES BOUES EN VUE D'EPANDAGE AGRICOLE (SOURCE : OTV)	22
TABLEAU 10 : SEUILS EN ELEMENTS ET COMPOSES TRACE DEFINIS PAR L'ARRETE DU 8 JANVIER 1998 (SOURCE : E. GUIBELIN 2014)	23
TABLEAU 11 (A) : COMPARAISON PRIX DE DESHYDRATATION DE BOUES LIQUIDES SEDE ET CONCURRENTS	32
TABLEAU 11 (B) : COMPARAISON PRIX DE DESHYDRATATION DE BOUES LIQUIDES SEDE ET CONCURRENTS	32
TABLEAU 12 : TOTAL DES COUTS VARIABLES DU TRAITEMENT PAR UMDB (SOURCE : MEL)	33
TABLEAU 13 : EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE PAR L'UMDB (SOURCE : INRAE)	34
TABLEAU 14 : STATU QUO ET PROPOSITIONS DE FILIERES ALTERNATIVES	36
TABLEAU 15 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS TECHNIQUES DE LA COMBINAISON TABLE EGOUTTAGE ET FILTRE A BANDES (SOURCE : OTV)	37
TABLEAU 16 : COUT D'INVESTISSEMENT DE LA CONSTRUCTION D'UN COMBINE TABLE EGOUTTAGE ET FILTRE A BANDES (SOURCE : SAUR)	37
TABLEAU 17 : COUTS VARIABLES DU TRAITEMENT DE BOUES DE RW AVEC UN COMBINE FILTRE A BANDES ET TABLE EGOUTTAGE (SOURCE : MEL)	38
TABLEAU 18 : EMISSION DE GAZ A EFFET DE SERRE DE LA FILIERE FILTRES A BANDE ET TABLE D'EGOUTTAGE (SOURCE : INRAE)	38
TABLEAU 19 : COUT INVESTISSEMENT LSPR DE LA STEP DE RADINGHEM-EN-WEPPES (SOURCE : ENTREPRISE SOURCES)	41
TABLEAU 20 : COUTS D'EXPLOITATION DES LSPR (SOURCE : MEL)	42
TABLEAU 21 : EMISSIONS DES GAZ A EFFETS DE SERRE DES LSPR (SOURCE : INRAE)	42
TABLEAU 22 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES POINTS DE DEPOTAGE	45
TABLEAU 23 : PRIX DE TRANSPORT DE BOUES SELON LES DESTINATIONS (SOURCE : MEL)	48
TABLEAU 24 : PRIX VARIABLES SELON LES TROIS SCENARIOS (SOURCE : MEL)	48
TABLEAU 25 : PRIX FIXES SELON LES TROIS SCENARIOS (SOURCE : MEL)	49
TABLEAU 26 : COUT DU MELANGE A COURT ET LONG-TERME SELON TROIS SCENARIOS DE TRAITEMENT ET VALORISATION DE BOUES (SOURCE : PERSONNELLE)	49
TABLEAU 27 : EMISSIONS DE GES DU MELANGE DE BOUES (SOURCE : INRAE)	50
TABLEAU 28 : RECAPITULATIF DES CRITERES FINANCIERS, TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES SOLUTIONS PROPOSEES	51
TABLEAU 29 : PRESENTATION DES CRITERES CHOISIS	52
TABLEAU 30 : POIDS DES CRITERES FINANCIERS	52
TABLEAU 31 : PERFORMANCE FINANCIERE	52
TABLEAU 32 : MATRICE DE CONCORDANCE FINANCIERE	52
TABLEAU 33 : MATRICE DE DISCORDANCE FINANCIERE	52
TABLEAU 34 : RECAPITULATIF DES PROJETS SELON LES CRITERES TECHNIQUES, FINANCIERS ET ENVIRONNEMENTAUX	53
TABLEAU 35 : PRODUCTION ANNUELLE DE BOUES DE RADINGHEM-EN- WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : MEL)	54
TABLEAU 36 : SURFACE DES LITS DE RADINGHEM_EN_WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : SIG)	55
TABLEAU 37 : NOMBRE DE LITS DE RADINGHEM_EN_WEPPES ET BOIS GRENIER (SOURCE : GEOPORTAIL)	55
TABLEAU 38 : DIMENSIONNEMENT EXTRACTION DEPUIS LE BASSIN D'AERATION (SOURCE : PERSONNELLE)	56

LISTE DES GRAPHIQUES

GRAPHIQUE 1 : PRODUCTION DES BOUES DE LA MEL ENTRE 2017 ET 2019 EN TMB (SOURCE : BILAN BOUES MEL)	11
DIAGRAMMES : PRODUCTION DES BOUES DES STEP DE LA MEL ENTRE 2017 ET 2019 EN POURCENTAGE (SOURCE : BILAN BOUES MEL).....	12
GRAPHIQUE 2 : REPARTITION DE LA PRODUCTION DE BOUES BRUTES DES STEP DE LA MEL EN 2019 (SOURCE : BILAN BOUES MEL).	31
GRAPHIQUE 3 : COUTS VARIABLES DU MELANGE DE BOUES SELON CHAQUE SCENARIOS (SOURCE : MEL)	48

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : GESTION DU CYCLE DE L'EAU A LA MEL (SOURCE : MEL)	10
FIGURE 2 : LOCALISATION DES STATIONS D'EPURATION DE LA MEL (SOURCE : MEL)	11
FIGURE 3 LOCALISATION DES COMMUNES RADINGHEM-EN-WEPPES ET LE MAISNIL (SOURCE : GEOPORTAIL)	14
FIGURE 4 LOCALISATION DE LA COMMUNE BOIS GRENIER (SOURCE : GEOPORTAIL).....	14
FIGURE 5 LOCALISATION STEP RADINGHEM-EN-WEPPES (SOURCE : GEOPORTAIL).....	14
FIGURE 6 LOCALISATION STEP BOIS GRENIER (SOURCE : GEOPORTAIL).....	14
FIGURE 7 EVOLUTION DE LA POPULATION DE L'AGGLOMERATION RADINGHEM –EN-WEPPES AUX HORIZONS DE 2040 (SOURCE : INSEE)	15
FIGURE 8 EVOLUTION DE LA POPULATION DE L'AGGLOMERATION BOIS GRENIER AUX HORIZONS DE 2040 (SOURCE : INSEE)	15
FIGURE 9 COMPOSITION GENERALE DES BOUES (SOURCE : ADEME)	20
FIGURE 10 EPANDAGE AGRICOLE DES BOUES D'EPURATION (SOURCE : ACTU-ENVIRONNEMENT)	22
FIGURE 11 SITE DE COMPOSTAGE.....	25
FIGURE 12 FILIERE DE TRAITEMENT DE BOUES DE RADINGHEM-EN-WEPPES ET BOIS GRENIER.....	29
FIGURE 13 STRUCTURE D'UN LIT DE SECHAGE PLANTE DE ROSEAUX (SOURCE BAZINETTE)	39

INTRODUCTION

Le devenir des boues issues du traitement des eaux usées est un sujet complexe et multidimensionnel : technique, économique et sanitaire. Le sujet est d'importance car la France produit des boues d'épuration à hauteur d'1 million de tonnes de Matière Sèche par an.

La valorisation agronomique est privilégiée à hauteur de 75 % des boues produites. [1] Néanmoins dès 2019, le compostage des boues d'épuration préoccupe les collectivités territoriales. Au travers des lois comme la loi sur l'Economie Circulaire et la révision de la Directive déchet, le compostage est remis en question en raison de l'interdiction du mélange des biodéchets avec d'autres déchets d'ici 2027. Or, le compostage est la solution privilégiée par la Métropole Européenne de Lille (MEL) pour ses petites STations d'Épuration (STEP) qui représentent 65 % du nombre total de STEP. Et, en 2017, la MEL a intégré à son territoire deux STEP de l'ex Communauté de Communes des Weppes (Radinghem-en-Weppes (RW) de 1700 Equivalent-Habitants (EH) et Bois Grenier (BG) de 1400 EH) anciennement exploité par Noréade, la régie du SIDEN-SIAN (Syndicat interdépartemental des eaux du Nord de la France - Syndicat intercommunal d'assainissement du Nord) auquel avait adhéré la Communauté de Communes des Weppes. Ces STEP ne sont pas équipées de système de déshydratation des boues. En effet, l'ancien Maître d'Ouvrage (MO), avait fait le choix de centraliser le traitement des boues liquides sur un site spécifique autorisé à recevoir des boues de plusieurs petites STEP. La MEL ne disposant pas d'un site autorisé, dans l'immédiat, a fait appel à des unités mobiles de déshydratation pour vidanger les silos de stockage puis a composté les boues déshydratées. Cependant, cette solution s'avère coûteuse à moyen et long-terme et le compostage est remis en question.

En conséquence, la gestion des boues liquides des STEP RW et BG a fait l'objet d'une première réflexion menée par le service Traitement des Eaux Usées (TEU). Plusieurs scénarios ont ainsi émergé mais le choix de la solution à mettre en place exigeait d'approfondir l'analyse et d'établir un bilan comparatif.

La MEL étant ma structure d'accueil pour l'apprentissage du métier d'ingénieur, dans le cadre de mon Travail de Fin d'Etudes qui s'est déroulé entre Janvier et Juillet 2020, il s'est avéré pertinent de travailler sur ce sujet.

L'identification et la mise en place à long-terme de solutions viables de traitement de boues liquides sont des impératifs pour les STEP RW et BG. Dans un contexte d'évolutions législatives et de contraintes financières, les choix seront déterminants. Ainsi, il convient de nous interroger : Quelle est la filière pertinente et pérenne de traitement de boues adaptables aux STEP ciblées?

L'étude s'est articulée en cinq parties. Le périmètre et les critères de fonctionnement de la MEL ont tout d'abord été précisés ainsi que les caractéristiques des stations d'épuration et les évolutions attendues des agglomérations d'assainissement.

Une bonne connaissance des filières de gestion des boues est nécessaire pour mener cette étude. La deuxième partie présente les techniques de traitement privilégiées par la MEL pour ses petites STEP ainsi que leur cadre réglementaire.

L'état des lieux de la gestion actuelle des boues par Unité Mobile de Déshydratation, temporairement mise en place par la MEL, a été le point de départ de l'étude et est présenté en troisième partie.

La quatrième partie détaille les filières alternatives étudiées d'un point de vue technique, financier et environnemental. L'application de la méthode Electre I a ensuite permis d'évaluer chaque filière et de déterminer celle qui sera mise en œuvre.

Et enfin, en dernière partie, la filière choisie a été dimensionnée et présentée.

1. Contexte et objectifs de l'étude

La gestion des boues des STEP de RW et BG ne correspond pas au schéma directeur de la MEL. Une compréhension de cette incohérence s'impose. Ainsi, est présenté dans cette première partie, dans leurs grandes lignes, le contexte dans lequel la MEL a récupéré ces STEP et les contraintes liées à son schéma directeur. Le contexte une fois établi, est ensuite présenté l'objectif de cette étude. Enfin, la réflexion débute avec les descriptions des équipements d'épuration ainsi que leur fonctionnement. Connaître leur environnement est également nécessaire en termes de plan local d'urbanisme et de développement démographique des agglomérations d'assainissement.

1.1. La MEL : gestionnaire du cycle de l'eau de son territoire

Ce Travail de Fin d'Etude a été réalisé au sein de la MEL. À l'origine, la MEL était un établissement public de coopération intercommunale, instauré par la loi du 31 Janvier 1966, visant à remédier le morcellement des communes. Elle est devenue au 1^{er} Janvier 2015 une Métropole par la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles adoptée le 27 Janvier 2014. [13] Le territoire Métropolitain transfrontalier partage 84 km de frontière avec la Belgique et occupe une superficie de 672 km² en France hexagonale dans le département du Nord (cf. figures en annexe 1). Elle regroupe près d'1.2 million d'habitants et se compose de 95 communes urbaines et rurales. [13]

Son statut lui attribue l'exercice d'un grand nombre de compétences comme par exemple la compétence eau assainissement qui a pour but la gestion du cycle de l'eau. Cela signifie que la MEL sécurise la ressource et l'alimentation en eau potable et améliore l'efficacité des systèmes d'assainissement pour une restitution d'eaux conformes aux exigences règlementaires.

Ainsi, sous une régie nommée Sourcéo, la MEL assure 75 % de la production en eau potable de 66 communes et achète le complément auprès d'un syndicat. Et elle gère l'Assainissement Collectif (AC) et Assainissement Non Collectif (ANC) sur l'ensemble de son territoire au travers de sa Direction Eau Assainissement (DEA) (cf. figure 1).

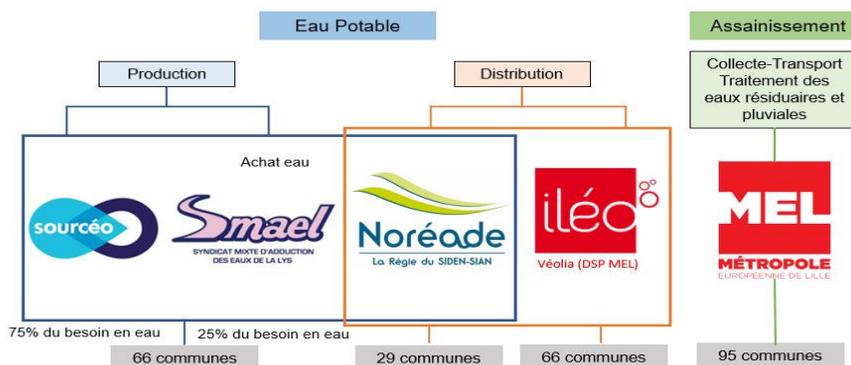


Figure 1 : Gestion du cycle de l'eau à la MEL (Source : MEL)

La DEA gère chaque domaine de l'assainissement sous différents services. Par exemple, le service TEU gère la conception, l'exploitation et la rénovation des STEP ainsi que le parc d'ouvrages électromécaniques du réseau (postes de pompage, bassins de stockage). Il exploite aussi en régie directe des STEP dont la capacité d'EH est inférieure à 60 000 (« petites STEP ») à l'exception de 2 STEP (Bauvin (12 200 EH) et Annoeullin (27 300 EH) gérées en Délégation de Service Public suite à la fusion en 2020 de la Communauté de Communes de la Haute Deûle à la MEL). Et il exerce, en marché de

prestation de service, le suivi des STEP dont la capacité est supérieure à 60 000 EH (« grandes STEP »). Enfin, il assure la valorisation et la gestion des sous-produits issus du traitement des eaux usées en particulier les boues.

1.2. Contexte historique des boues d'épuration de la MEL

La MEL compte en 2019 sur son territoire 13 STEP réparties selon un zonage d'agglomération d'assainissement. La production des boues des 13 STEP s'élève, cette année-là, à plus de 58 000 Tonnes de Matières Brutes (TMB) (cf. Graphique 1). Malgré cet important tonnage de boues, la valorisation agricole a depuis toujours été la filière privilégiée par la Métropole pour le devenir des boues (cf. diagrammes).

Ce choix a été guidé par une préoccupation économique (le coût de la valorisation agronomique est inférieur à celui des autres voies de valorisation comme l'incinération) mais également par une préoccupation « écologique » (l'apport agronomique lié à un épandage bien mené permet une économie d'engrais). Néanmoins, la MEL maintient une gestion multi-filières (recyclage agricole, compostage, incinération en cimenterie, centre d'Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND)) pour toutes ses STEP afin de sécuriser la gestion des boues en cas de pollution. [12]

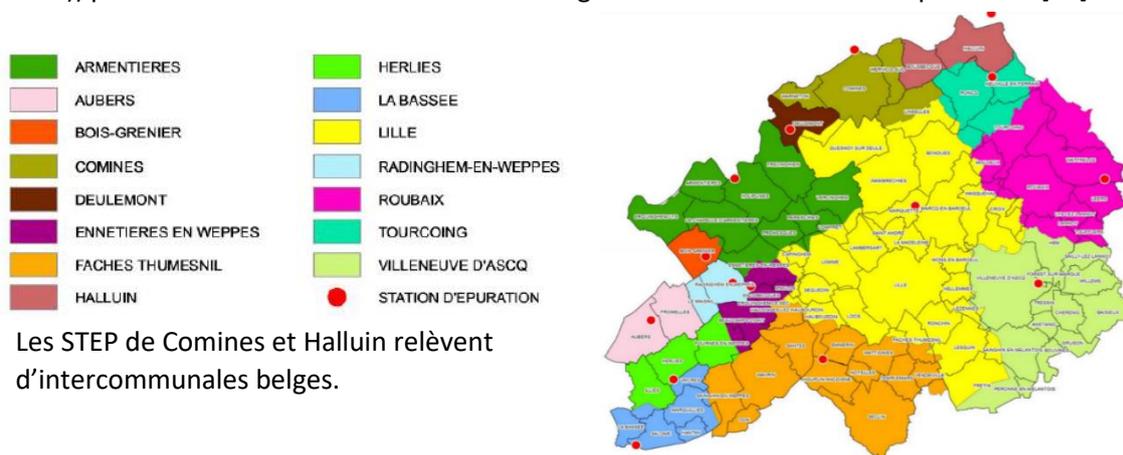
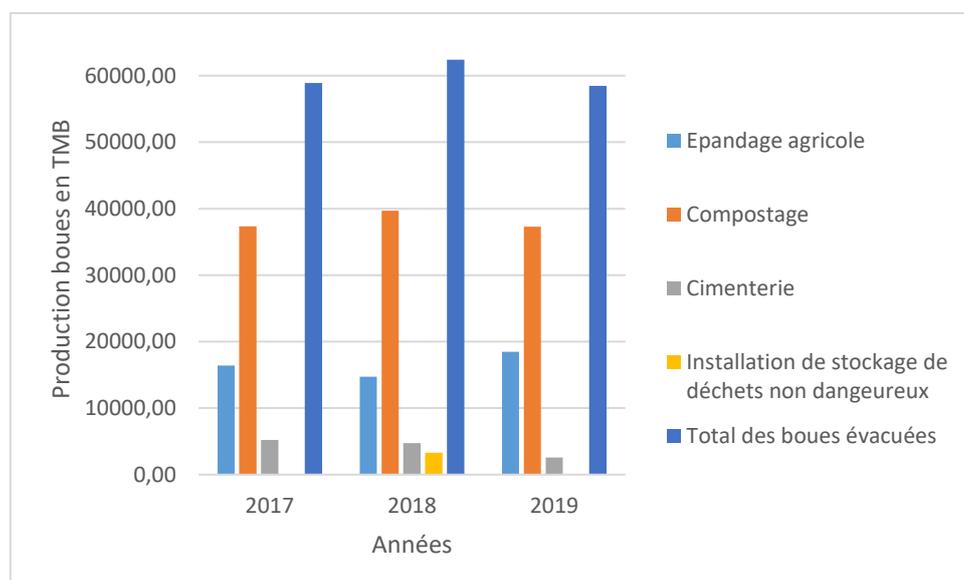
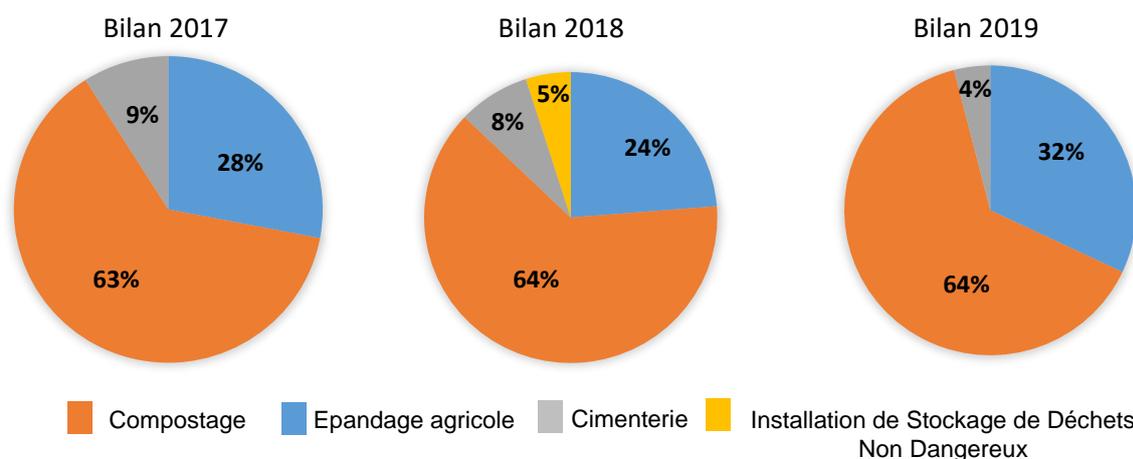


Figure 2 : Localisation des stations d'épuration de la MEL (Source : MEL)

Graphique 1 : Production des boues de la MEL entre 2017 et 2019 en TMB (Source : Bilan boues MEL)



Diagrammes : Production des boues des STEP de la MEL entre 2017 et 2019 en pourcentage (Source : Bilan Boues MEL)



Le devenir des boues de ces 13 STEP est géré par le prestataire SEDE Environnement (filiale du groupe Veolia).

En effet, un marché public de type accord-cadre à bon de commande (de 3 lots) concernant la gestion des boues des STEP de la MEL a été notifié en 2017 à ce prestataire pour un montant entre 200 000 € HT minimum et 800 000 € HT maximum, sur une durée de 4 ans. [12] Ainsi, la prestation de SEDE Environnement commence une fois les boues traitées c'est-à-dire qu'elles sont transportées depuis la STEP puis valorisées ou éliminées.

Le devenir des boues de chaque STEP de la MEL est présenté dans le tableau suivant :

Type de boues	Destination des boues	STEP concernées
Boues historiquement conformes	100 % Epandage agricole	Villeneuve d'Ascq (241 667 EH) Houplin Ancoisne (172 000 EH) Salomé (15 700 EH) Herlies (8 183 EH)
Boues périodiquement polluées	Epandage agricole hors pics de pollution	Neuville en Ferrain (63 333 EH)
Boues présentant des pics de pollutions historiques et aléatoires	Multi-filières	Marquette (555 333 EH) Wattrelos (417 000 EH) Armentières (66 700 EH)
Boues des « petites » STEP	Compostage	Ennetières-en-Weppes (4500 EH) Radinghem-en-Weppes (1 700 EH) Deûlémont (1 600 EH) Bois Grenier (1 400 EH) Aubers (1 333 EH)

Tableau 1 : Destinations des boues déclinées par STEP (Source : Schéma Directeur MEL)

La valorisation agricole est effectivement privilégiée par la MEL et se distingue sous deux principaux volets : les boues historiquement conformes et en provenance majoritairement de « grandes » STEP vont en épandage agricole tandis que les boues conformes de « petites » STEP vont en compostage.

Le compostage est lié au traitement présent sur ces STEP : Deulémont une lagune, Aubers et Ennetières-en-Weppes des Lits de Séchage Plantés de Roseaux (LSPR), RW et BG du stockage de boues liquides.

1.3. Des évolutions en 2017 : intégration de nouvelles stations d'épuration au territoire de la MEL

En 2017, la MEL intègre à son territoire trois agglomérations d'assainissement de l'ex Communauté de Communes des Weppes. Elle a repris ainsi en gestion trois STEP à savoir : Aubers une lagune, BG et RW des STEP en aération prolongée.

Aujourd'hui, elles font partie des plus petites STEP du territoire de la MEL (en incluant aussi la lagune de Deûlémont) avec cependant une gestion des boues pour RW et BG initialement différente de ce que la MEL réalise pour ses autres STEP. En effet, les STEP de RW et BG ne sont pas équipées de filière de traitement des boues. Les boues liquides de celles-ci étaient auparavant transférées sur d'autres stations exploitées par Noréade. Or en 2017, la MEL ne disposait pas d'autorisation pour mélanger les boues de STEP. Elle a donc mis en œuvre, de manière temporaire, des Unités Mobiles de Déshydratation de Boues (UMDB) pour RW et BR (dont la prestation a été réalisée par SEDE) et a valorisé les boues en compostage.

Un avenant pour la gestion des boues de RW et BG au prix de 200 000 € HT a été rattaché à l'accord-cadre de gestion des boues des STEP de la MEL. Néanmoins cela représente une augmentation de 10.62 % du montant initial du marché. Or un avenant d'un montant supérieur à 5 % du montant initial du marché doit être soumis à l'accord de la commission d'appel d'offre. Cette dernière a été consultée et a émis un avis favorable conformément à l'article L. 1414-4 du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT).

Les premières campagnes de traitement des boues de RW et BG se sont avérées coûteuses par rapport aux autres filières de la MEL. En effet, cela est dû à plusieurs paramètres :

- le coût d'une opération ponctuelle (et urgente) définie dans le cadre d'un avenant est plus élevé que les coûts du marché qui ont été mis en concurrence lors de la consultation des entreprises.
- il y a de fréquentes difficultés durant l'opération ce qui conduit à des coûts supplémentaires pour rectifier les problèmes (coût de transport et de benne supplémentaire),
- il y a une surestimation de la facture due au mode de facturation, celle-ci est basée sur le volume de boues liquides déshydratées et non sur la tonne de boues produites.

1.4. Des réflexions à mener pour l'avenir des boues : L'objectif de cette étude

Ces filières doivent être aujourd'hui pérennisées. C'est l'objectif de l'étude présentée dans ce rapport : **déterminer et dimensionner une filière de traitement de boues liquides pérenne pour les deux STEP (Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier) intégrées en 2017 au périmètre de la MEL.** Ainsi, pour étayer les choix, dimensionner les projets et déterminer les budgets, il a été nécessaire en amont de :

- Comprendre le fonctionnement global des STEP étudiées ainsi que les différentes techniques de traitement et valorisation des boues d'épuration en particulier pour les petites STEP de la MEL.
- Préciser la réglementation en vigueur et ses possibles évolutions.
- Consolider les données techniques et financières liées à la mise en place de la déshydratation mobile et préciser ses impacts environnementaux pour les comparer ensuite aux données des filières proposées.

1.5. Caractéristiques et évolutions attendues pour les stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

Est présenté ci-après le fonctionnement global des STEP étudiées :

- Situation géographique et administrative des agglomérations

L'agglomération d'assainissement RW comprend les communes de RW (1 406 habitants au recensement INSEE 2017) et Le Maisnil (642 habitants au recensement INSEE 2017). Ces communes sont urbanisées, de petites tailles et situées entre Fromelles et St-Corneille et sont à 13.8 km de Lille. La figure 3 précise la localisation des communes de l'agglomération.

L'agglomération de BG comprend uniquement la commune de BG avec 1 612 habitants en 2017 (source INSEE 2017). Elle est située à proximité de celle de Radinghem (cf. figure 4).



Figure 3 Localisation des communes

Radinghem-en-Weppes et Le Maisnil (Source : Géoportail)

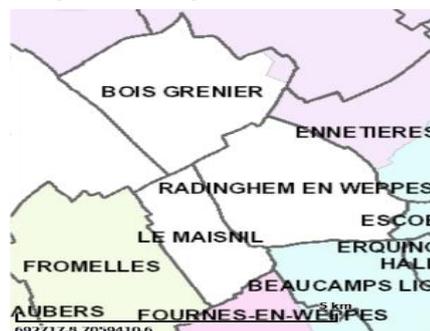


Figure 4 Localisation de la commune Bois Grenier (Source : Géoportail)

La commune RW accueille la STEP de l'agglomération RW (cf. figure 5) et la commune BG accueille la STEP de l'agglomération BG (cf. figure 6). Les STEP sont distantes de plus de 100 m des zones habitées ce qui éloigne ces zones habitées de nuisances olfactives. Cependant, il est à noter que l'Arrêté du 24 Août 2017 modifiant l'Arrêté du 21 juillet 2015 a supprimé la distance minimale de 100 m pour l'implantation d'équipements. En effet, la conception d'une station est déjà considérée par le ministère comme étant une protection des habitants contre les risques sanitaires et nuisances par prise en charge du maître d'ouvrage des ressources nécessaires permettant la suppression ou réduction de nuisances (exemple installation de système de désodorisation).

La STEP RW a été dimensionnée pour une capacité de 1 700 EH (base de calcul : 60 g de DBO5 par jour par habitant). Elle a été mise en service le 1^{er} Juillet 2007. La STEP BG est de capacité 1 400 EH et a été mise en service le 15 Juillet 1999.



Figure 5 Localisation STEP Radinghem-en-Weppes (Source : Géoportail)

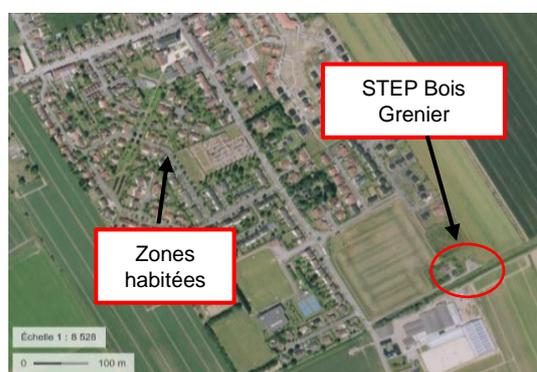


Figure 6 Localisation STEP Bois Grenier (Source : Géoportail)

- Situation des STEP selon le Plan Local d'Urbanisme (PLU)

La STEP RW est située en zone agricole (Zone A). Cette zone protégée est uniquement à vocation agricole sauf s'il est nécessaire d'installer des installations d'intérêt collectif. Sont autorisés sur ces terrains, les constructions et extensions de bâtiment à vocation agricole et les installations nécessaires aux services publics ou d'intérêt collectif. [30]

La STEP BR est située en zone N. Il s'agit de zone protégée comprenant des espaces naturels, de l'espace rural ou des espaces à vocation loisirs. Sont autorisés dans cette zone les constructions et installations nécessaires aux services publics ou d'intérêt collectif. [29]

- Caractéristiques physiques des territoires

Les agglomérations s'étalent sur les limons de la plaine de la Lys composée, elle, d'argile des Flandres. La vulnérabilité de cette zone est faible. Ainsi les localisations des STEP n'ont pas d'impact sur la ressource en eau. [20]

Les pluies arrivant sur les STEP sont caractérisées par des pluviomètres. Majoritairement, ce sont des pluies de période de retour 1 mois soit des pluies qui statistiquement peuvent se reproduire 1 fois tous les mois (cf. tableau 2).

		Nombre			Nombre d'évènement			
		Moyenne (mm)	Temps sec	Temps de pluie	> 1 mois	compris entre 10 et 20 ans	compris entre 20 et 30 ans	> 30 ans
2018	RW	683.2	264	101	35	1	1	2
	BG	726.9	262	103	33	3	0	1
2019	RW	614	246	119	38	0	0	0
	BG	653.5	252	113	38	0	0	0

Tableau 2 : Evènements pluvieux des agglomérations Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier
(Source : MEL)

- Démographie des agglomérations

La connaissance de la démographie des agglomérations permet d'estimer l'évolution de la population future du territoire.

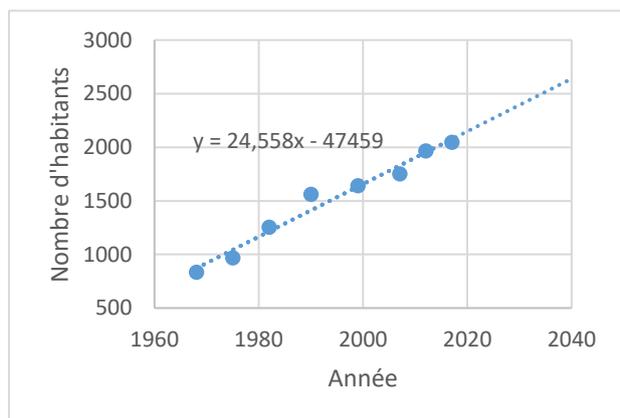


Figure 7 Evolution de la population de l'agglomération Radinghem –en-Weppes aux horizons de 2040 (Source : INSEE)

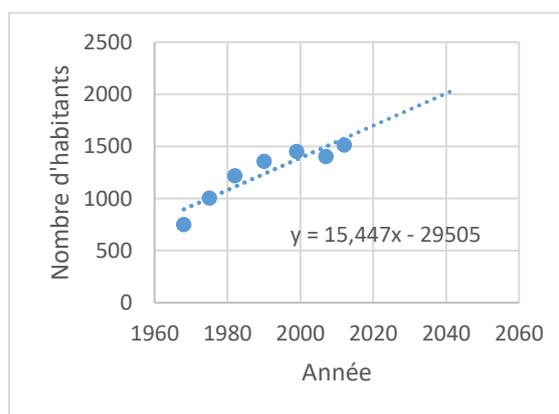


Figure 8 Evolution de la population de l'agglomération Bois Grenier aux horizons de 2040 (Source : INSEE)

L'évolution de la population des deux agglomérations a une allure linéaire depuis 1968. Les courbes de tendance (cf. figures 7 et 8) permettent d'estimer la population future aux horizons de 2040 de RW et BG respectivement à 2 640 et 2 000 habitants.

D'après le bilan annuel 2019 de l'agglomération de RW, le taux de desserte était de 73 %, ce qui signifie que 1265 habitants de la zone AC sont raccordables (cf. tableau 3).

Nom agglomération	Population					Taux de desserte
	municipale	ANC	AC	desservie	non desservie	
Radinghem-en-Weppes	2 048	314	1 734	1 265	469	73 %
Bois Grenier	1 612	286	1 326	1 219	107	92 %

Tableau 3 : Taux de desserte des agglomérations de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier (Source : MEL)

Par ailleurs, le taux d'habitants raccordés, lui, n'est pas connu. Cependant la pollution entrante sur 2019 est en moyenne de 37,5 kg DBO5/j soit 625 EH. Nous pouvons donc estimer, sur base des charges reçues en 2019, un taux de raccordement théorique d'environ 50 %.

Suite à l'intégration de ces communes à la MEL en 2017, ce taux de desserte est amené à évoluer assez rapidement et devrait atteindre 100 % dans les 5 à 8 ans selon les travaux programmés par l'unité territoriale en charge de cette agglomération.

Quelle situation démographique attendre pour 2040 ?

En se basant sur les hypothèses suivantes :

- taux de desserte de 100 %
- taux de raccordement « théorique » d'environ 80 %
- pourcentage et rapport identique (population en AC / population en ANC) : 85 % en AC et 15 % en ANC (rapport AC/ANC de 5.5)

Les résultats sont les suivants :

- population en 2040 : 2640 habitants
- nombre d'habitants en AC : 2 244
- nombre d'habitants en ANC : 396

En appliquant un taux de raccordement d'environ 80 % aux 2 244 habitants en AC, 1 795 habitants seront raccordés en 2040.

Ce résultat peut conforter la décision de dimensionner l'installation de traitement des boues sur base du dimensionnement nominal de la station d'épuration de Radinghem-en-Weppes, à savoir 1 700 EH.

- Caractéristiques du traitement des eaux usées et pluviales des STEP

Seules les eaux domestiques et pluviales sont traitées sur les deux STEP. Il n'y a pas d'eaux industrielles traitées mais deux écoles (comptant 150 élèves) considérées comme des rejets domestiques. Les réseaux raccordés sont de type mixte mais majoritairement séparatif [19], [20]:

Type réseau	Radinghem		Bois Grenier	
Unitaire	12 %		10 %	
Séparatif	42 %		47 %	
Pluvial	46 %		43 %	
Type d'effluent	Volume annuel arrivant à la station (A3+A2) en m ³	% du volume total	Volume annuel arrivant à la station (A3+A2) en m ³	% du volume total
Eaux Usées	42 539	54	49 017	72

Eaux Pluviales	18 520	24	10 382	15
Eaux Claires Parasites	17 200	22	8 681	13
Eaux résiduaires industrielles	0	0	0	0
Total	78 259		68 080	

Tableau 4 : Type de réseau et effluents présents sur les agglomérations Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier (Source : MEL)

Les débits d'entrées et charges organiques de dimensionnement des deux stations sont présentés dans le tableau 5 :

	Débit de référence (m ³)		MES (kg/j)		DCO (kg/j)	DBO5 (kg/j)		NGL (kg/j)	NTK (kg/j)	P total (kg/j)
	RW	BG	RW	BG	BG	RW	BG	RW	BG	BG
	285	210								
Charges admissibles			171	126	136	102	84	22.8	17	5.6
12/02/2019			54.7	55.8	81.5	48.9	41.5	11.3	6.5	0.9
24/04/2019			38.1	82.5	91.7	36.5	63.2	10.7	13.6	1.8
03/07/2019			38.6	51.1	132	28.8	59.9	10.9	12.7	1.3
18/09/2019			36.3			36.3		11.5		
16/10/19				67.5	87.5		22.1		6.6	1.3

Tableau 5 : Caractéristiques des débits et charges d'entrées des stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier (Source : MEL)

Les normes de rejets sont présentées dans le tableau suivant (cf. tableau 6). Elles correspondent aux normes fixées par le récépissé de déclaration du 14 Juin 2004.

	Débit total eau épurée (m ³)		MES (mg/L)		DCO (mg/L)		DBO5 (mg/L)		NGL (mg(N)/L)	
	RW	BG	RW	BG	RW	BG	RW	BG	RW	BG
Norme de rejet			35	30	100	90	25	20	15	15
Seuil réhibitoire			85	85	400	400	70	70		
12/02/2019	322	164	6	8	28	41	1.9	1.8	24.4	23.78
24/04/2019	163	152	13	24	60	104	10	18	36.64	39.33
03/07/2019	153	127	24	7	37	49	1.5	5.7	26.53	2.2
18/09/2019	179		8		50		9.5		23.05	29.32
16/10/2019		180		8		44		8.3		
Concentration en moyenne pondérée au volume			11.2	11.7	40.9	58.9	5.1	8.4	26.9	24.8

Tableau 6 : Normes de rejets des stations d'épuration (Source : MEL)

Les STEP sont considérées non conformes localement pour dépassement de l'azote mais conformes selon l'évaluation nationale. Ce dépassement d'azote est dû à une absence de sonde à oxygène permettant le pilotage de l'aération dans le bassin biologique. Cependant, un projet de mise en place de sonde est en cours afin d'apporter la juste quantité d'oxygène permettant d'effectuer la

nitrification. Ainsi, suite à cette mise en place, la concentration en nitrate en sortie station devrait être localement conforme. Les charges futures associées au développement attendu de la population pourront être prises en charge.

Le milieu récepteur est le courant des Rossignols avec comme émissaire terminal la rivière des Laves.

- Description des files eau et boues

Les STEP sont de type aération prolongée. Ce type de traitement à culture libre signifie qu'une culture bactérienne est en suspension sous forme de floc dans un bassin pour traiter les eaux usées prétraitées. A cette issue, se forment des boues qui sont traitées par une file spécifique appelée « file boues ».

Notre étude ne s'intéresse qu'à la file boues. Cependant la relation eau/boues étant étroitement liée nous avons aussi présenté la file eau de chaque STEP (cf. Tableau 7).

Cette file est composée d'un prétraitement grossier et d'un traitement biologique alimenté par les eaux usées prétraitées.

File eau	Ouvrage	Caractéristiques techniques des STEP
Avant traitement	Poste de relevage	3 pompes de 17 m ³ /h 2 + 1 secours (RW) Station de relèvement rue du Pourtalès (BG)
	Préleveur mobile mono flacon isotherme	Préleveur des charges entrantes
Prétraitement	Dégrilleur automatique	Peigne rotatif Largeur 0.6 m - Entrefer 15 mm
	Dessableur-dégraisseur combiné avec aérateur immergé	Ouvrage réception graisses 5 m ³ Sables égouttés dans une bâche de 5 m ³
Traitement biologique	Bassin équipé d'une turbine lente d'aération et agitateur de fond	Turbine 15 kW Volume bassin 380 m ³ (RW) 285 m ³ (BG)
	Puit de dégazage	Volume 5 m ³
	Clarificateur raclé	177 m ³ Diamètre 8.40 m
	Canal de comptage des eaux traitées	Venturi Débitmètre à ultrason Echelle limnimétrique
	Préleveur mobile mono flacon isotherme	Préleveur des charges sortantes

Tableau 7 : Présentation de la file eau des stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier (Source : MEL)

Un poste de recirculation des boues est équipé de deux pompes unitaires (20 m³/h pour RW) afin d'assurer l'efficacité du traitement et une pompe d'extraction (15 m³/h pour RW) permet d'extraire l'excédent qui sera traité par la suite.

La file boues est composée d'un silo ouvert (de 300 m³ à RW et 200 m³ à BG) dans lequel sont stockées et homogénéisées les boues liquides par un agitateur (5.5 kW pour RW). Le comptage des boues soutirées du silo de RW est composé d'un débitmètre électromagnétique sur conduite. Il n'y a pas de débitmètre sur le site de BG.

A l'époque où Noréade était en charge des STEP, les boues liquides stockées dans les silos étaient par la suite transportées sur la STEP de LA GORGUE afin d'être déshydratées sans chaux puis disposées sur une aire à boues pour un stockage en lot. Puis un épandage dans le Nord Pas de Calais était réalisé en période d'épandage.

Cette opération de mélange de boues est interdite. [5] Cependant, ces deux STEP ont bénéficié d'un arrêté préfectoral relatif à l'épandage d'un mélange de boues pour effectuer le mélange.

Conclusion

C'est donc dans un contexte d'évolution du périmètre de la MEL que cette dernière a pris à sa charge en 2017 la gestion de deux STEP en aération prolongée (RW de 1700 EH et BG 1400 EH).

Ces STEP reçoivent des eaux domestiques et pluviales mais pas à leur charge nominale. Une fois les problèmes de traitement de l'azote résolus les charges reçues pourront augmenter. Elles produisent des boues traitées par UMDB car la MEL ne prévoit pas dans son schéma directeur le mélange de boues et donc ne possède pas d'autorisation pour cette opération comme cela se faisait initialement sous exploitation de la régie de Noréade l'ancien MO.

L'analyse des évolutions démographiques peut permettre de conclure que les équipements d'épuration seront capables d'intégrer les évolutions de charge jusqu'en 2040. A cette période, les stations devraient être proches de leur nominal, à savoir 1700 EH pour RW et 1400 EH pour BG.

Ces données nous permettent d'envisager le dimensionnement des filières boues sur le nominal des stations d'épuration. De plus, la situation de ces équipement au regard du PLU autorise des constructions sur les terrains actuels.

2. Compréhension de la thématique : les boues de leur origine à leur valorisation

Les caractéristiques techniques et administratives des stations de RW et BG permettent d'envisager des extensions de filières de traitement de boues sur site. Mais les choix stratégiques à mener dans cette étude doivent se reposer sur une bonne connaissance de la filière. Cette seconde partie présente une synthèse bibliographique des techniques et des enjeux liés au traitement des boues : leurs origines, leurs caractéristiques, les techniques de traitement et de valorisation mais également les exigences réglementaires liées à leur bonne gestion. Néanmoins, ne sont développées ici que les techniques de traitement privilégiées par la MEL pour ses petites stations d'épuration.

2.1. Origine et caractérisation des boues d'épuration

L'article L.541-1-1 issu du code de l'environnement définit la boue d'épuration comme étant un déchet : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». [4] Et l'article L 2224-8 issue du CGCT définit la collectivité territoriale comme étant en charge de l'élimination des boues car considérée comme celle qui produit le déchet.

Techniquement, les boues d'épuration sont « un mélange d'eau et de matières solides, séparées par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent » issues de chaque phase du traitement des eaux usées et différentes des sous-produits des réseaux et sous-produits de STEP que sont les sables, graviers et graisses [9].

Selon le traitement réalisé à la STEP, leurs compositions changent mais elles se composent généralement de Matières Organiques (MO), Matières Minérales (MM) et d'eau (cf. figure 9).

Matière sèche (MS)	2 à 95 % selon la siccité
Matière organique	50 à 70 % de la MS (30 % si boues chaulées)
Azote	3 à 9 % de la MS
Phosphore	4 à 6 % de la MS
Potasse	< à 1 % de la MS
Magnésie	< à 1 % de la MS
Chaux	4 à 8 % de la MS (25 % si boues chaulées)
Carbone/azote	5 à 12

Figure 9 Composition générale des boues (Source : ADEME)

Nous distinguons ainsi :

- Les boues primaires

Ce sont les boues extraites du traitement primaire par décantation. Elles sont riches en MM, contiennent des MO susceptibles d'évoluer et sont de couleur noire. En sortie de décanteur elles présentent des concentrations allant de 10 à 15 g/L en MS. [14] Elles sont hydrophobes et fermentescibles.

Les boues physico-chimiques sont les variantes des boues primaires. Elles sont issues de la décantation des eaux usées après que les eaux usées aient été mélangées à des réactifs tels que les sels de fer ou d'aluminium. Ces boues sont essentiellement composées d'hydroxydes présents dans ces réactifs. [8] Elles peuvent capter jusqu'à 90 % des matières en suspension. [3]

- Les boues biologiques

Elles sont issues du traitement biologique des cultures libres ou fixées. Elles sont riches en MO (dissoutes et colloïdales), contiennent des débris de cellule et des enveloppes bactériennes et sont de couleur brune. Elles présentent des concentrations médiocres autour de 10 g/L car composées essentiellement de corps bactériens. [24] Elles sont fortement hydrophiles et cela a une influence sur les performances de la déshydratation.

Les boues d'aération prolongée caractérisées par une faible charge massique, sont des boues biologiques peu concentrées.

Les boues fraîches mixtes sont le mélange des boues primaires et boues biologiques. L'ajout de boues primaires aux boues biologiques améliore leurs aptitudes à la concentration.

- Les boues tertiaires

Les boues tertiaires sont issues du traitement tertiaire (après un traitement biologique) qui a pour but l'élimination du phosphore et le raffinage de l'eau par des techniques de filtration membranaire. Les boues sont de type hydrophile. Lorsqu'il existe un traitement tertiaire, les boues issues de ce traitement sont en général renvoyées en tête de station car elles ont une faible aptitude à la déshydratation.

Ces trois types de boues présentent un intérêt agronomique de par leur composition en MO et teneur en azote et phosphore. Cependant, elles contiennent aussi des éléments indésirables comme des agents pathogènes, des Eléments Trace Métallique (ETM) et des Composés Trace Organique (CTO) ou encore des micropolluants émergents (par exemple les hormones) dont certains sont nocifs pour la santé humaine à plus ou moins grande concentration. [14]

- Les ETM sont des éléments naturels dont certains sont indispensables aux processus biologiques (exemple : Cuivre, Zinc).
- Les agents pathogènes se sont les virus (Entérovirus), parasites (Œufs d'Helminthes viables) et bactéries (Salmonelles).

- Les CTO sont des composés chimiques et persistants. Nous distinguons les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les sept polychlorobiphényles (PCB).

Un suivi analytique permet de caractériser les boues. Il est de deux ordres. Le suivi « terrain » effectué par l'exploitant de la STEP permet de déterminer la Matière Sèche, les matières volatiles et MM ou l'Indice de boues. Ces paramètres sont utiles pour le pilotage des installations. Et un suivi plus poussé permet d'identifier les éléments indésirables et s'effectue généralement dans un laboratoire extérieur à la station. L'annexe 2 reprend la liste des paramètres suivis et leur définition. Néanmoins nous avons repris ci-dessous certains paramètres utiles pour la suite de cette étude.

- La Matière Sèche : elle correspond au poids sec de la boue. Elle inclut la matière volatile et la MM. Elle est mesurée pour connaître la quantité de boue qu'il y aura à traiter. Elle permet de calculer la siccité de la boue qui correspond au pourcentage massique de MS.
- La consistance de la boue : elle est liée à l'état physique de la boue et est définie en fonction de la siccité. La connaissance de ce paramètre est déterminante pour le stockage, l'homogénéisation et la manutention.

Consistance	Siccité
Boues liquides	De 0 à 10 %
Boues pâteuses	12 à 25 %
Boues solides	Supérieure à 25 %
Boues sèches	Supérieure à 85 %

Tableau 8 : Consistance des boues en fonction de la siccité (Source : SIAEPA)

- La tenue en tas est la capacité de la boue à former un angle avec le sol important en fonction d'une hauteur (cas majoritaire des boues solides : supérieur à 45 ° sur une hauteur de 1 mètre). La tenue en tas permet de concevoir les espaces de stockage tout comme la siccité et est un élément essentiel à respecter dans les autorisations d'épandage.

2.2. Production et valorisation des boues en France et à la MEL

La production de boues en France est de l'ordre de 20 kg MS/hab/an. [24] Sur un territoire comptant 21 981 STEP en 2018 et représentant une charge globale de 79 millions d'EH, la production de boues peut-être estimée à 1 millions de TMS/an. [6] Or à l'échelle européenne, elle avoisine les 10 millions de TMS/an. La France fait partie des plus grands producteurs. [1]

Les destinations finales de ces boues constituent une préoccupation première pour les maîtres d'ouvrage. En effet, lors de la conception d'une STEP, en premier lieu, le maître d'ouvrage doit déterminer la/les filières d'évacuation, si possible pérennes, des futures boues. Ces filières vont déterminer le type de boue à produire et donc impacter la filière de traitement des boues à mettre en place en amont et parfois, également, les procédés de traitement des eaux. L'ensemble du projet doit également prendre en compte les coûts d'investissement et de fonctionnement, le contexte local de la collectivité, la nature des eaux usées et les risques de pollution. [17]

Néanmoins, lorsque la STEP a déjà été conçue et que le maître d'ouvrage doit définir une filière de traitement de boues, il tient compte, en plus des éléments cités précédemment, du patrimoine existant pour le choix de la filière.

Ainsi, les boues, une fois traitées, peuvent être acheminées soit en filière de valorisation agricole soit en filière d'élimination par oxydation thermiques (incinération en four spécifique, co-incinération et oxydation par voie humide). Il existe également les ISDND (ex Centre d'Enfouissement Technique de

classe II) qui sont des filières ultimes qui stockent de manière sécurisée les boues qui n'ont ni pu être valorisées ni éliminées.

La stratégie d'élimination des boues en France est à la tendance de la valorisation agricole par épandage direct ou épandage après compostage. En 2014, sont estimées à 33 % les boues compostées avant d'être épandues. [1] Cependant, sous cette valeur nationale se cache une variabilité puisqu'en 2016, 24 % des boues produites de l'ex-région Rhône Alpes (par exemple) étaient compostées alors que 64 % l'étaient à la MEL en 2017. Ces choix de valorisation sont pour la plupart influencés par les orientations politiques. La MEL, elle, s'est ainsi orientée vers une valorisation agricole de type épandage agricole direct et compostage.

2.3. L'épandage agricole des boues d'épuration



Figure 10 Epandage agricole des boues d'épuration (Source : Actu-environnement)

L'épandage agricole des boues d'épuration consiste à épandre les boues sur des champs agricoles. C'est une solution favorable à l'environnement. Cependant, elle nécessite un contrôle strict afin de préserver la ressource agricole et la santé humaine. Elle est économiquement viable car peu onéreuse : sans transformation des boues 75 à 150 €/TMS la main d'œuvre, le transport et le suivi agronomique contrairement à une filière d'incinération dont le coût varie entre 200 à 250 €/TMS (coût de fonctionnement et amortissements des investissements) (Source : SATEA).

- Pourquoi épandre ? : les besoins du sol

La fertilisation d'un sol dépend d'éléments minéraux comme l'azote, l'acide phosphorique et la potasse mais aussi de MO dont la dégradation de celles-ci permet de restituer progressivement des éléments minéraux aux cultures. Le sol a aussi besoin d'éléments secondaires comme le calcium, le magnésium, le soufre et des oligo-éléments tels que le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre. [17]

Les boues sont composées de ces éléments fertilisants et amendements dont a besoin le sol. En effet, lorsqu'elles sont déposées sur celui-ci, les micro-organismes du sol se nourrissent de la matière organique des boues et participent à la production de matière minérale. Cependant, la qualité de la boue doit être irréprochable car malheureusement bien qu'elles contiennent des éléments fertilisants, nous avons précédemment montré qu'elles contiennent aussi des éléments indésirables.

- Consistance des boues épandues

Les boues épandues peuvent provenir de différents traitements (cf. tableau 9) :

Consistance boues	Traitement
Boues liquides	Stockage en silo ou épaissement -> Stabilisation (si besoin)
Boues pâteuses	Epaississement -> Stabilisation (si besoin) -> Déshydratation -> Chaulage
Boues solides	Epaississement -> Déshydratation sur filtres à plateaux
	Epaississement -> Déshydratation -> Compostage
	Epaississement -> Déshydratation -> Chaulage
	Epaississement -> Déshydratation -> Déshydratation
Boues sèches	Epaississement -> Stabilisation (si besoin) -> Déshydratation -> Chaulage -> Séchage thermique
	Epaississement -> Digestion (si besoin) -> Déshydratation -> Séchage total

Tableau 9 : Différentes filières de traitement des boues en vue d'épandage agricole (Source : OTV)

- Exigences et évolutions législatives pour l'épandage

La filière épandage est encadrée par :

- L'article R211-25 à R211-53 du Code de l'environnement et la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) qui fixe les opérations soumises à autorisation ou déclaration.
- L'arrêté du 8 janvier 1998 (pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997) qui fixe les prescriptions techniques applicables, les conditions d'épandage et les critères à respecter pour garantir l'innocuité des boues. Par exemple, un épandage de boues non chaulées sur un sol trop acide provoque la remobilisation des éléments-traces métalliques (à l'origine présent dans les boues) vers le sol.
- Le Décret n° 2013-786 du 28 août 2013 modifiant le Décret n° 2011-1257 du 10 octobre 2011 qui fixe les programmes d'actions régional et départemental en vue de la protection des eaux contre les nitrates d'origine agricole.
- La loi n° 2006-1772 du 30 Décembre 2006 qui a créé un fonds de garantie des risques liés à l'épandage agricole des boues d'épurations urbaines et industrielles. Une taxe annuelle d'un montant de 0.50 €/TMS de boues produites est due par les producteurs de boues. Ce fond a pour objectif d'assurer les risques dont la connaissance scientifique était inconnue au moment de l'épandage.

L'épandage n'est possible que si les boues sont analysées selon différents paramètres. Les fréquences d'analyses sont définies par l'arrêté du 8 janvier 1998 (cf. tableau 10). Aussi, l'arrêté du 24 août 2017 modifiant l'arrêté du 21 juillet 2015 précise certaines dispositions sur la gestion des boues.

Ainsi, pour la MEL et avec l'appui de laboratoires agréés, SEDE se charge d'analyser les échantillons moyens des boues prélevées par les exploitants des STEP de la MEL et les boues stockées en quarantaine ou en intersaison.

Éléments ou composés traces	Valeur limite dans les boues (mg/kg MS)		Flux maximal cumulé, apporté en 10 ans (g/m ²)	
Métaux lourds				
Cadmium	10		0.015	
Chrome	1 000		1.5	
Cuivre	1 000		1.5	
Mercure	10		0.015	
Nickel	200		0.3	
Plomb	800		1.5	
Zinc	3 000		4.5	
Chrome + Cuivre + Nickel + Zinc	4 000		6	
Micropolluants Organiques				
	Cas général	Pâturages	Cas général	Pâturages
Total des sept principaux PCB	0.8	0.8	1.2	1.2
Fluoranthène	5	4	7.5	6
Benzo(b) fluoranthène	2.5	2.5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	1.5	3	2

Tableau 10 : Seuils en éléments et composés trace définis par l'arrêté du 8 Janvier 1998 (Source : E. Guibelin 2014)

Au 1^{er} Juillet 2021, il est prévu une révision (Alinéa 1 de l'article 86 de la loi contre le gaspillage et à l'économie circulaire votée le 10 Février 2020) des seuils en éléments et composés traces de l'arrêté

du 8 Janvier 1998 prenant en compte des micropolluants émergents (hormones, produits pharmaceutiques, plastiques etc.).

- Gestion des épandages de boues

Trois procédures bien distinctes permettent l'épandage des boues d'épuration :

- La première procédure est la réalisation d'un plan d'épandage. Pour ce faire, dans un premier temps il faut réaliser une étude préalable puis un registre d'épandage.
- La seconde procédure est de mettre en place une autorisation de mise sur le marché des boues. Mais cela nécessite de réaliser des demandes auprès de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).
- La troisième procédure (que nous développerons en partie 2.4) consiste à produire du compost normé NFU 44-095.

- Logistique et transport

La STEP produit en continu des boues tandis que l'épandage ne peut être réalisé qu'en été, automne ou fin de printemps. [15] Ainsi il est nécessaire d'avoir des lieux de stockage des boues. L'arrêté du 8 Janvier 1998 impose dans son article 5 que « les ouvrages d'entreposage des boues sont dimensionnés pour faire face aux périodes où l'épandage est impossible », ce qui signifie que le stockage de boues est à prévoir par le maître d'ouvrage de la STEP.

L'Agence de l'Eau du bassin Artois-Picardie (agence de l'eau rattachée au bassin hydrographique où se trouve le territoire de la MEL) a rédigé une note concernant le stockage des boues des stations d'épuration du bassin versant. La MEL suit principalement les prescriptions de cette note qui réglemente les pratiques en matière de stockage. Elle recommande ainsi une durée d'entreposage de 9 mois pour les boues d'épuration liquides, pâteuse et solide séchées thermiquement ne pouvant pas être stockées en bord de champ et 6 mois pour les autres boues d'épuration solides.

Un entrepôt est donc conçu en fonction d'une durée de stockage délimitée et de la consistance de chaque boue. L'entrepôt appelé aussi lieu de stockage de boues a pour objectif de retenir les lixiviats pendant la période d'entreposage :

- Les boues liquides sont stockées dans des cuves en béton appelées silos à boues. C'est le cas de RW et BG. Leur transport doit se faire avec des engins complètement fermés.
- Les boues pâteuses sont stockées sur des plateformes imperméables, dans des fossés ou encore des silos-couloir.
- Les boues solides sont stockées sur le sol.
- Les boues sèches stockées sur le sol.

Les boues sont stockées dans les structures d'entreposage par lot. En effet, la composition des boues peut être changeante en fonction de ce qui arrive en station. La gestion des boues par lot permet d'évaluer la qualité de la boue et adapter l'apport agronomique en fonction des sols. De même, si le lot est pollué, cela permet d'écarter l'amendement vers une autre filière.

Concernant le transport des boues, le décret n° 90-217 du 23 Mars 90 relatif à l'importation, l'exportation et au transit de déchets générateurs de nuisances impose un certain nombre de contraintes relatives au transport des boues dans l'union européenne.

- Les boues produites pendant l'épidémie du covid-19

Face à la pandémie mondiale du coronavirus, la question de l'innocuité des selles des malades dans les boues d'épuration s'est posée. Par arrêté du 30 Avril 2020, des préconisations ont été précisées

pour éviter un risque de contamination de la maladie. Les boues ne peuvent donc être épandues que si elles ont été hygiénisées au préalable c'est-à-dire compostage, chaulage, digesteur.

Le contexte de crise a impliqué de doubler la surveillance des boues (augmenter le nombre d'analyses), a mis en évidence des difficultés d'hygiéniser les boues par compostage par manque de coproduit tel quel les déchets verts suite aux fermetures de déchetteries et espaces verts. Il a fait place à des solutions alternatives tel que le traitement des boues sur place par unité mobile puis chaulage ou encore incinération (en cas de capacité suffisante des équipements et d'un coût d'exploitation modéré). Cependant, les difficultés d'application de cet arrêté ont soulevé des demandes d'accompagnement d'acteurs locaux auprès des services de l'état pour engager des solutions durables telles que des investissements sur des filières d'hygiénisation.

2.4. Le compostage des boues d'épuration



Le compostage est la transformation des déchets organiques en compost. Il est à rappeler que le compostage est une étape de traitement des boues (étape de stabilisation et hygiénisation cf. annexes 3 et 4) avant épandage mais il s'inscrit comme une filière de valorisation de matière. Le coût du traitement des boues d'épuration est relativement élevé (300 à 350 € / TMS suivant la nature du substrat carboné et le coût de valorisation agricole (SATEA)

Figure 11 Site de compostage
(Source : SEDE)

- Pourquoi réaliser du compost ? : les besoins du sol

Lorsque l'épandage direct ne peut être réalisé, le compostage semble être la filière la plus acceptée financièrement et socialement. Selon la thèse de Remy Albrecht, plusieurs scientifiques confirment que l'ajout du compost au sol améliore ces propriétés physiques et chimiques. Selon Wong et al (1999), le compost participe à l'amélioration des propriétés physiques du sol, de la conductivité hydrique dans celui-ci. D'après Bresson et al (2011) cela permet de lutter contre la dégradation de la surface du sol. Le compost a une capacité de stockage des métaux et réduit leur transfert aux plantes (Bolan et al 2003). Enfin le compost de matière organique stable améliore la porosité des sols et participe à l'amélioration du pouvoir tampon du sol et sa capacité d'échange sont des paramètres qui ont une influence sur la croissance des plantes. Selon les travaux de Guittonny-Larchevêque, le compost est un fertilisant organique qui améliore la fertilité des sols de manière efficace et durable.

- Consistance des boues composts

Les boues pouvant être dirigées en filières de compostage sont des boues fraîches riches en MO et en azote. Le taux d'humidité optimal du mélange de départ se situe entre 55 et 65 % soit 35 à 45 % de siccité.

Règlementairement il n'existe pas de siccité minimale pour accepter des boues en centre de compostage. Cependant, plus celle-ci est faible et plus la quantité de déchets verts à ajouter aux boues est importante afin d'obtenir un taux d'humidité optimal de mélange. La MEL déshydrate ces boues avant toute opération de compostage notamment pour réduire les coûts de transport.

- Exigences et évolutions législatives pour le compostage

Le compost se distingue sous deux statuts :

- Il peut détenir le statut « produit » qui est un statut sous lequel le compost est conforme à la norme NFU 44-095. C'est un amendement commercialisable.
- Il peut aussi détenir le statut « déchet ». Il est alors non normé et doit suivre la réglementation de l'épandage agricole des boues.

L'article 95 de la loi « Egalim » (loi pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous votée le 2 Octobre 2018) a modifié l'article L255-12 du code rural et de la pêche maritime. Elle ne confère plus aux matières fertilisantes issues des boues d'épuration le statut « produit ». Or ces restrictions réglementaires ont un impact sur la valorisation agricole et les objectifs de la loi contre le gaspillage et à l'économie votée le 11 Février 2020). Ainsi cette dernière (loi sur l'économie circulaire) favorise le maintien de la filière de compostage des boues d'épuration et cela dans des conditions encadrées par le pouvoir réglementaire (Art 86 Alinéa 1 et 2 de la loi contre le gaspillage et à l'économie circulaire).

- Gestion du compost de boues

Les sites de production de compost sont encadrés par les arrêtés du 22 avril 2008 (plateformes soumises à autorisation) et encadré par l'arrêté du 20 avril 2012 (plateformes soumises à enregistrement). Les sites nécessitent une main d'œuvre qualifiée pour réaliser les différentes techniques de compostage. Ils doivent être localisés sur un espace important et doivent être pourvu de matériels adaptés. De nombreuses entreprises ont développé la filière de compostage de boues d'épuration. La société SEDE par exemple, en contrat avec la MEL, a développé cette expertise depuis plus de 20 ans.

2.5. Filière de traitement des boues pour les petites stations d'épuration de la MEL

Une filière de traitement de boues se compose de plusieurs étapes qui permettent la réduction du pouvoir fermentescible des boues et la réduction de leur volume [17]. Le choix de chaque étape est dépendant de la destination des boues et d'un certains nombres de critères techniques comme le niveau de siccité souhaité, la stabilisation recherchée ou encore les coûts d'exploitation et investissement. Cependant il existe 4 étapes principales (pouvant être complémentaires) : l'épaississement, la stabilisation (souvent associée à une étape d'hygiénisation), la déshydratation et le séchage (cf. figure et tableau en annexe 4).

La stabilisation, hygiénisation (cf. annexe 3) et séchage supérieur à 90 % permettent la réduction du pouvoir fermentescible des boues en réduisant les nuisances olfactives et agents pathogènes des boues. C'est un paramètre d'exigence de qualité de boues pour la filière de valorisation agricole car l'odeur des boues est d'enjeu sociétal pour l'agriculteur qui les reçoit. Quant à l'épaississement et la déshydratation, ils permettent la réduction du volume des boues (indispensable pour réduire les coûts de transport et stockage en cas de valorisation, augmenter la siccité des boues en cas de valorisation ou stockage en ISDND et augmenter le pouvoir calorifique des boues en cas d'incinération). [26]

La MEL a mis en place au sein de ses petites STEP la déshydratation par voie mécanique (de type centrifugeuse) avec ou sans chaulage et du séchage par des LSPR.

- Déshydratation mécanique de type centrifugeuse

Mise sur le marché depuis une trentaine d'années maintenant, la centrifugeuse est une machine qui permet de réduire le volume de boues par déshydratation mécanique. En effet, elle utilise la force centrifuge pour séparer le liquide « centrat » du solide et accélérer la sédimentation du solide après

avoir utilisé du polymère permettant d'agglomérer le solide. Le processus de déshydratation se réalise autour d'une vis convoyeuse (cf. figure 1 en annexe 5) qui tourne à haute vitesse.

De très bonnes performances sont obtenues avec ces machines notamment les « hautes pressions ». La siccité obtenue pour les hautes pressions varie entre 16 et 20 %. L'inconvénient est qu'elle demande un ajout de polymère important plus la pression est haute.

Ces centrifugeuses fixes installées sur site peuvent aussi se retrouver en conteneur mobile (cf. figure 2 en annexe 5) accompagnées par ailleurs de d'autres équipements permettant l'opération de déshydratation tel qu'un groupe électrogène, une pompe et une cuve à polymère. Le procédé de déshydratation est le même. L'unité mobile est utilisée pour les sites ne bénéficiant pas de filière de traitement. Néanmoins, leur passage demande une production de boues assez importante pour que la machine soit performante. Et les sites doivent être dotés de stockage des boues liquides équipés d'agitateur pour obtenir une bonne homogénéité des boues avant leur traitement.

- Les Lits de Séchage Plantés de Roseaux (LSPR)

Mis initialement en œuvre en Europe pour des petites STEP à boues activées (Lienard et Payrastré, 1996; Nielsen, 2003) et précisément au Danemark et en Allemagne, les LSPR sont une nouvelle technique de séchage qui présentent de bonnes performances de déshydratation et stabilisation (cf. figure 3 en annexe 5).

Ces lits voient le jour en France dans les années 1990 sous l'impulsion de l'INRAE (Lienard et al 1994), cependant les performances sont moins satisfaisantes par manque de connaissance des règles de dimensionnement et de gestion des ouvrages permettant d'obtenir des siccités satisfaisantes.

A ce jour, la tendance est à l'augmentation en France et notamment pour des STEP à grandes capacités suite à un engouement pour des dispositifs plus « écologiques », la grande capacité de stockage des boues (entre 5 à 10 ans) et des précisions sur l'amélioration de performances du dispositif. De même, à l'international, les LSPR se développent et notamment dans les pays tropicaux pour lesquels ils sont prédisposés au climat quasiment constant. Les performances de déshydratation et de digestion des solides sont plus élevées. (Edwards et al. 2001).

A la MEL, une seule STEP dont la mise en service est récente (2011) présente des LSPR. Il s'agit de la STEP d'Ennetières-en-Weppes de 4 500 EH. Une deuxième est en cours de construction depuis fin 2019 (Aubers 1 333 EH). Ce faible nombre de dispositifs à la MEL s'explique de par la localisation des STEP majoritairement en milieu très urbanisé et de la demande importante en espace que présupposent les lits et dont ne disposent pas les villes urbanisées. Aubers et Ennetières-en-Weppes se trouvent dans des milieux moins urbanisés que les autres agglomérations.

Le principe de fonctionnement des LSPR est « l'apport de boues sur une surface reposant sur un massif filtrant de granulométrie croissante de la surface vers le fond ». [28] Deux mécanismes sont mis en œuvre durant l'écoulement de la phase liquide et le stockage en surface de la phase solide à savoir la déshydratation et la minéralisation. Il n'y a aucun besoin de réactif pour effectuer ces mécanismes mais simplement d'une pompe (et donc d'énergie électrique) pour transporter les boues sur la surface permettant la déshydratation.

- La déshydratation est réalisée grâce au drainage du liquide et via le processus d'évapotranspiration que permettent les roseaux plantés dans les lits. Il s'ensuit donc un séchage des boues de par la réduction du volume d'eau présente dans ces dernières.
- La minéralisation est due à la stabilisation des boues et l'activité biologique aérobie dans celle-ci.

Ces deux mécanismes sont effectifs et performants grâce au fonctionnement des lits en phase d'alimentation puis phase de repos. Par un système de bâchée, les lits sont alimentés de boues puis

mis au repos pour que la déshydratation naturelle s'opère dans de bonnes conditions. Cela implique aussi la mise en place de plusieurs lits pour assurer les phases de repos longues par rapport aux phases d'alimentation. Les siccités de boues obtenues de l'ordre de 25 %. [2] Et d'après l'INRAE une diminution de 50 % des MS est attendues en phase vidange.

Conclusion

Les boues d'épuration extraites aux différentes phases de traitement des eaux usées se caractérisent principalement en fonction de leur siccité, leur valeur agronomique et leur teneur en éléments indésirables. Différentes techniques permettent leur déshydratation et leur stabilisation comme la centrifugation ou leur stockage dans des lits de séchage plantés de roseaux.

Les boues sont considérées comme un déchet et une collectivité en est responsable de sa production à sa valorisation. Pour des boues comportant de faibles concentrations en éléments indésirables, les filières de valorisation privilégiées par la MEL sont le compostage et l'épandage agricole. De nombreux textes européen et français encadrent ces filières comme l'arrêté du 8 janvier 1998 pour l'épandage agricole. Le respect de la norme NFU 44-095 permet « d'élever » une boue d'épuration au statut de produit et dans le contexte récent du covid-19, a présenté une solution avantageuse d'hygiénisation. Cette filière voit aujourd'hui son cadre réglementaire évoluer. L'Art 86 Alinéa 1 et 2 de la loi contre le gaspillage et à l'économie circulaire maintient la filière de compostage des boues d'épuration et cela dans des conditions bien encadrées par les pouvoirs réglementaires tel que la révision de l'arrêté du 8 Janvier 1998 au plus tard 1er Juillet 2021.

3. Etat de lieux des filières de traitement des boues liquides de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

Pour assurer les évacuations de boue des stations de RW et BG, la MEL a mis en place une solution temporaire de déshydratation par UMDB. Cette solution s'avère coûteuse et comporte des inconvénients techniques. Dans cette partie, l'opération UMDB est analysée au regard d'autres devis de déshydratation et des solutions d'optimisation sont recherchées. Son Coût Global Actualisé est évalué ainsi que ses émissions de gaz à effet de serre. Critères qui entreront en ligne de compte au moment du choix de la filière optimisée.

Les deux STEP font l'objet de la même filière de traitement de boues c'est pourquoi nous avons réalisé qu'une seule description complétée par ailleurs avec les spécificités de chacune.

Cette présentation n'a été réalisable que suite aux visites de terrain et d'échanges avec l'exploitant des filières. Ainsi, après avoir visité la file boues de chaque STEP, nous pouvons relater qu'elles ne sont pas différentes des filières classiques présentées au paragraphe 2.5. En effet, elles se composent d'étapes d'épaississement, de déshydratation et de stabilisation réalisés à l'aide de stockage de boues dans un silo, une déshydratation par centrifugeuse dans une unité mobile et du compostage lorsque les composts de boues respectent la norme (cf. figure 12).

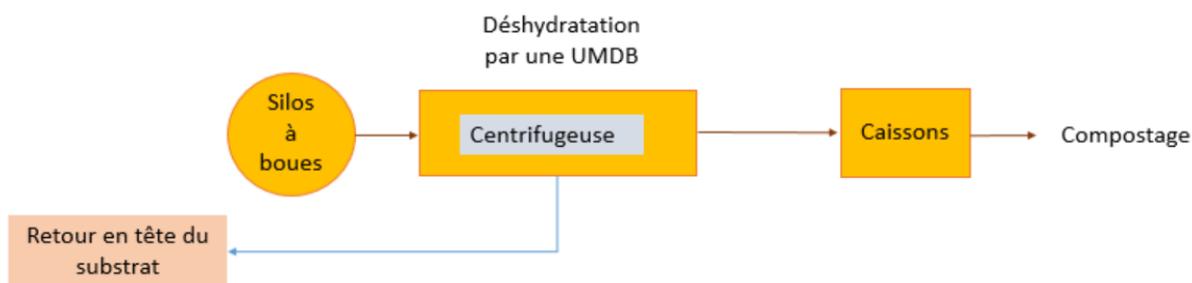


Figure 12 Filière de traitement de boues de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

Le fonctionnement de chaque étape est expliqué ci-après.

3.1. Stockage et épaissement dans le silo à boues

Une fois extraites du bassin d'aération, les boues sont stockées dans un silo circulaire ouvert à fond conique. Les boues s'épaissent dans les silos par simple décantation. Un agitateur fonctionnel pendant les périodes d'extraction de boues permet d'homogénéiser ces dernières. L'arrêt de l'agitateur permet l'évacuation de la lame d'eau formée en surface de la cuve (évacuation en surverse). Cela signifie que le silo agit bien en tant qu'épaississeur et il permet une première réduction du volume des boues.

Les silos sont capables de contenir un volume de boues pendant une période de quatre à cinq mois maximum. Au-delà de ces périodes, le volume de stockage est insuffisant et donc les boues si elles ne sont pas déstockées à temps restent plus longtemps dans le bassin d'aération. Cela peut provoquer la détérioration du traitement car la production de boues augmente et la matière organique contenue dans le bassin diminue.

Ainsi, les campagnes de déshydratation des boues liquides ont été adaptées en fonction de la capacité maximale des silos pour les années 2018 à 2019. Ces campagnes sont biannuelles.

Le génie civil des silos est correct, il n'y a pas de fissures du béton ni de signes de tuyauterie obsolète qui mériterait d'être remplacée. D'ailleurs les stations ont été mises en service il y a une dizaine d'années donc cela est bon signe qu'il n'y ait pas de réparation à réaliser.

3.2. Déshydratation par une Unité Mobile de Déshydratation de Boues (UMDB)

Une fois déstockées du silo, les boues sont déshydratées à l'aide d'une UMDB.

Le site de RW est grand et aéré et donc l'occupation de l'UMDB d'emprise foncière d'environ 60 m² ne gêne pas la circulation. L'unité mobile peut circuler sur la voirie sans difficulté (cf. figure 1 en annexe 6). Néanmoins, le site de BG est compact. Les allées et venues dans cette station sont délicates et la mise en place de l'UMDB est complexe (cf. figure 2 en annexe 6).

Les silos disposent d'un raccordement permettant leur vidange. Ainsi, le prestataire (SEDE) raccorde sa pompe pour prélever les boues liquides du silo. Un polymère Flopam EM 840 (coagulant liquide cationique) est mélangé aux boues après avoir été dilué avec de l'eau par un technicien SEDE. La dilution du polymère favorise sa dispersion autour des charges anioniques à neutraliser. Le mélange boues-polymère est introduit dans la centrifugeuse qui effectue la déshydratation.

Lors des premières campagnes, le centrat retournait en tête de traitement au niveau du poste toutes eaux. Néanmoins, lors des campagnes de 2019 ces retours en tête ont complètement dégradés le

traitement des eaux usées de la STEP BG. En effet, la séparation liquide/solide peut-être difficilement obtenue lorsque la machine n'est pas correctement réglée. Cela a pour conséquence des départs de boues dans le centrat (soit du polymère dans les centrats, puis, du polymère vers les retours en tête de traitement et donc du polymère dans les unités de traitement des eaux).

Cet incident a provoqué un coût supplémentaire sur la facture mensuelle de BG car il a fallu réensemencer le bassin d'aération en allant chercher de la matière dans une STEP extérieure. Et donc par la suite pour éviter de reproduire de la floculation dans la file eau, lors des nouvelles campagnes, une benne supplémentaire a été commandée pour récupérer le centrat en sortie de centrifugeuse afin de le traiter sur une STEP extérieure. La STEP extérieure en question était Salomé car elle est la plus proche et de plus grande capacité que RW ou BG. Elle pouvait accepter une charge supplémentaire.

3.3. Compostage

Une fois les boues déshydratées dans l'unité mobile, elles sont stockées dans un caisson en attente de transport pour un envoi sur site de compostage d'Artois dans le département 62. Le site de compost se situe à 50 km de la STEP soit moins d'une heure de transport. Il est hors territoire de la MEL. Et sur site les boues sont mélangées à des déchets verts pour produire du compost de boues. La vente des composts de boues conformes revient au prestataire.

3.4. Gestion de la file boue par les équipes d'exploitation

Un agent d'exploitation a à sa charge les deux STEP étudiés. Lors des campagnes de déshydratation, il surveille le déroulement de l'opération effectué par le technicien SEDE. Or campagne de boues, il réalise 2 à 3 fois par mois des analyses pour le suivi (en interne) du traitement de la file eau (analyse MES, DB05).

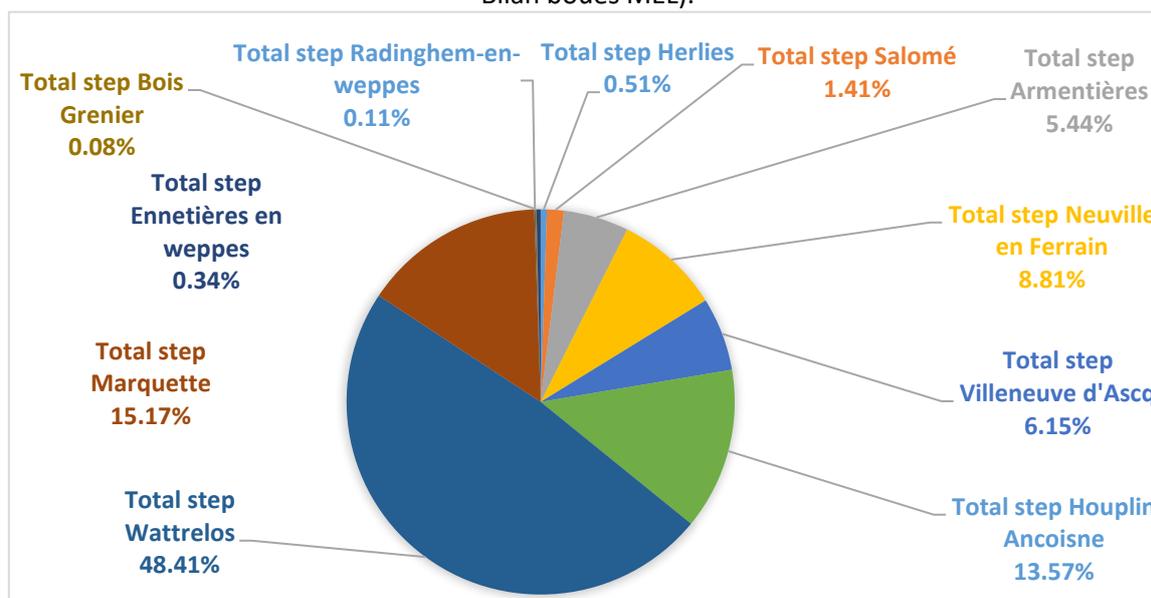
3.5. Caractérisation des boues traitées : en termes de qualité et quantité

L'origine des eaux usées et le type de traitement des STEP de RW et BG donnent des boues biologiques peu concentrées et riches en MO. En effet, selon les analyses de SEDE (durant la campagne de déshydratation de boues), les boues liquides avaient une siccité aux alentours de 2 % soit 20 g/L. Selon les bilans d'analyses de boues déshydratées en 2018 et 2019 (cf. annexe 7), les boues déshydratées de RW et BG étaient riches en MO et avaient une siccité moyenne de 18 % ce qui correspond à des boues pâteuses soit une déshydratation satisfaisante par l'UMDB.

Elles étaient conformes aux teneurs définies dans l'arrêté du 8 janvier 1998. En effet, les éléments indésirables étaient tous inférieurs aux valeurs limites réglementaires. L'élément le plus limitant pour RW était la somme des 4 éléments atteignant 53 % du seuil réglementaire. Pour BG l'élément le plus limitant était le cuivre atteignant 43 % du seuil réglementaire. Ces composés traces proviennent essentiellement de produits de synthèse présents dans les eaux de ruissellement, voiries et toitures et constituent une source principale d'éléments indésirables [17].

La production de boues des deux STEP n'a pas dépassé 100 Tonne de Matières Brutes/an (TMB/an). RW a produit respectivement en 2018 et 2019, 38.22 TMB et 66.50 TMB tandis que BG a produit 20.88 TMB et 44.56 TMB. Ces quantités de boues sont infimes. Elles correspondent à moins de 1 % de la production annuelle des boues brutes des STEP de la MEL.

Graphique 2 : Répartition de la production de boues brutes des STEP de la MEL en 2019 (Source : Bilan boues MEL).



Etant donné ces faibles quantités de boues produites, la MEL estime que les enjeux financiers ne devraient pas être aussi importants ce qui est raisonnablement compréhensible.

3.6. Déshydratation ponctuelle par UMDB : un coût élevé à optimiser

La mise en œuvre d'une UMDB est une opération coûteuse. La location, l'installation et la mise en route de l'équipement est une opération relativement lourde qui pèse d'autant plus dans le coût d'une opération quand celle-ci est de courte durée.

Pour illustrer ce constat ci-dessous sont présentés les coûts de deux campagnes de déshydratation techniquement similaires et qui comprennent :

- l'installation, démontage et nettoyage de l'unité mobile,
- la mise en place d'un groupe électrogène
- la mise à disposition de personnel
- l'opération de déshydratation

Pour ce faire une idée de la valeur haute ou basse du coût de cette prestation, nous l'avons comparé aux prix disponibles du marché (cf. Tableau 11 (a)).

Les caractéristiques de chaque campagne sont les suivantes :

- STEP Radinghem-en-Weppes : durée 1 semaine (mars 2019) / 471 m³ de boues liquides traitées et 29.86 tonnes de boue déshydratées produites (TMB)
- pour la lagune d'Aubers : 10 semaines (fin 2019) / 566 tonnes de boues déshydratées produites

Déshydratation par UMDB – Société SEDE	Quantité	Unité	Prix Unitaire € HT	Prix € HT
Installation matériel hors groupe électrogène	2	Intervention	2400	4 800
Démontage, repli et enlèvement de l'unité de déshydratation mobile – Nettoyage	2	Intervention	2400	4 800

Plue value groupe électrogène	2	Intervention	650	1 300
Plue value groupe électrogène	2	Intervention	650	1 300
Déshydratation sur station	867	m ³	12	10 404
Total € HT				22 604

Déshydratation par UMDB – Société SUEZ	Quantité	Unité	Prix Unitaire € HT	Prix € HT
Installation matériel hors groupe électrogène	2	Intervention	3 976	7 952
Démontage, repli et enlèvement de l'unité de déshydratation mobile – Nettoyage	2	Intervention	3 535	7 070
Plue value groupe électrogène	2	Intervention	62	124
Plue value groupe électrogène	2	Intervention	62	124
Déshydratation des boues bassin aération sur deux postes	66.5	T	79.52	6 610.1
Total € HT				20558

Tableau 11 (a) : Comparaison prix de déshydratation de boues liquides SEDE et concurrents

Pour chaque campagne, le coût de production d'une tonne de boue déshydratée est :

- Radinghem-en-Weppes : 394 euros / TMB
- Aubers : 93 euros / TMB

Comment optimiser le coût de déshydratation ? – 2 pistes

- La location d'une centrifugeuse exploitée par les agents de la station
Un exemple de coût :

Déshydratation par UMDB – Société LCMI + groupe électrogène société SEDE	Quantité	Unité	Prix Unitaire € HT	Prix € HT
Location unité mobile D4L hors groupe électrogène et polymère	2	Semaine	2300	4600
Transport aller-retour	4	Forfait	1650	6600
Technicien 8h J	2	Jour	400	800
Frais de route du Technicien Aller-Retour	2	Forfait	600	1200
Frais de déplacement hôtel repas	2	Jour	200	400
Plue value groupe électrogène	2	Intervention	650	1300
Plue value groupe électrogène	2	Intervention	650	1300
Total € HT				16200

Tableau 11 (b) : Comparaison prix de déshydratation de boues liquides SEDE et concurrents

Le coût à la tonne de boue déshydratée produite serait alors de 271 euros/TMB.

- L'optimisation des prix UMDB dans le contrat « boue »
La société SEDE étant sous contrat avec la MEL pour la gestion de l'ensemble des boues des stations d'épuration c'est « naturellement » qu'elle a bénéficié d'un avenant pour la prise en charge des boues de RW et BG. Cette société ayant également en charge les filières de valorisation, cet avenant permettait également d'y intégrer ces deux nouvelles stations.

Les coûts présentés ci-dessus pourraient cependant être optimisés au renouvellement du contrat :

- Les prix appliqués pour ces campagnes de déshydratation régulières sont à l'origine des prix prévus pour des actions ponctuelles et de secours.

- Ces prix ayant eu peu de poids dans la détermination du coût global du marché (via le Détail estimatif) ils sont moins optimisés par le jeu de la mise en concurrence.
- Passer au paiement à la tonne de boue déshydratée produite plutôt qu'au m³ de boue liquide traité. En effet, la structure actuelle du prix, basée sur le paiement au m³ de boue déshydratée peut apporter un biais. Les périodes de mise en route, d'optimisation des injections de polymère ou de déshydratation de boues très peu concentrées (strates d'eau dans le stockeur) entraînent un coût sans réelle production de boue déshydratée. Le coût basé sur les mesures du débitmètre de boue liquide dont l'incertitude est de 10 % peut également jouer et ne pas correspondre aux MS estimées sur base de la pesée, sur pont bascule, des boues déshydratées. Un ajustement est donc parfois nécessaire pour faire correspondre les MS estimées dans les m³ de boue flottée et les MS estimées dans les boues déshydratées (cf. annexe 9).

3.7. Coûts de la filière de traitement de boues liquides

Le coût du traitement des boues comprend un ensemble de coûts variables et coûts fixes. Les prix variables dépendant de la quantité de boues à traiter tandis que les prix fixes sont indépendant de cette quantité.

Les prix variables sont :

- L'opération de déshydratation avec unité mobile
- Le transport des boues déshydratées
- La valorisation des boues
- Les analyses de boues

L'opération de déshydratation coûte 14 739 € HT et correspond aux prix variables de la prestation de SEDE à savoir la déshydratation sur station et la plus-value du groupe électrogène (cf. Tableau 12).

Le transport correspond au transport des boues déshydratées de la STEP au centre de compostage. Il coûte 440.00 € par fréquence dans le mois. Et pour un transfert de 66.5 TMB il faut prévoir 4 fréquences soit 2 fréquences par campagnes.

La valorisation des boues correspond au compostage des boues. Il coûte 49.00 €/TMB déshydratées.

Les analyses de boues correspondent à 1 analyse des ETM et CTO avant UMDB et 2 analyses complètes de boues centrifugées. Cependant la MEL a réalisé, avant UMDB, des analyses de matières fertilisantes en plus des ETM et CTO ce qui revient à dire qu'elle a réalisé 3 analyses complètes au total. Une analyse complète correspond ainsi à : une série de valorisation agronomique (34.50 €) et d'oligo-éléments (31.00 €), une analyse de mercure (28.20 €) et une série ETM et CTO (sans mercure) par VSE (4.10 €).

Le total des coûts variables est présenté dans le tableau 12 et le détail des calculs est présenté aux tableaux n°1 en annexe 13.

Désignation	Prix € HT
Déshydratation	14 739
Transport des boues déshydratées	1 760
Valorisation	3 258.50
Analyses	293.40
Total des coûts variables	20 051 €

Tableau 12 : Total des coûts variables du traitement par UMDB (Source : MEL)

Les prix fixes sont :

- Le forfait mensuel
- Le montage/démontage et nettoyage de l'UMDB

Le forfait mensuel coûte 176.00 € HT et comprend les études et recherches sur les boues.

Le montage, démontage et nettoyage de l'UMDB coûte 12 200 € HT (cf. tableau 1 en annexe 13). Il est effectué à chaque campagne.

Le coût de l'opération par an correspond ainsi aux coûts variables et fixes soit :

$$V_0 = 20\,051 + 14\,312$$

$$V_0 = 34\,363 \text{ € HT/an}$$

L'indice de révision de l'année 2019 est de 1.058 et la TVA de 10 %. En utilisant ces valeurs, le coût versé à la SEDE est de 39 992 € TTC/an.

En utilisant la formule du Coût Global Actualisé, nous avons été en mesure de donner le coût de ce type de traitement sur 20 ans [22] :

$$CGA = I + \sum_{n=1}^N \left(d_n \frac{1}{(1+a)^n} \right)$$

$$CGA = I + d * \frac{1 - (1+a)^{-N}}{a}$$

Avec :

I = le coût d'investissement

d = le coût de fonctionnement

a = le taux d'actualisation à 4% (rapport Lebègue)

N = 20 ans

$$CGA = 543\,498 \text{ € TTC}$$

Cette méthode de calcul a été réutilisée dans la partie 4 pour pouvoir comparer différents CGA.

3.8. Emissions de gaz à effet de serre de la filière

La méthodologie utilisée pour évaluer les émissions de Gaz à Effet de Serre de l'UMDB a pour origine le rapport GestaBoues de l'INRAE.

Etapes de traitement et valorisation (Emissions en kg eq CO2)				
	Stockage	Déshydratation	Compostage	Total
Emissions directes	0		10 536	10 536
Réactifs		3 220		3 220
Electricité	19	227	216	462
Combustible			1 116	1 116
Transport		1 132	233	1 365
Infrastructures	0.00028		121	121
Emissions évitées				0
Total	19	4 579	12 222	16 820

Tableau 13 : Emissions de Gaz à Effet de Serre par l'UMDB (Source : INRAE)

La déshydratation par UMDB produit près de 16 820 kg eq CO2 soit 17 TeqCO2 (tous gaz confondus) sur un an d'exploitation (cf. annexe 14).

Les gaz sont répartis de la façon suivante :

- CO₂ = 6.28 TeqCO₂,
- N₂O = 9.54 TeqCO₂,
- CH₄ = 1 TeqCO₂,

- Les émissions liées au stockage sont de l'ordre de 0.02 TeqCO₂. La majorité des émissions sont liées à la consommation électrique du silo aéré.
- La quasi-totalité des émissions de déshydratation sont liées au transport des réactifs et utilisation de l'électricité pour l'opération. L'étape de déshydratation émet 4.6 Teq CO₂.
- Les émissions liées au compostage sont de l'ordre de 12 TeqCO₂. La quasi-totalité des émissions sont liées aux émissions directes de N₂O et CH₄ (soit 93 %). 5 % des émissions sont liées au transport des boues de la STEP au centre de compostage puis durant les transports durant le processus de compostage. 1 % de gaz à effet de serre sont issues de l'infrastructure et 1 % à la consommation d'électricité de la pompe d'alimentation des lits.

Etant donné que le traitement a lieu deux fois par an ce qui correspond à 2 semaines par an soit à peu près 14 jours, nous pouvons dire que les réelles émissions de GES du mélange de boues correspondent à environ 0.65 Teq CO₂.

Conclusion

Les filières de traitement de boues des STEP RW et BR sont semblables. Elles sont composées d'un silo de stockage des boues puis d'une étape de déshydratation sur une UMDB. Une fois traitées les boues sont transportées en centre compostage.

Les boues produites en 2018 et 2019 de RW et BG étaient conformes à l'arrêté du 8 Janvier 1998, riche en matière organique avec une siccité moyenne de 18 %. Cependant moins de 100 TMB/an ont été produites ce qui représente moins de 1 % de la production annuelle des boues produites en sortie de STEP de la MEL et pour un coût de 34 K € HT/an. L'opération de déshydratation ponctuelle (1 semaine) sur UMDB est une opération coûteuse. Des optimisations pourraient être apportées comme la location d'une centrifugeuse sans la prestation associée ou une autre structuration des prix du marché « boue ». Mais la recherche d'une filière pérenne et dédiée à chacune des stations doit cependant être recherchée.

4. Proposition de filières alternatives à l'UMDB

Les impacts techniques et financiers de la déshydratation par unité mobile imposent de nouvelles réflexions. Ainsi sont exposés dans cette partie trois solutions alternatives à l'UMDB prenant en compte la demande de la MEL (durabilité, efficacité, moindre coûts). En fin de partie le choix de filière se concrétise à l'aide d'une méthode reconnue d'aide à la décision appelé Electre I.

Le tableau suivant résume le point de départ de la réflexion menée :

Prise en compte de :	Conséquence	Possibilités
Ouvrages existants	Utiliser le silo à boues	Etendre la file boues avec des procédés de déshydratation : <ul style="list-style-type: none"> • mécanique (fixe ou mobile) • naturelle (LSPR)

Schéma directeur de la MEL	Destination des boues pour les petites STEP est le compostage	Besoin d'effectuer une déshydratation des boues en amont pour réduire les coûts de transports (boues fraîches acceptées en compostage)
Règlementation actuelle	Hygiénisation dans le cadre du covid-19 obligatoire des boues avant épandage agricole	Compostage, Chaulage (à la chaux vive ou éteinte), Séchage > 90% (si mélange de boues liquides aux boues d'une autre STEP)
Objectif de pérennité	Projet peu onéreux	Evaluation du coût d'investissement et d'exploitation des filières alternatives
	Faible dépendance de personnel	Simplicité technique de la filière
	Filière efficace	Qualité de boues satisfaisantes, bonne gestion des concentrats
	Durabilité	Dimensionnement filière doit être basé sur la charge nominale de la station RW : 1700 EH ; 42 TMS/an BG : 1400 EH ; 32 TMS/an Evaluer l'impact environnemental de la filière

Tableau 14 : Statu quo et propositions de filières alternatives

Ainsi sont proposées ci-après des solutions de traitement des boues liquides par déshydratation mécanique, naturelle et séchage. Toutes les solutions proposées se basent sur la production de boues aux charges nominales de la STEP de RW (42 TMS/an). Est exclus la solution des épandages des boues liquides pour les raisons suivantes :

- Choix non compatible avec le schéma directeur de la MEL
- L'épandage des boues liquides ne répond pas aux exigences d'hygiénisation.

4.1. Déshydratation mécanique : filtre de type presse à bandes combiné d'une table d'égouttage

Nous avons dressé en annexe 10 un tableau mettant en avant les conditions techniques et économiques des procédés de déshydratation mécanique (centrifugeuse, filtre à bandes, filtre à plateaux). De ce tableau, il en sort que les filtres à bandes sont les équipements le plus adaptés aux STEP à l'étude. De plus pour de petites unités comme RW et BG, ce qui est d'autant plus recommandé c'est la combinaison table égouttage et filtre à bandes. [18]

Ainsi, pour cette première solution, nous supposons que la MEL passe un marché de travaux afin de choisir la meilleure offre de combinaison table égouttage et filtre à bandes pour RW et BG. Puis, après avoir réalisé un abattage des arbres présents sur les parcelles disponibles des sites, le candidat choisi construit un bâtiment contenant les équipements permettant de réaliser la déshydratation des boues liquides à savoir : une centrale automatique de production de polymère et la combinaison table égouttage/filtre à bande.

Lors de la mise en service de la filière, les boues sont soit extraites du silo à boues (qui sert à homogénéiser les boues) soit extraites depuis le bassin d'aération. La table d'égouttage, va assurer un épaissement préalable à la boue qui perdra en volume d'eau. Et le filtre à bandes comprimera

« la boue à travers deux toiles filtrantes qui suivent un arrangement de rouleaux, au moyen desquels s'applique une pression permettant la déshydratation.

Les coûts de scénario s'inspirent de la construction d'une combinaison table égouttage/filtre à bandes de la STEP de Volonne (04) qui génère aujourd'hui 14.14 TMS/an soit le même ordre de grandeur de boues produites à RW en 2019 (15.57 TMS). Le filtre à bandes de Volonne est dimensionné pour recevoir 100 kg MS/h et 6 kg MA /TMS. Les polymères sont préparés partir de produits commerciaux en solution à 50 % de matières actives. La siccité de sortie des boues obtenue est de 15 %. Appliqué à la charge nominal de RW, le filtre à bandes de RW aura un fonctionnement de 8h/ semaine.

- Technicité de la combinaison table d'égouttage et filtre à bandes

Avantages
Gain de place car machine d'emprise 40 m ² et placé dans un local posé sur skid pour des éventuels déplacements
Augmentation de la capacité des filtres à bandes d'environ 30 % en termes de charge massique c'est-à-dire que la capacité de boues acceptées est plus importante sur le combiné que sur un filtres à bande seul
Boues valorisable en agriculture car siccité de sortie minimum 15 %
Gain de deux points en siccité avec la combinaison table et filtre
Facilité d'entretien car technique de lavage semblable à la fois pour la table et les filtres
Production automatique de polymère – autonomie équipement
Inconvénients
Limitation dans la pression : si pression trop importante alors fluage (nécessité de surveillance par du personnel) si pression trop faible alors mauvaise déshydratation
Entartrage des toiles (causé par un mauvais dosage polymère, lavage) implique un lavage régulier
Le rendement de capture des MES dépasse difficilement les 95% (néanmoins cela reste un bon taux de capture)
Nécessité de construction d'un bâtiment en béton pour la protection des équipements
Nécessité d'agent d'exploitation au moins 2 fois par semaine

Tableau 15 : Avantages et inconvénients techniques de la combinaison table égouttage et filtre à bandes (Source : OTV)

- Coût de la combinaison table d'égouttage et filtres à bande

Cette solution implique d'engager les coûts d'investissement suivants :

Désignation	Prix €
Génie civil	64 135
Equipements	111 665
Total HT	175 800
Total TTC (avec TVA à 19.6 %)	210 257

Tableau 16 : Coût d'investissement de la construction d'un combiné table égouttage et filtre à bandes (Source : SAUR)

Les coûts variables sont :

- **La déshydratation** correspond au coût du polymère liquide soit 4.23€/kg. Pour un polymère en solution à 50 % de matières actives (MA) et une consommation en polymère sur filtre de 6 kg de MA/TMS il faut commander 504 kg de polymère.
- **Le transport** correspond au transport des boues après traitement. Un transfert par mois est réalisé.

- **La valorisation** correspond au compostage au prix de 49.00 €/TMB.

Désignation	Prix € HT
Déshydratation	2132
Transport des boues déshydratées	4760
Valorisation	13720
Analyses	195.60
Total des coûts variables	20 808

Tableau 17 : Coûts variables du traitement de boues de RW avec un combiné filtre à bandes et table égouttage (Source : MEL)

Le prix fixe correspond au forfait mensuel à 176.00 €.

Le détail des coûts variables et fixes est présenté au tableau 2 en annexe 13.

Ainsi le coût de l'opération par an correspond aux coûts variables et aux coûts fixes soit 24 249 € HT et 26 674 € TTC (en supposant un indice de révision de 1.058 et une TVA de 10 %).

Le coût CGA sur 20 ans sera de 572 762 € TTC dont le coût versé à la SEDE sera de 362 505 € TTC.

- Conséquences environnementale de la combinaison filtres à bande et table d'égouttage

La méthodologie utilisée pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre de la combinaison table d'égouttage/filtre à bandes a pour origine le rapport GestaBoues de l'INRAE.

Etapas de traitement et valorisation (Emissions en kg eq CO2)					
	Stockage	Epaississement	Déshydratation	Compostage	Total
Emissions directes	0.0			21490.0	21490
Réactifs		252.0			252
Electricité	19.0	1115.0	75.0	238.0	1447
Combustible				1228.0	1228
Transport		887.0		257.0	1144
Infrastructures	0.3	0.1	1.1	127.0	129
Emissions évitées					0
Total	19.30	2254.10	76.10	23340.00	25690

Tableau 18 : Emission de gaz à effet de serre de la filière filtres à bande et table d'égouttage (Source : INRAE)

La filière produit 25690 kg soit 26 Tonnes eqCO2 (tous gaz confondus) sur un an d'exploitation.

Les gaz sont répartis de la façon suivante :

- CO2 = 4.2 TeqCO2,
- N2O = 10.5 TeqCO2,
- CH4 = 11 TeqCO2,
- Emissions évitées = 0 TeqCO2 issus de la séquestration du carbone

Les émissions liées au stockage sont de l'ordre de 0.02 TeqCO2. La majorité de ces émissions (98%) sont issues de la consommation électrique due à l'agitation du silo. 1.4 % sont issues des émissions dues à l'infrastructure.

Les émissions liées à l'épaississement sont de l'ordre de 2.2 TeqCO2 de la consommation électrique de la table à égouttage (68 %). Les autres émissions majoritaires proviennent du transport et de la préparation du polymère respectivement de 23 % et 10 %

Lors de la déshydratation des boues, 98 % des émissions sont générées par la consommation électrique du filtre à bande. Le restant des émissions sont dues à l'infrastructure de déshydratation.

Les émissions liées au compostage génèrent 92 % de GES issues de l'opération de compostage, 52 % proviennent du diesel utilisé pour les déplacements de véhicule. 1% pour le transport des boues déshydratées sur le site de compostage, 1% pour la consommation électrique sur le site de compostage et le restant pour l'infrastructure.

4.2. Lits de séchage plantés de roseaux

La seconde solution alternative consiste à construire des LSPR sur site de RW et BG.

Ce scénario se décline de la façon suivante :

Après avoir passé un appel d'offre d'un marché de travaux et choisi une entreprise de travaux qui répond au mieux au marché, la MEL fait construire des LSPR pour chacune de ces STEP (RW et BG) à proximité des bassins d'aération. Il s'agirait de construire pour chaque STEP, 6 lits de 50 kg/m²/an sur les parcelles disponibles. Après la mise en service et la bonne exploitation des lits (faucardage des roseaux, mise en place de la bonne alimentation et repos des lits), elle met en place tous les 10 ans le curage des boues par prestation de service.

Cela signifie que la MEL réalise une construction sur site et cela lui demandera de prévoir des investissements pour ces réalisations.

Le fonctionnement du LSPR ayant déjà été présenté en partie 2.5, dans cette partie il s'agira d'utiliser les éléments composant la structure des lits pour chiffrer la construction et commenter la technicité de la solution.

Ainsi, une installation de lit se compose de casiers béton ou bassins terrassés, de système de drainage et d'un massif filtrant (cf. figure 13 ci-après).

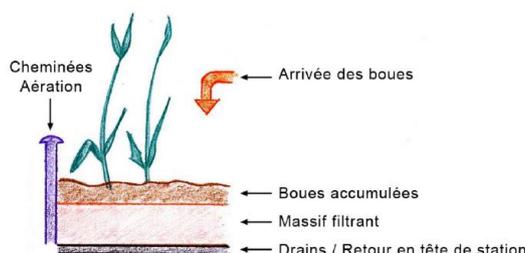


Figure 13 Structure d'un lit de séchage planté de roseaux (Source Bazinette)

Chaque bassin est recouvert d'une géomembrane étanche pour éviter toute infiltration des boues et percolât dans l'environnement. Un système de drains sous les lits permet la récupération du percolât pour un retour gravitaire en tête de station et favorise l'aération du lit. Des cheminées d'aération disposée en tête des drains ont aussi cette fonction d'aération. Puis le massif filtrant composé de la couche drainante et roseaux assure la déshydratation des boues. Les boues amenées sur les lits via des pompes et un système de canalisation, seront réparties sur les lits grâce à des répartiteurs et vannes.

- Technicités des lits de séchage plantés de roseaux

Les performances des lits reposent sur la qualité et quantité des percolâts et du dépôt de boues. [28]

- Le volume des percolâts représenterait environ 6 % du volume de la charge entrante ce qui signifierait que la part des percolâts serait négligeable sur la quantité de charge traitée sur la station (Lesavre et Iwema 2002)

- D'après plusieurs auteurs (Lienard 1999, Huertas et al 2004), la concentration en MO des percolâts est faible : entre 100 et 150 mg/L contre 300 et 350 mg/L en MES. Les LSPR abattent de manière efficace les MES et DCO.
- Les éléments azotés se retrouvant dans ces derniers proviennent de l'oxydation des ions ammonium après une phase d'alimentation des lits. Celle-ci fluctue car dépendante des phases d'alimentation et repos. Il est à noter que Huertas et al 2004 mesurent 105 mg N-NO₃/L.
- Il y a un retour en tête de traitement de la pollution phosphatée. Mais ces retours sont négligeables par rapport aux entrées de charges.
- Il y a une réduction du volume de boues initiale suite à la déshydratation et la minéralisation qui se produisent dans les lits. Par retour d'expérience les boues déshydratées d'Ennetières-en-weppes avaient une siccité de 17.8 %. (La siccité initiale des boues étaient de 0.4%). Ce dépôt de boues est donc valorisable en compostage.
- De manière général le dépôt de boues est valorisable en agriculture du fait de sa valeur agronomique et de sa conformité vis-à-vis de la réglementation en vigueur (abattement de certains composé trace organique et métallique conjoint cependant à leur accumulation).
- D'après la littérature, les LSPR entraînent la réduction d'éléments pathogènes (Nielsen et Willoughby, 2005) soit une étape d'hygiénisation.
- Enfin, aucune nuisance olfactive ne se dégage de cette technique s'il est bien dimensionnés.

Les inconvénients de cette technique sont les suivants :

- La mise en service en phase nominal des lits constitue le point critique de la technique. Il est primordial d'avoir une bonne croissance des roseaux et pour ce faire une alimentation en charge progressive des lits doit être mise en œuvre. La phase nominale ne peut intervenir que quand la densité des roseaux est supérieure à 250 tiges/m² (Troesch 2009) et ceci peut correspondre à une durée de 1 à 2 ans après la plantation des roseaux.
- L'accumulation des boues engendre un stockage des micropolluants connus et émergents dans les lits tels que les produits pharmaceutiques et les pesticides. Ils peuvent faire l'objet d'une contrainte pour s'engager dans ce type de filière. Néanmoins ces molécules adsorbées dans les boues comme par exemple les ETM restent inférieures aux seuils réglementaires (Begg et al, 2011). [28] Un grand nombre de micropolluants ont d'ailleurs été retrouvés dans les autres types de filière de traitement (celles qui ne stockent pas les boues aussi longtemps que les LSPR) avec des concentrations après traitement dans les mêmes gammes logarithmiques que celles retrouvées pour les LSPR. [17] Par ailleurs, d'après la thèse de D. Lachassagne sur le devenir des micropolluants dans les boues, une étape de stabilisation ajoutée au traitement tel que le compostage pourrait réduire la remobilisation des métaux dans les sols. En effet, la désorption est inefficace pour le compostage car il présente un niveau d'humification élevé. Et enfin, « Le lit de séchage planté de roseaux fonctionnant sous 2 semaines d'alimentation et 14 semaines de repos a montré de meilleures efficacités d'élimination que celui fonctionnant sous 2 jours d'alimentation et 14 jours de repos ». (source ARMISTIQ Action D 2014).

D'autres avantages, plutôt d'ordre financier sont à prendre en compte :

- Il n'y a besoin d'aucun réactif pour conditionner les boues donc pas de dépense dû au réactif comme le présuppose les techniques de déshydratation mécanique. De même, pour la

consommatrice en énergie il n'y a besoin d'une seule pompe en fonctionnement pour l'alimentation des lits. Cela signifie une faible consommation énergétique contrairement aux techniques par voie mécanique (cf. annexe 10).

- Les lits permettent de combiner les étapes d'épaississement et déshydratation dans un même ouvrage. Un seul dispositif est donc à prévoir. Cependant ce dispositif nécessite un espace important. Par ailleurs, les STEP disposent sur leur parcelle du terrain disponible et constructible (zone A et N) donc il y aurait une possibilité de construction sans achat de foncier (cf. annexe 15). Ce commentaire n'est pas totalement valable pour BG qui nécessite un achat de foncier pour être confortable en termes d'espace voirie.
- L'exploitation consiste au faucardage des roseaux et au curage des boues environ tous les 10 ans. Cependant ce curage est lourd, il nécessite d'avoir une voirie adaptée et demande d'accueillir des engins spécifiques pour une bonne vidange des lits.
- Les lits s'intègrent au paysage (aspect urbanistique et sociétal). L'utilisation de la technique de déblais-remblais est moins onéreuse que celle utilisant des casiers bétons (Meunier Julie, 2012). Or les STEP disposent d'espace donc le déblai est d'autant plus une solution à privilégier.

- Coûts des lits de séchage plantés de roseaux

Cette solution prend en compte deux types de coûts : des coûts d'investissement pour la construction des lits et des coûts d'exploitation pour le curage des boues et l'entretien des roseaux.

- **Coût d'investissement**

La construction des lits comprend le prix :

- du massif filtrant
- du terrassement
- de la voirie
- des canalisations
- du matériel

Grâce aux données de production de boue annuelle des STEP de RW et BR, nous avons réalisé un pré-dimensionnement des lits nous permettant de chiffrer la construction de 6 lits de 50 kg/m²/an.

Nous illustrons dans ce rapport le coût d'investissement avec les données de pré-dimensionnement de LSPR de RW. Les prix unitaires sont tirés du marché de construction de LSPR de la STEP d'Aubers.

	Prix € HT
Massif filtrant	65 627
Canalisations	6 8678
Terrassement et voirie des lits	82 600
Equipement	11 325
Total	166 420

Tableau 19 : Coût investissement LSPR de la STEP de Radinghem-en-Weppes (Source : Entreprise Sources)

Le coût d'investissement de BR sera majoré d'environ [1077 à 2 112€ HT] (2.50 €/m²) pour l'achat de parcelles supplémentaires.

- **Coûts d'exploitation**

Les coûts d'exploitation correspondent au curage des lits tous les 10 ans avec une prise de deux analyses lors des curages.

Le scénario d'exploitation de LSPR comprend :

- Le prix du curage et remise en état des lits
- Le prix du transport après curage
- Le prix de la valorisation
- Le prix des analyses

Le traitement est la prestation de curage de boues et faucardage des roseaux avec replantation de roseaux et mise en service de fourniture. Il est au prix de 97.00 €/T.

Le transport correspond au transport de boues de la STEP au centre de compostage. Cela coûte 14.30 €/T.

La valorisation correspond au coût du compostage de boues au prix de 49.00 €/T.

Désignation	Prix € HT
Traitement	13580
Transport des boues déshydratées	2002
Valorisation ou élimination	6860
Curage 1 lit	22442 €
Analyses	195.6 €
Total des coûts	22 638 €

Tableau 20 : Coûts d'exploitation des LSPR (Source : MEL)

Le détail des coûts d'exploitation est présenté en annexe 13 tableau 3. La siccité de sortie des boues est de 25 % et le séchage et minéralisation produit une réduction de 50 % des MS.

Le curage de lit s'accompagne de deux analyses. Le curage de 6 lits mis en service pendant 8 ans coûtera donc 22 638 € HT soit 2 994 € HT/an et 3 293.20 € TTC/an (en supposant un indice de révision de 1.058 et une TVA de 10 %).

Le CGA sur 20 ans sera de 238 435.06 € TTC dont 72 015.29 € TTC versé à SEDE.

- Conséquences environnementales des LSPR

Etapas de traitement et valorisation (Emissions en ke eq CO2)			
	LSPR	Compostage	Total
Emissions directes	28169	10256	38425
Réactifs		0	0
Electricité	8	113	121
Combustible	0	1	1
Transport	0	123	123
Infrastructures	1337	61	1398
Emissions évitées	0	0	0
Total	29514	10554	40067

Tableau 21 : Emissions des gaz à effets de serre des LSPR (Source : INRAE)

Les LSPR de boues produisent près de 40067 kg eqCO2 soit 40 TeqCO2 (tous gaz confondus) sur un an d'exploitation (cf. annexe 13).

Les gaz sont répartis de la façon suivante :

- CO2 = 2.3 TeqCO2,
- N2O = 31.3 TeqCO2,
- CH4 = 7.2 TeqCO2,

- Emissions évitées = 0 TeqCO₂

Les émissions liées au LSPR sont d'environ 30 TeqCO₂. La quasi-totalité des émissions sont liées aux émissions directes de N₂O et CH₄ (soit 97 %). 3 % des émissions sont liées à l'infrastructure et le reste est dû à la consommation d'électricité de la pompe d'alimentation des lits.

Les émissions liées au compostage sont de l'ordre de 10.5 TeqCO₂. La quasi-totalité des émissions sont liées aux émissions directes de N₂O et CH₄ (soit 91 %). 5 % des émissions sont liées au combustible utilisé durant l'opération de compostage, 1 % à la consommation d'électricité utilisé sur le site de compostage et 1% pour les transports de boues de la STEP au centre de compostage. Puis moins de 1 % de GES sont issues de l'infrastructure

4.3. Mélange de boues de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier avec les boues d'Houplin Ancoisne

Le scénario de mélange de boues se traduit de la façon suivante :

La MEL effectue un mélange de boues liquides de la STEP de RW avec les boues de la STEP d'Houplin Ancoisne (HA) alterné tous les deux mois d'un mélange de boues liquides de la STEP de BG avec les boues de la STEP d'HA. Cela signifie 6 mélanges dans l'année pour chaque STEP.

Dans ce scénario, SEDE se charge de la prestation de transfert des boues liquides des petites STEP vers celle d'HA et prend en charge les boues traitées ainsi que leur valorisation ou élimination.

Le transfert intervient en camion-citerne après l'obtention des analyses de boues liquides et validation de leur innocuité conformément aux valeurs seuils en ETM et CTO présentées par l'arrêté du 8 janvier 1998.

Néanmoins, la MEL ne disposant pas d'autorisation de mélange pour ce type de traitement donc elle réalise en amont de toutes opérations un dossier d'autorisation de mélange de boues suivant la doctrine boues (cf. annexe 11). Nous supposons dans ce scénario qu'elle reçoit un avis favorable des autorités administratives et qu'elle peut donc effectuer les mélanges sur site d'HA. En effet, le mélange de différentes boues de steps doit être autorisé par les services de Police de l'Eau. Dans l'attente de filières de boue pérennes sur RW et BG la MEL a souhaité d'ors et déjà déposer un dossier de demande d'autorisation au premier semestre 2020. Ceci afin de sécuriser la filière d'évacuation des boues des petites STEP et ne pas être totalement dépendant de la mise en oeuvre d'une UMDB. Et, le cas échéant, être en position de force pour renégocier le coût de l'opération de deshydratation mobile. Début 2020 j'ai eu en charge de recueillir toutes les informations administratives et techniques auprès de la SEDE et des exploitants pour monter le dossier de demande d'autorisation. Le dossier a été déposé en 2020, le SAFEGE a déjà donné un avis consultatif positif et la MEL est en attente de l'avis de la Police de l'Eau. L'avis a de forte chance d'être positif car les besoins d'hygiénisation des boues apparus depuis la crise du Covid19 est favorable aux mélanges aboutissant à des boues chaulées de siccité plus élevées.

HA a été sélectionné pour recevoir les boues liquides de RW et BG car elle répond au mieux aux critères de la doctrine de mélange de boues (cf. annexe 11). Cependant, il est nécessaire de développer dans ce rapport le fonctionnement de la file boues du site car la doctrine boues impose que le mélange s'effectue dans une cuve présente sur site récepteur or le fonctionnement de la STEP d'HA est plutôt complexe.

La station d'épuration d'HA a une capacité de 172 000 EH. Elle est connue pour être située sur une zone de champ captant et une reconstruction est prévue dans les années à venir.

La STEP d'HA se compose de deux files de traitement : file eau et boues (cf. Annexe 12).

Les eaux usées sont traitées selon un traitement primaire et un traitement biologique.

Les boues produites au niveau de la décantation primaire sont dirigées vers un épaisseur statique. Une fois épaissies, elles sont envoyées dans un stockeur-mélangeur de 300 m³.

Les boues extraites du traitement biologique sont épaissies sur un flottateur et envoyées vers le même stockeur-mélangeur via une cuve à boues flottées (non représentée sur le synoptique de l'annexe 12). Une fois les deux types de boues mélangées dans le stockeur-mélangeur, elles sont déshydratées sur centrifugeuses, et déshydratées elles sont stockées en bennes.

Les boues déshydratées peuvent alors emprunter différentes filières.

- Séchage à 90% :

Les bennes de boues sont transportées sur la station de Villeneuve d'Ascq (VA - MEL). Elles sont séchées à 90 % dans un sécheur puis stockées dans le bâtiment boues du site de VA. Pour rejoindre la filière séchage, les boues de HA doivent respecter plusieurs critères de pH (taux de chaux) et de ratio de mélange boue primaire/boue biologique

- Compostage :

Si le sécheur est en maintenance ou en panne, ou que les boues de HA ne respectent pas les critères de conformités du sécheur, les boues sont envoyées en filière de compostage.

- Stockage en boues de champ :

En période d'épandage, les boues peuvent être stockées en bout de champ dans l'attente des résultats d'analyse pour ensuite être épandues.

- ISDND :

Si les boues sont polluées, elles sont dirigées en ISDND.

- **Les contraintes de mise en œuvre**

Les contraintes imposées par le sécheur sont : les boues de HA obtenues par mélange de boues primaires et de boues biologiques. Les quantités relatives de chaque boue impactent la structure finale de la boue déshydratées sur HA et la qualité du séchage sur VA. Pour atteindre son meilleur niveau de performance, le sécheur impose aux boues de HA un ratio optimum de 60 % de boues biologiques et 40 % de boues primaires. Le ratio 70/30 pouvant toutefois être accepté. En dehors de ces plages les rendements du sécheur chutent et les bourrages et arrêts de l'équipement se multiplient.

Les contraintes et adaptations nécessaires du site de HA : Pour obtenir le ratio attendu dans le stockeur-mélangeur, le mélange des boues est piloté par un ensemble de débitmètres et sondes de mesure de la matière sèche positionné sur les conduites d'alimentation en boue en amont du stockeur-mélangeur.

Afin de répondre au mieux aux exigences de la doctrine boue, les boues liquides devront être dépotées dans ce stockeur-mélangeur de 300 m³. Mais ce point de dépotage va induire une refonte du programme de l'automate de contrôle du ratio afin de tenir compte de ces apports.

C'est pourquoi le dossier présente également deux autres points de dépotage qui, une fois autorisés pourront être testés et apporteront plus de souplesse pour l'intégration des boues liquides à la filière boue de HA :

- Un dépotage gravitaire à l'amont des décanteurs primaires
- Un dépotage par raccord dans la cuve de boues flottées de 20 m³
- Un dépotage par raccord dans le stockeur-mélangeur de 300 m³ avec une nécessité de modifier l'automatisme pour obtenir le bon ratio

Les avantages et inconvénients/interrogations des trois points de dépotage sont présentés dans le tableau 22.

Solution d'injection	Avantages	Inconvénients/interrogations	Si on continue à sécher à Villeneuve : Comment caractériser le ratio des boues apportées ?
Boues injectées dans le stockeur-mélangeur	<p>Tuyau existant donc raccord facile</p> <p>Sonde de niveau dans la cuve donc pratiquement pas besoin de surveillance des agents Suez pour surveiller que le silo ne se remplisse pas à son maximum</p>	<p>Peu freiner la filière HA en limitant le remplissage du stockeur pour pouvoir recevoir les boues extérieures</p> <p>Baisse de la concentration des boues car les boues extérieures sont peu concentrées et donc limite la charge acceptée par les centrifugeuses</p>	<p>Modification automatique obligatoire (réalisation par un prestataire automatique pour recalculer le ratio moyen) : L'ajout d'une certaine charge de boues biologiques par camion n'est pas pris en compte par les sondes situées en amont du stockeur-mélangeur</p>
Boues injectées en amont des décanteurs primaires	<p>Simple tuyau du camion est suffisant (transfert gravitaire)</p> <p>Pas de limite de quantité d'apport</p>	<p>Boues liquides (considérées comme boues primaires) seront mélangées aux boues primaires d'HA. Impact inconnu sur la structure du mélange final (ratio)</p> <p>Les boues seront par contre épaissies avant le mélange et auront de ce fait moins d'impact sur les rendements de la filière boue de HA</p>	<p>Boues comptées comme primaires via l'épaississeur : Augmentation forfaitaire du ratio à chaque camion Actuellement déjà réglable en supervision.</p>
Boues injectées dans la bâche à boues flottées	<p>Moins de dilution dans le stockeur</p> <p>Pas de modification de l'automatisme si les boues apportées sont considérées comme 100% biologiques</p>	<p>Freine un peu la production de boues bio de la station car dépotage plus long (en 3 fois environ)</p> <p>Nécessité de la surveillance par agent Suez</p> <p>Dépotage plus difficile (longueur de tuyau et plus de dénivelé)</p>	<p>Boues comptées comme biologiques en sortie de flottateur. Elles ne seront pas épaissies mais leur faible concentration sera prise en compte par l'automatisme de contrôle du ratio.</p>

Tableau 22 : Avantages et inconvénients des points de dépotage

Ces différents points d'injection présentent des avantages et des inconvénients qui seront précisés par l'expérimentation. Ils permettront également une souplesse de gestion lors des périodes de faible quantité de boue primaire (pluviosité faible). Le point d'injection le plus pratique serait donc le stockeur-mélangeur mais celui-ci demande une réadaptation de l'automatisme. Les autres points d'injection sont plus rustiques mais ne nécessitent pas de changer l'automatisme. Sachant que le ratio 60/40 % est parfois difficile à obtenir selon la période et que cela oblige les agents à passer en manuel, garder les trois options d'injection permet une souplesse d'exploitation.

- Points techniques du mélange des boues

Les avantages techniques du mélange sont les suivants :

- Les boues de RW et BR garantissent une valeur agronomique en phosphore et azote. Elles représentent respectivement 0.5 % et 0.4 % de la production annuelle en MS de la station d'HA ce qui n'impacte pas le bilan qualitatif et quantitatif des boues d'HA.
- Les boues en sortie de centrifugeuse d'HA seront capables d'atteindre une siccité de l'ordre de 29 % ce qui les rend favorablement valorisables en épandage agricole et en compostage. Et si elles sont séchées sur le sécheur de VA, elles obtiendront des valeurs de siccité de plus de 90 % ce qui les rend favorables à l'épandage agricole. Ces deux voies sont privilégiées dans le schéma directeur de la MEL.
- Il n'y aura donc pas de construction sur site car les boues liquides sont directement transportés par un camion-citerne sur le site d'HA afin d'être mélangée aux boues liquides ou pré-épaissie d'HA.
- Le site d'HA dispose d'une filière de déshydratation mécanique de type centrifugeuse. La technique de déshydratation par centrifugeuse est largement maîtrisée par les agents d'HA.

Les inconvénients techniques du mélange sont les suivants :

- Le traitement des boues n'est pas continu (soutirage au niveau du silo tous les deux mois) ce qui nécessite d'apporter une attention particulière sur la traçabilité des boues et demande aux agents une nouvelle adaptation sur le traitement.
- Il est nécessaire de respecter le ratio 60/40 % si les boues sont séchées et pour ce faire il convient de trouver le point d'injection stratégique sur site d'HA qui permettra de respecter au mieux ce ratio.
- Les centrifugeuses d'HA sont alimentées par des boues à 30g/l et ne peuvent pas recevoir des boues de moins de 25 g/L. Cela ajoute une contrainte sur les boues extérieures qui sont à l'origine peu concentrées (environ 20 g/L). Cela voudrait dire que l'ajout des boues extérieures aux boues d'HA abaissera la concentration du mélange mais cela restera léger.
- Nous sommes dans une période d'attente de la révision de l'arrêté du 8 janvier 1998. Cela signifie que si les seuils deviennent plus restrictifs et que les boues liquides sont non conformes à ces nouveaux seuils, elles seront considérées comme polluées et ne pourront pas être mélangées. Il y a un risque de maintenir cette filière à long-terme et que finalement les boues ne soient pas conformes à la réglementation.

- Coût du mélange

Trois filières d'évacuation des boues déshydratées sont prévues :

- 1) **Scénario 1** : Transport des boues centrifugées sur la STEP de VA pour séchage, stockage et évacuation en filière recyclage agricole directe autorisée.

En cas d'arrêt technique du sécheur,

- 2) **Scénario 2** : Transport des boues centrifugées sur la STEP d'HA et orientées soit en agriculture directement (boues chaulées) soit en compostage Norme NFU 44095 (en dehors des périodes d'épandage)

En cas de non-conformité des boues, il est prévu :

3) **Scénario 3** : Transport des boues centrifugées via une UMDB pour un stockage en ISDND.

Nous avons donc basé notre analyse financière sur ces différentes filières d'évacuation selon que les boues soient conformes ou non.

Quelques soit le scénario adopté, le coût du mélange correspond à un ensemble des prix variables et fixes.

Les prix variables sont les suivants :

- Le prix du transfert de boues liquides sur la STEP d'HA
- Le prix du traitement par déshydratation ou traitement par déshydratation puis séchage
- Le prix du transport après traitement
- Le prix de la valorisation ou d'élimination
- Le prix des analyses

Les prix ont été calculés sous la base de 2 100 m³ de boues liquides (volume de boues produites à l'année) à 2% de siccité initiale, une siccité finale de 29.4 % (pour les boues centrifugées chaulées à 10%) et de 90 % (pour les boues séchées chaulées à 10 %). Cela correspond à un tonnage respectif de 42 TMS, 26.19 TMB (boues centrifugées) et 26.19 TMB (boues séchées). Lorsque les boues vont en épandage direct, le taux de chaux équivaut à 20% et donc les tonnes de boues produites sont égales à 28.57 TMB.

Ces différents tonnages ont été calculés à l'aide des formules suivantes :

$$\frac{\text{Volume traité (m3)} * \text{Siccité initiale } \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1000} = \text{Quantité boues en TMS}$$

$$\text{Tonnage brute (TMB)} * \text{Siccité finale (\%)} = \text{Quantité boues en TMS}$$

- **Le transfert des boues liquides** comprend le chargement et le déchargement des boues liquides. Il coûte 360.00 € par fréquence dans le mois dans un rayon de 20 km. Et pour un transfert de 350 m³ (production de 2 mois de 42 TMS à 20g/l) il faut prévoir une fréquence égale à 13 car cela se fait par camion-citerne volume de 27 m³. Le transfert comprend aussi un prix supplémentaire si le chargement/déchargement est dépassé d'1h30. Ce prix supplémentaire vaut 90.00 € par heure. Dans chaque scénario nous avons supposé une fois 1h30 de chargement supplémentaire.
- **Le transfert de mono-caisson** vaut 150.00 € l'intervention.
- **Le traitement** correspondant à la déshydratation par centrifugeuse vaut 40.75 €/TMS tandis que le séchage coûte 96.73 €/TMB.
- **Le transport** correspond au transport des boues après traitement. Il varie selon les destinations (voir tableau 24).

	Trajet	Prix
Epannage agricole (boues séchées)	STEP HA vers STEP VA	275.00 €/transport
	Stockage VA vers champs agricoles	16.40 €/TMB
Epannage agricole (boues centrifugées)	STEP HA vers champs agricoles	14.40 €/TMB
Compostage	STEP HA vers le site de compostage	15.90 €/TMB
ISDND	STEP RW (ou BG) vers le centre ISDND	20.00 €/Transport

Tableau 23 : Prix de transport de boues selon les destinations (Source : MEL)

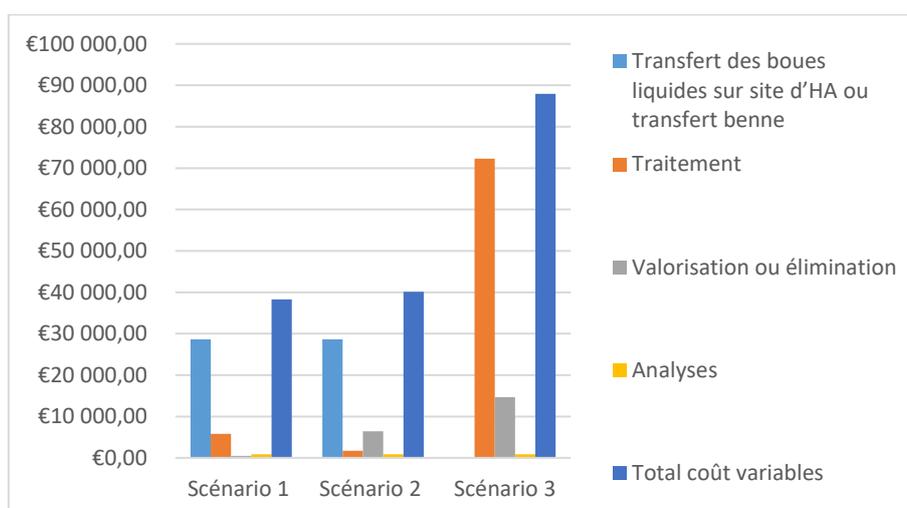
- **La valorisation** correspond soit à de l'épandage au prix de 10.00 €/TMB pour les boues séchées et 6.50 €/TMB pour les boues centrifugées ou soit au compostage au prix de 58.00 €/TMB. Quant à **l'élimination**, elle correspond à de l'enfouissement des boues au ISDND prix de 63.00 €/TMB de boues déshydratées.
- **Les analyses de boues** correspondent à une analyse complète à savoir : ETM, CTO et matières fertilisantes. Elles doivent être réalisées au minimum 2 fois selon l'arrêté du 8 janvier 1998 et avant chaque mélange. Les boues seront transférées tous les deux mois ce qui signifie 6 analyses. Cependant la MEL souhaite faire une analyse chaque mois d'ETM et CTO soit 12 analyses et 2 analyses de matières fertilisantes. Les coûts sont les suivants : une analyse de valorisation agronomique à 34.50 €, une analyse d'oligo-éléments à 31.00 €, une analyse de mercure à 28.20 € et une série ETM et CTO (sans mercure) par VSE à 4.10 €.

Le tableau suivant correspond au résumé des coûts selon chaque scénario.

	Scénario 1	Scénario 2 (compostage) (épandage boues chaulées)	Scénario 3
Annexe 13	Tableau 5	Tableau 6	Tableau 8
Transfert des boues liquides sur site d'HA	28 620.00 €	28 620.00 €	0€
Traitement	5 774.03 €	1 711.50 €	72 300.00 €
Transport des boues déshydratées OU déshydratées et séchées	2 496.24 €	2 488.50 €	120.00 €
Valorisation ou ISDN	516.00 €	6 447.49 €	14 679.00 €
Analyses ETM et CTO	828.60 €	828.60 €	828.60 €
Total des couts variables	38 234.87 €	40 096.09 €	87 927.60 €

Tableau 24 : Prix variables selon les trois scénarios (Source : MEL)

Graphique 3 : Coûts variables du mélange de boues selon chaque scénarios (Source : MEL)



Les scénarios 1 et 2 ont sensiblement le même coût à quelques exceptions près. Premièrement, nous observons que le coût du compostage (scénario 2 compostage) est plus important que le coût de l'épandage agricole (scénario 1). En effet, l'épandage agricole est la voie la moins onéreuse. Ensuite le

coût du traitement pour le scénario 1 est plus élevé que le scénario 2. Cela se justifie parce que les boues du scénario 1 ont deux étapes de traitement (déshydratation et séchage) tandis que le scénario 2 n'a qu'une seule étape de traitement (la déshydratation). Cela nous amène à comprendre en quoi l'épandage agricole du scénario 1 est moins cher que le scénario 2 épandage. En effet les boues ayant subi une déshydratation et un séchage à 90 % auront moins d'eau dans leur partie liquide. Et donc le tonnage de boues sera moins important que des boues déshydratées à 30 % environ dans le scénario 2 épandage.

Le scénario 3 est le scénario le plus contraignant dans le mélange de boue et le plus cher. En effet, il a été supposé une pollution des boues liquides de RW à chaque campagne. Cela signifie qu'une UMDB doit être mise en place pour peu de boues et la prestation est onéreuse. Mais il est à noter que si cette situation survient, elle ne sera qu'occasionnel et que le cas d'étude est le cas extrême.

Enfin, nous pouvons dire que le coût d'un traitement en général serait de 2 877.86 € HT car c'est le scénario 1 qui sera en majorité réalisé. Cependant il est à noter une variation importante de ce coût en cas de pollution ou d'indisponibilité de machine. Pour que les calculs réalisés précédemment soient représentatifs à court-terme (1 an) et long-terme (20 ans) ils doivent être multiplié au nombre de fois que le traitement sera réalisé.

Il faut donc ajouter **les prix fixes du traitement** (tableau 25) à savoir : le forfait mensuel payé par la MEL pour tout ce qui concerne les demandes d'étude sur site, le prix annuel d'épandage qui est un forfait annuel payé par la MEL pour la prestation d'épandage.

		Nbr	Unité	Prix unitaire HT	Prix € HT
Forfait mensuel	Forfait mensuel	1	F/Mois	176.00 €	176.00 €
Forfait annuel épandage	Forfait annuel épandage	1	Forfait	1 900.00 €	1 900.00 €

Tableau 25 : Prix fixes selon les trois scénarios (Source : MEL)

Nous supposons un indice de révision de 1.058 et une TVA à 10 %. Ainsi nous avons :

Scénario 1 : Le coût de l'opération correspond aux coûts variables et coûts fixes.

Scénario 2 : En supposant un épandage agricole en fin d'été (septembre octobre). Le coût de l'opération correspond coûts variables (avec 4 valorisation en compostage et 2 épandage agricole direct) et coûts fixes.

Scénario 3 : Boues liquides de RW non conformes. Le coût de l'opération correspond aux coûts variables et coûts fixes.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Coût € HT/an	44 697.19 €	46 666.36 €	97 272.10 €
Coût € TTC	49 166.91 €	51 333.00 €	106 999.31 €
CGA sur 20 ans € TTC	668 194.38 €	697 632.16 €	1 454 155.49 €

Tableau 26 : Coût du mélange à court et long-terme selon trois scénarios de traitement et valorisation de boues (Source : Personnelle)

En fonctionnement normal (cf. scénario 1), le coût versé à SEDE sera donc de 50 K € TTC/an soit 668 K sur 20 ans.

- Conséquences environnementale du mélange de boues

Etapes de traitement et valorisation (Emissions en kg eq CO2)						
	Stockage	Stockage -mélange	Déshydratation	Séchage	Epandage	Total
Emissions directes	0	445446			468728.0 0	914174
Réactifs			26065			26065
Electricité	19	2346	18767	313084		334216
Combustible				1039889	1127817	2167706
Transport	59		121090		303779	424928
Infrastructures	33	33	364	131289	6.20E-03	131719
Emissions évitées					-1240.00	-1240
Total	111	447825	166286	1484262	1900324	3998808

Tableau 27 : Emissions de GES du mélange de boues (Source : INRAE)

Il est à noter que le scénario simulé est un scénario mettant en avant un mélange de boues effectué chaque jour et au total des émissions de GES par an. Or réellement le mélange de boues est un traitement discontinu (effectué que quelques jours par mois tous les deux mois). Néanmoins par manque de données publiques concernant les émissions de GES sur le traitement et valorisation de boues nous avons maintenu les valeurs de l'INRAE puis converti la valeur trouvée en valeur réelle des émissions selon le nombre de jours de traitement.

Les détails de calculs sont placés en annexe 13.

Le mélange de boues produit 3999 Tonnes eqCO₂ (tous gaz confondus) sur un an d'exploitation.

Les gaz sont répartis de la façon suivante :

- CO₂ = 3085 TeqCO₂,
- N₂O = 469 TeqCO₂,
- CH₄ = 445 TeqCO₂,
- Emissions évitées = -1,12 TeqCO₂ issus de la séquestration du carbone

Les émissions liées au stockage sont de l'ordre de 0.1 TeqCO₂. 57 % de ces émissions sont liées aux transports des boues liquides de la STEP de RW (ou BG) vers la STEP d'HA. 18 % sont issues des consommations électriques et 24 % de l'infrastructure.

Les émissions liées au stockeur-mélangeur sont de l'ordre de 448 TeqCO₂ dont la majorité des émissions proviennent des fuites directes du CH₄ (96 %).

Lors de la déshydratation des boues, 16 % des émissions sont générées par la fabrication des consommables (polymères) pour le conditionnement des boues et 73 % proviennent du transport de ces consommables et du transfert des boues déshydratées vers la STEP de VA. Le restant des émissions sont dues à l'infrastructure de déshydratation.

Les émissions liées au séchage du mélange des boues génèrent 70 % de GES issues des consommations thermiques du sécheur, 22 % proviennent des consommations électriques et 8% des infrastructures.

Lors de l'épandage agricole, la quasi-totalité des émissions proviennent du combustible utilisé pendant l'épandage (59%) puis des émissions directes de N₂O (24%) et du transport (15%) (Le transport de la STEP au stockage de boues, transport durant l'épandage). Les émissions évitées lors de l'épandage s'élèvent à -1,12 TeqCO₂ et proviennent uniquement de la séquestration du carbone dans le sol.

Le mélange a lieu tous les deux mois pendant 1 semaine (5 jours ouvrés) ce qui correspond à 6 semaines par an soit à peu près 30 jours. Nous pouvons donc dire que les réelles émissions de GES du mélange de boues correspondent à environ 329 Teq CO₂.

4.4. Choix de la filière alternative adaptée aux STEP ciblées

Suite de ces différentes solutions proposées, le tableau suivant est un récapitulatif des points importants rencontrés dans la présentation des filières et sur lequel se basera le choix de filière.

	UMDB	(P1) Filtres à bande combiné à une table d'égouttage	(P2) Lits de séchage plantés de roseaux	(P3) Mélange (déshydratation et séchage sur VA)
Coût HT/an	34 363 €	24 248.85 €	2 993.82 €	44 697.19 €
Coût TTC	39 992 €	26 673.74 €	3 293.20 €	49 166.91 €
CGA sur 20 ans TTC	543 498 €	572 761.60 €	238 435.06 €	668 194.38 €
Technique (points critiques)	Maîtrise polymère; gestion centrat	Siccité min 15%; maintenance	Stockage des micropolluants (contexte covid-19; évolution arrêté 1998)	Dépendance ratio séchage VA; STEP champ captant
Environnement Teq CO₂	0.65	26	40	329

Tableau 28 : Récapitulatif des critères financiers, techniques et environnementaux des solutions proposées

Nous allons procéder à un choix de filière. Les STEP étant semblables nous procéderons à un même choix de filière pour les deux STEP. Pour ce faire nous avons utilisé la méthode Electre I proposé par Roy en 1968 qui est une méthode d'aide à la décision qui permet de résoudre les problèmes multicritère de choix. Sur la base de sous-ensemble d'actions elle permet d'identifier le projet qui offre le meilleur compromis possible. Cette méthode utilise le concours de notes et critères pour classer les projets.

Les projets concurrents sur lesquels vont être porté un choix sont les suivants :

- P1 : Combinaison table d'égouttage et filtre à bandes
- P2 : Lits de séchage plantés de roseaux
- P3 : Mélange de boues

Chaque projet est évalué sur la base de 4 critères financiers, techniques et environnementaux.

Famille	Critères
Finance	C _{r1} Coût d'investissement
	C _{r2} Coût études et frais recherches
	C _{r3} Coût de fonctionnement
	C _{r4} Coût global actualisé sur 20 ans
Technique	C _{r1} Qualité dépôt de boues
	C _{r2} Qualité retour en tête percolât/centrat
	C _{r3} Consommation électrique
	C _{r4} Consommation en réactif
Environnement	C _{r1} Nuisances sonores

	C_{r2}	Pollution air
	C_{r3}	Intégration paysagère
	C_{r4}	Utilisation énergies renouvelables

Tableau 29 : Présentation des critères choisis

Nous illustrons le sur-classement avec la famille « Finance ». Mais le choix final de filière prendra en compte le résultat des trois familles (cf. annexe 17).

L'importance de chaque critère dans la prise de décision est traduite par un poids k_j tel que :

Critères	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
Poids (k_j)	3	2	2	3

Tableau 30 : Poids des critères financiers

Chaque projet est évalué en fonction des critères retenus à l'aide d'une échelle qualitative et des scores. Plus le score est élevé, plus les impacts financiers du projet sont moindres. Le tableau de performance est donné dans le tableau suivant :

Projets	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
P_1	0	10	12	6
P_2	5	10	15	12
P_3	20	5	6	5

Tableau 31 : Performance financière

A l'aide d'indices de concordance et discordances nous allons faire un choix.

L'indice de concordance pour deux actions a et b est noté par $C(a,b)$, compris entre 1 et 0, il mesure la pertinence de l'assertion « a surclasse b », comme suit :

$$C(a,b) = \frac{\sum_{\forall j: g_j(a) \geq g_j(b)} k_j}{K} \text{ avec } K = \sum_{j=1}^n k_j$$

La matrice des indices de concordance financiers est donnée par :

	P_1	P_2	P_3
P_1	-	0.2	0.7
P_2	1	-	0.7
P_3	0.3	0.3	-

Tableau 32 : Matrice de concordance financière

Si non l'indice de discordance est : $D(a,b) = 0$ si $\forall j, g_j(a) \geq g_j(b)$

$$\text{sinon } D(a,b) = \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)]$$

avec δ est la différence maximale entre le même critère pour deux actions donnée.

La matrice de discordance économique est obtenue comme suit avec une valeur de :

$$\delta = 20-0=20$$

Projets	P_1	P_2	P_3
P_1	-	0.3	1
P_2	0	-	0.75
P_3	0.3	0.45	-

Tableau 33 : Matrice de discordance financière

La relation de sur-classement pour Electre I est construite par la comparaison des indices de concordance et discordance à des seuils limites de concordance \hat{c} et discordance \hat{d} .

Ainsi a surclasse b si :

$$a \hat{S} b \Leftrightarrow C(a,b) \geq \hat{c} \text{ et } D(a,b) \leq \hat{d}.$$

En considérant $\hat{c} = 1$ et $\hat{d} = 0$, on a

- Finance : P2 surclasse P1
- Technique : P2 surclasse P1 ; P3 surclasse P1
- Environnement : P1 surclasse P3 ; P2 surclasse P3

Le projet 2 (LSPR) est financièrement plus viable que le projet 1 (déshydratation mécanique) car le coût d'exploitation et le CGA des LSPR sont moins onéreux que ceux de la déshydratation mécanique.

Le projet 2 est aussi techniquement plus viable que le projet 1. Il offre une meilleure siccité des boues (18% contre 15%) et une réduction moyenne des agents pathogènes.

Enfin d'un point de vue environnemental le projet 1 et 2 surclassent le projet 3 sur les critères environnementaux choisis.

Cependant l'ordre de priorité de la MEL est la suivante : Finance > Technique > Environnement. Le meilleur choix se porte sur le projet 2.

	Table d'égouttage/filtre à bandes (P1)	LSPR (P2)	Mélange de boues (P3)
Technique Avantages/Inconvénients	Epaissement et déshydratation (réduction volume de boues) Siccité finale 15 % Boues valorisable en compostage Limitation dans la pression du filtre Surveillance nécessaire	Déshydratation (réduction volume boues) Stabilisation (réduction nuisance olfactive boues) Hygiénisation (réduction agents pathogènes) Siccité finale des boues de l'ordre de 25 % Valorisation en compostage	Epaissement et déshydratation (réduction volume boues) Séchage (stabilisation et réduction volume boues) Siccité finale des boues 90 % Valorisable en agriculture (boues chaulées)
Coût par TTC/an	26 674 €	3 293.20 €	49 167 €
Investissement	210 257€	166 420 €	0 €
Coût Global Actualisé sur 20 ans	572 762 €	238 435 €	668 194 €
Emissions de gaz à effet de serre/ émissions majeures	26 Teq CO2 Compostage (CH4, N20)	40 Teq CO2 Minéralisation (CH4, N20)	329 Teq CO2 Séchage (combustible) et épandage (CH4, N20)

Tableau 34 : Récapitulatif des projets selon les critères techniques, financiers et environnementaux

Conclusion

Les filières alternatives étudiées sont le filtre à bande avec table d'égouttage, le lit de séchage planté de roseaux et le mélange des boues liquides à celle d'une station voisine de 172 000 EH.

Ces solutions alternatives proposées ont été évaluées par la méthode Electre I sous des critères techniques, financiers et environnementaux. Il en ressort que le projet de construction des LSPR est viable autant techniquement que financièrement pour les deux STEP. Le coût des lits est moins cher que l'UMDB et la maîtrise de la technique des lits par le service TEU ainsi que leur logistique rendent cette filière LSPR plus stable que l'UMDB. Or la qualité des boues doit être irréprochable pour être acceptée en filière de compostage. Nous choisissons d'assurer la pérennité de la filière en dimensionnant des LSPR pour les deux STEP à l'étude.

5. Dimensionnement de la filière choisie : Lits de Séchage Plantés de Roseaux

La méthode Electre I a permis de fixer le choix de filière de traitement des boues de RW et BG. Les stations d'épuration de RW et BG devront donc être complétées par des lits de séchage plantés de roseaux.

Une filière LSPR se compose d'une extraction des boues, d'une déshydratation et d'un stockage sur lits de roseaux ainsi que d'un curage et d'une évacuation par camion avant valorisation agricole. Tous ces éléments ont été dimensionnés dans cette partie à l'aide du guide de l'IRRAE qui est l'un des premiers rapports à contribuer à améliorer les performances des LSPR.

Pour dimensionner tous ces différents éléments, il nous faut tout d'abord déterminer deux valeurs à savoir la production de boues et la charge surfacique.

5.1. Production de boues

La production de boues correspond à la quantité de matières sèches produite annuellement par le nombre d'EH de la STEP.

Nous avons estimé la production de boues à partir de la formule du binôme (Duchène 1999) et les données de charges de dimensionnement des STEP.

$$MS(kg/j) = k * \frac{(DBO5 + MES)}{2}$$

k : paramètre d'ajustement tenant compte de la qualité de l'ERU et du type de traitement biologique.

DBO5 : 60 g/hab

MES : 100 g/hab

Le réseau de RW et BR étant majoritairement séparatif, nous considérons le facteur k égale à 0,84 (constante utilisée pour les réseaux séparatifs ; Duchène 1999).

	RW	BR
Production journalière MES (kg/j)	171	126
Production journalière DBO5 (kg/j)	102	84
Production boues (kg/j)	41 851	32 193

Tableau 35 : Production annuelle de boues de Radinghem-en- weppes et Bois Grenier (Source : MEL)

En supposant 365 jours dans l'année, la population RW sera donc amenée à produire 42 TMS et BG 32 TMS.

5.2. Charge surfacique

La charge surfacique est la quantité de pollution à traiter (en fonctionnement nominal) sur une surface donnée pendant une année. Selon l'INRAE, cette charge serait fixée à 50 kgMS/m²/an (charge liée aux expériences de Nielsen au Danemark, 2003). Et elle ne sera appliquée qu'après la pousse de roseaux (estimée satisfaisante à partir de 250 plants/m²) car indispensable à leur survie.

Le type de construction préconisé pour RW et BR serait la construction remblai/déblai car il y a de l'espace disponible (cf. annexe 15) et c'est la solution la moins couteuse.

La surface nécessaire pour le traitement des boues suit la formule suivante :

$$Surface (m^2) = \frac{Production\ boues}{Charge\ surfacique}$$

	RW	BR
Charge surfacique (kg/m²/an)	50	50
Production boues (kg/an)	41851	32193
Surface nécessaire (m²)	837	644
Surface disponible au total (m²)	1629.37	745.84

Tableau 36 : Surface des lits de Radinghem en weppes et Bois Grenier (Source : SIG)

Par ailleurs, il sera nécessaire d'acheter du terrain en plus pour effectuer les LSPR de BG afin de pouvoir être confortable sur la largeur des voiries.

5.3. Nombre d'unité

Les boues sont traitées dans plusieurs unités pour favoriser l'efficacité de la déshydratation et la minéralisation. Le nombre d'unité détermine le ratio : nombre de jour d'alimentation par rapport au nombre de jour de repos de chaque lit.

L'INRAE préconise 6 lits à 50 kg/m²/an. Or selon les retours d'expérience de la STEP d'Ennetieres-en-weppes composé de 4 lits à 53.5 kg/m²/an, il est aussi satisfaisant de créer 4 lits à 50 kg/m²/an.

Si le choix de 4 ou 6 lits est possible, il vaut mieux favoriser un nombre de 6 lits. En effet, l'augmentation du nombre de lit favorise la minéralisation et réduit le volume de boues apportées. Cela lisse la surcharge apportée aux lits non curé durant la phase de vidange. Cela réduit les coûts d'exploitation puisqu'il est possible d'augmenter le temps de fonctionnement des lits avant leur curage (par exemple tous les 10 ans au lieu de tous les 5 ans).

	RW	BG
Surface nécessaire (m²)	837	644
Nombre de lit	6	6
Surface unitaire (m²)	139.5	107.31
Longueur unitaire (m)	17.71	14.63
Largeur unitaire (m)	7.88	7.34

Tableau 37 : Nombre de lits de Radinghem en weppes et Bois Grenier (Source : Géoportail)

Il est à noter que la méthode INRAE considère que la surface retenue est celle qui correspond à la moitié de la hauteur maximale des boues.

La largeur et la longueur des lits sont définies selon plusieurs points détaillés en note de calcul à l'annexe 18. BR ne bénéficiant pas de la totalité du terrain pour les lits, leur disposition pourra se faire selon les points suivants :

- Solution 1 : 4 lits sur le terrain disponible et 2 lits sur la parcelle privée.
- Solution 2 : 2 lits sur le terrain disponible et 4 lits sur la parcelle communale.

L'avantage de la parcelle privée est qu'elle se situe dans la continuité de la parcelle disponible. Cependant, elle est plus difficile à négocier que la parcelle communale. Quant à cette dernière, elle ne se situe pas dans la continuité de la parcelle disponible ce qui conduit à séparer les lits et conduit à utiliser plus de terrain pour une bonne disposition. (cf. annexe 18)

5.4. Extraction des boues

L'extraction des boues permettant l'alimentation des lits de roseaux s'effectue par 1 pompe centrifuge et 1 pompe de secours immergée dans le bassin d'aération. L'extraction depuis le bassin d'aération permet de mieux contrôler la qualité de la boue. Elle se fait à la fin d'une phase d'aération afin que les boues soient bien oxygénées et éviter un risque de fermentation anaérobie source d'odeurs.

Paramètres	Unités	Valeurs RW	Valeurs BG
Quantité de boues à traiter	Tonnes MS/an	42	32
Concentration des boues à extraire	g/L	4	4
Volume de boues à extraire	m ³ /an	10500	8000
Nombre de pompes installées	u	2	2
Nombre de pompes en fonctionnement	u	1	1
Débit d'alimentation des lits plantés	m ³ /m ² /h	0.25	0.25
Débit unitaire d'extraction	m ³ /h	34.87	26.83
Débit unitaire retenu	m ³ /h	35	30

Tableau 38 : Dimensionnement extraction depuis le bassin d'aération (Source : Personnelle)

5.5. Composition des lits

Chacun lits est composé de bas en haut :

- d'une pente de 0.5 % assurant la récupération de tous les percolâts pour permettre leur recirculation en tête de traitement biologique,
- d'un ensemble géomembrane / géotextile tapissant le fond et les côtés des lits, assurant l'imperméabilité et prévenant tout transfert de polluant vers la nappe,
- de drains permettant de recueillir les percolâts pour permettre leur recirculation en tête de traitement biologique, via le poste toutes eaux,
- de supports minéraux assurant la filtration des percolâts et servant de support aux macrophytes à savoir :
 - Couche drainante : 20/40 sur une épaisseur de 15 cm sable,
 - Couche de transition (géospaceur) sur une épaisseur de 10 cm
 - Couche de gravillons (gravelle 3/6) sur une épaisseur de 20 cm,
 - Couche superficielle de filtration composée de compost ou sable grossier ($0.2 \leq d_{10} \leq 0.4$ mm) d'une épaisseur respectivement de 10 cm ou 5 cm.
- d'évents reliant la couche drainante à la partie aérée et permettant une bonne aération sur toute l'épaisseur des lits,

- d'un ensemble de plants de roseaux, de type Phragmites Australis ou Comunis (affecté aux climats continentaux) avec une densité de 4 plants/m² soit respectivement pour **RW et BG 3348 et 2575 plants**,
- d'un ensemble de murs en béton séparant les lits entre eux
- d'un système d'alimentation avec une canalisation supportée par les murs latéraux et des déflecteurs permettant une bonne répartition des boues. Ces dispositifs sont accessibles et démontables lors de la vidange des lits et des opérations de maintenance exceptionnelle,
- d'un ensemble de vannes (1 par lit) laissant la possibilité d'isoler les lits de façon individuelle.

5.6. Alimentation et drainage des lits

Seul un sixième de lit est alimenté chaque semaine avec un nombre de bâchée limité à 2 par jour aux heures les plus chaudes. En effet, des concentrations assez faibles de 2 à 3g/L sont généralement observés dans le bassin d'aération donc cette disposition de charge hydraulique supérieure à 30 cm (en phase nominal) permettra d'obtenir une liqueur suffisante et le bon développement des roseaux.

Selon les analyses de l'INRAE sur 79 micropolluants, ce type d'alimentation n'aura sensiblement pas d'effet sur l'élimination des micropolluants sauf pour les hormones (réduction estrone), HAP (éliminé en milieu de lit), alkyl phénols (éliminé), PCB (éliminé en milieu et fond de lit) et DEHP (éliminé). Aussi les lits accumuleront des PBDE. [17]

Nous prévoyons des déflecteurs par lit (soit 1 point d'alimentation tous les 50 m² lorsque l'alimentation se fait par un des bords) afin de répartir les boues de manière homogène. Ainsi il y aura **18 déflecteurs pour RW et 12 pour BG**.

Un réseau de drainage du même type (PVC de 100 mm) et composé de fentes assure la récupération des percolas pour les fentes tournées vers le bas et la diffusion de l'air dans le massif pour les fentes tournées vers le haut. La densité de drains (**RW : 35 et BG : 27**) rapportée à la surface est conforme aux préconisations de l'INRAE qui conseille une densité supérieure à 0.25 m linéaire de drain/m².

Conclusion

Des lits de séchage plantés de roseaux devraient donc venir compléter les stations de Radinghem-en-Weppes et de Bois Grenier et équiper ces stations d'une filière pérenne de gestion des boues.

Ces lits ont été dimensionnés sur les charges nominales « construction » des stations d'épuration. Ils comporteront chacun 6 lits à 50 kg/m²/an. Les parcelles disponibles de la STEP RW permettent la construction de lits sans acquisition de terrain tandis que pour permettre un curage en sécurité des boues à BG, il est impératif d'acquérir de nouvelles parcelles à proximité du site.

CONCLUSION

Afin de mettre en place des filières de traitement de boues liquides en cohérence avec son schéma Directeur, la Métropole Européenne de Lille a mis en place dans l'urgence des unités mobiles de déshydratation de boues pour ces stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier intégrées en 2017 à son territoire.

La filière actuelle de traitement des boues de ces stations d'épuration (de capacité modestes 1700 EH Radinghem-en-Weppes et 1400 EH Bois Grenier) est couteuse. En parallèle, de nouvelles lois sur le retour au sol des boues (loi Economie Circulaire, révision de la Directive Déchet) mettent à risques le compostage pour lequel il s'avère être la destination finale des boues des STEP ciblées.

Dans ce contexte d'évolutions législatives et contraintes financières, le service Traitement des Eaux Usées a souhaité qu'une réflexion poussée soit mise en place pour trouver une filière de traitement de boues liquides pérenne adaptée aux STEP et en cohérence à la fois avec leur schéma directeur et la réglementation en vigueur.

L'étude présentée a permis de définir une filière de traitement des boues liquides pour ces deux stations d'épuration pérenne, peu coûteuse, peu dépendante en personnel et durable.

Une synthèse bibliographique a permis, au premier abord, de mettre en évidence les stratégies de la MEL et les contraintes de la réglementation. La MEL effectue du compostage pour ses petites STEP. Cependant, une révision des seuils réglementaires avec une intégration des micropolluants émergents est prévu d'ici 2021 et le mélange des biodéchets avec d'autres déchets sera interdit d'ici 2027.

L'état des lieux de la filière existante a montré des aspects fragiles qui ne seraient pas à l'avantage de la MEL si elle poursuivait avec cette filière sans optimiser : son coût, la maîtrise de la concentration en polymère pour conditionner les boues et le lieu de traitement des concentrats.

Cependant, une solution pérenne devait être déterminée et dimensionnée. L'analyse du fonctionnement global des sites a permis d'envisager un dimensionnement sur la charge nominale de construction des STEP ainsi qu'une construction sur site.

Puis, une fois les caractéristiques techniques, financières et environnementales de chaque filière alternative précisées, l'application de la méthode Electre I a permis de déterminer la filière répondant au mieux aux exigences initiales.

Enfin, le choix s'est porté sur un traitement des boues sur lits de séchage plantés de roseaux. Ces lits ont été dimensionnés sur les charges nominales « construction » des stations d'épuration et comporteront, pour chaque station, 6 lits à 50 kg/m²/an. La mise en œuvre de cette solution sur la station de Radinghem-en-Weppes se fera sur l'emprise actuelle de la station. Pour Bois Grenier il sera nécessaire d'acquérir une petite parcelle annexe à la station.

Ainsi, le choix proposé est une solution pérenne pour une vingtaine d'années cependant la validation définitive de filière sera tranchée par une orientation politique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement. **Dossier sur le compostage des boues d'épuration urbaines**. Version 2019.
- [2] BAZINETTE Marion. **Etude du traitement des boues par minéralisation sur lits plantés de roseaux**. Méthodes comparées et vidange des lits. Mémoire de fin d'études, ENGEES, 2012. 92 pages.
- [3] CHEVALIER Thomas. **Le séchage solaire des boues. Retour d'expériences et optimisation. Cas de la serre de Belleville sur vie (85)**. Mémoire de Mastère Spécialisé Eau Potable et Assainissement, ENGEES, 2010. 89 pages.
- [4] FRANCE. Article L.541-1-1 du Code de l'environnement. Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 2 [Consulté le 20 Février 2020].
« <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/ordonnance/2010/12/17/DEVX1028667R/jo/texte> »
- [5] FRANCE. Art R. 211-29 du Code de l'environnement du 23 Mars 2007. [Consulté le 24 Février 2020]. « <https://www.legifrance.gouv.fr/> »
- [6] France. MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE. **Portail d'information sur l'assainissement communal**. [En ligne] mise à jour le 18/12/2019 [Consulté le 20 Juin 2020]
« <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/> »...
- [7] France. MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORET. **Les épandages sur terres agricoles des matières fertilisantes d'origine résiduaire**. Mission prospective sur les modalités d'encadrement et de suivi réglementaire. Juillet 2015.
- [8] GUIBELIN Eric. Elimination finale des boues d'épuration. Techniques de l'ingénieur, 10 Avril 2014. Article Environnement - Sécurité | Environnement. 11 p. Référence : G1451 V2
- [9] JARDE Emilie. **Composition organique des boues résiduaires de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effet de la biodégradation**. Thèse de doctorat Science de l'univers, Université Henri Point Carré 2002. 252 pages.
- [10] MEL. SEDE. **Bilan 2019 et perspectives 2020 boues. Gestion des stations d'épuration**. 31 Mars 2020.
- [11] MEL. **Gestion des boues issues des stations d'épuration de la MEL et des sites de production d'eau de Sourcéo - Accords-cadres à bons de commande sur la période 2017 - 2021 -Appel d'Offres Ouvert- Décision – Financement**. Délibération du conseil 24 Octobre 2017
- [12] MEL. **Gestion des boues issues des stations d'épuration de la MEL. Schéma Directeur adopté en 2011**. Délibération du conseil 1er Avril 2011.
- [13] MEL. Rapport annuel 2018 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau et de l'assainissement. MEL les éditions, 2018. Chapitre 1, **Proposer une organisation qui favorise la performance**. p 7. Collection Rapport d'activité.
- [14] MOLETTA Rene. Le traitement des boues des stations d'épuration. 2003.
- [15] MULLER Fabienne. ADEME Angers Service Mobilisation et Valorisation des Déchets - Direction Economie Circulaire et Déchet. **Epandage**. Mars 2013 mise à jour Août 2016. 14 pages.
- [16] ONEMA. IRSTEA. ARMISTIQ ACTION D Février 2014.

- [17] OTV. **Traiter et valoriser les boues**. OTV, octobre 1997. 460 pages. Collection OTV n°2. ISBN : 2-9511059-0-8.
- [18] RESEAUX, SERVICES ET MOBILITE-TRANSPORTS Direction Eau Assainissement. Bilan Annuel 2018 Agglomération d'Assainissement BOIS-GRENIER. 1 rue du Ballon CS 50749 59034 Lille Cedex, MEL, 2018. Partie E, **Bilan Annuel sur le fonctionnement d'assainissement**. p. 18.
- [19] RESEAUX, SERVICES ET MOBILITE-TRANSPORTS. Direction Eau Assainissement. Bilan Annuel 2018 Agglomération d'Assainissement RADINGHEM-EN-WEPPEES. 1 rue du Ballon CS 50749 59034 Lille Cedex, MEL, 2018. Partie E, **Bilan Annuel sur le fonctionnement d'assainissement**. p. 18.
- [20] RESEAUX, SERVICES ET MOBILITE-TRANSPORTS Direction Eau Assainissement. Bilan Annuel 2018 Agglomération d'Assainissement BOIS-GRENIER. 1 rue du Ballon CS 50749 59034 Lille Cedex, MEL, 2018. Partie A Présentation du système d'assainissement, A2 **Synthèse des communes et des habitants raccordés**. p. 4.
- [21] RESEAUX, SERVICES ET MOBILITE-TRANSPORTS. Direction Eau Assainissement. Bilan Annuel 2018 Agglomération d'Assainissement RADINGHEM-EN-WEPPEES. 1 rue du Ballon CS 50749 59034 Lille Cedex, MEL, 2018. Partie A, Présentation du système d'assainissement, A2 **Synthèse des communes et des habitants raccordés**. p. 4.
- [22] ROSEN Anne. Aide à la décision en Ingénierie Financière. **Analyse Coûts-Bénéfices**. Rappel Compléments.
- [23] SALVI Sébastien. **Etude technico-économique d'optimisation de la filière de déshydratation des boues. Station d'épuration de l'agglomération mulhousienne**. Mémoire de Mastère Spécialisé Eau et Assainissement, ENGEES, 2009. 81 pages.
- [24] SENAT. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Partie D, Les métaux lourds et les boues d'épuration. **A, Les boues d'épuration**. [Consulté le 3 Juin 2020] « <https://www.senat.fr/rap/l00-261/l00-261112.html> »
- [25] SIAEPA du Bourgeois. Assainissement. La gestion des sous-produits de l'assainissement.
- [26] SUEZ. Memento Degremont. Traitement des boues liquides. **Epaississement**. [Consulté le 25 Février 2020.] « <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/traitement-des-boues-liquides/epaississement> »
- [27] VINCENT Julie. **Les lits de séchage plantés de roseaux pour le traitement des boues activées et les matières de vidange : adapter la stratégie de gestion pour optimiser les performances**. Thèse de doctorat Sciences des procédés – Sciences des aliments. Université de Montpellier II 2011. 253 pages
- [28] Ives Magloire Kengne et Elizabeth Tilley. Lits de Séchage Plantés. Chapitre VIII. « https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Livre_Iow_res/GBV_-_CHAP_8.pdf »
- [29] WACRENIER A. Plan Local d'Urbanisme de la commune de Bois Grenier. Rapport de présentation, révisé. 12 Octobre 2005.
- [30] WACRENIER A. Plan Local d'Urbanisme de la commune de Radinghem-en-Weppes. Rapport de présentation, révisé. 12 Octobre 2005.

ANNEXES

ANNEXE 1 – Localisation et composition du territoire de la Métropole Européenne de Lille



Localisation du territoire de la Métropole Européenne de Lille en France Hexagonale



Les 95 communes appartenant au territoire de la Métropole Européenne de Lille

ANNEXE 2 – Définitions des paramètres qui caractérisent les boues

- **La Matière Sèche (MS)**

La Matière Sèche correspond au poids sec de la boue. Elle inclut la Matière Volatile Solide et la Matière Minérale. Elle est mesurée pour connaître la quantité de boue qu'il y aura à traiter. Elle permet de calculer la siccité de la boue qui correspond au pourcentage massique de MS (c'est-à-dire pourcentage de solide dans un mélange de substance liquide-solide). La quantité moyenne produite en France est de 20 kg de matière sèche/habitant/an (variation 10 à 25 kg/hab./an) selon une étude de l'INRAE.

Pour réaliser cette mesure, il faut déterminer la masse d'un échantillon humide M1 et la masse d'un échantillon sec M2 (masse après séchage). Le séchage s'effectue dans une étuve à 105° C ou à l'infrarouge.

$$MS \text{ (en \%)} = \frac{M1 * 100}{M2}$$

Ainsi un pourcentage de siccité de 10 % signifie 90 % d'humidité dans la boue.

La Matière Sèche inclut la Matière Volatile (MV) et la Matière Minérale (MM).

- **La Matière Volatile (MV)**

Sa concentration se détermine par calcination à 550 °C d'un échantillon de boue préalablement passé dans une étuve à 105° C. Elle donne une indication sur la stabilité de la boue et son comportement sur les différents traitements. D'après les retours d'expériences « plus le taux en MV est faible et plus la boue peut être épaissie ou déshydratée plus facilement mais plus son exothermicité en incinération est faible » (source OTV).

- **La Matière Minérale (MM)**

La concentration en Matière Minérale se détermine à partir de la concentration de la Matière Volatile Solide.

$$MM \text{ (en \%)} = 100 - MV$$

- **La consistance de la boue**

La consistance de la boue est liée à l'état physique de la boue et est définie en fonction de la siccité. La connaissance de ce paramètre est déterminant pour le stockage, l'homogénéisation, la manutention.

- **Tenue en tas**

La tenue en tas est la capacité de la boue à former un angle important avec le sol en fonction d'une hauteur (cas majoritaire des boues solides : cas majoritaire des boues solides : supérieur à 45 ° sur une hauteur de 1 mètre). La tenue en tas permet de concevoir les espaces de stockage tout comme la siccité et est un élément essentiel à respecter dans les autorisations d'épandage.

- **L'Indice de boue**

Cet indice représente le volume occupé par 1 g de boues après 30 min de décantation dans une éprouvette d'1 L. Il est indirectement lié aux MS et MV. Il donne une indication sur l'épaississement car plus la boue a un indice faible et plus il est facile de l'épaissir.

$$IB = \frac{VD_{30}}{Cep}$$

VD₃₀ est le volume de boue décanté pendant trente minutes (en ml)

Cep est la concentration en matières en suspension dans l'éprouvette (en g/l)

- **Les Eléments-Traces Métalliques (ETM)**

Les ETM se sont des éléments naturels. Certains sont indispensables aux processus biologiques cependant lorsqu'ils sont trop abondants ils peuvent devenir toxique. Il est donc primordial d'identifier les éléments traces métallique de la boue quelques soit la destination finale choisie. Les métaux dont la concentration doit obligatoirement être identifiée sont les suivants : Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Zinc (Zn).

- **Les agents pathogènes**

Les agents pathogènes se sont les virus (Entérovirus), parasites (Œufs d'Helminthes viables) et bactéries (Salmonelles). Elles se retrouvent dans les boues et peuvent présenter des risques sur la santé humaine. Il s'agit d'identifier les plus résistants d'entre eux pour définir de quels agents pathogènes sont composées les boues.

- **Les Composés-Traces Organiques (CTO)**

Les CTO sont des composés chimiques et persistants. Nous distinguons les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les sept polychlorobiphényles (PCB). Ils doivent être obligatoirement analysés autant pour l'épandage agricole que l'incinération car ils peuvent se retrouver dans les fumées.

- **DCO, DBO, PT, NTK**

La fraction soluble de ces paramètres permet de connaître les caractéristiques des filtrats et centrats qui retournent en tête de traitement et peuvent représenter jusqu'à 25 % de la charge entrante. Selon le type traitement réalisé en station, il est important d'estimer cette part de charge.

La fraction particulaire de ces paramètres renseigne sur la composition de la boue. Par exemple un rapport DCO/MV élevé (supérieur à 2) traduit une forte teneur en lipide alors qu'un rapport faible traduit une quantité importante de fibres (source technique de l'ingénieur E. Guibelin 2014).

- **Température, pH, potentiel d'oxydo-réduction (eH), conductivité**

La connaissance de ces paramètres n'a pas d'impact direct sur le traitement des boues. Néanmoins, il met en évidence un dysfonctionnement comme par exemple le vieillissement des boues.

La mesure de ces paramètres peuvent aussi mettre en évidence la qualité du liquide interstitiel des boues qui peut influencer sur la mise en décharge ou l'épandage des boues par de la pollution des eaux souterraine.

ANNEXE 3 – Stabilisation et hygiénisation des boues

La boue a tendance à fermenter car elle est chargée en MV. Une stabilisation permet donc de réduire les nuisances olfactives de la boue. Plusieurs techniques d'ordre biologique, chimique ou physique peuvent s'opérer (tableau suivant). Le procédé biologique détruit les composés malodorants tandis que les procédés physiques et chimiques bloquent le processus en empêchant aux micro-organismes de consommer.

	Voies biologiques			Voies chimiques		Voies physiques
	Digestion anaérobie mésophile	Stabilisation aérobie thermophile	Compostage	Chaulage	Stabilisation aux nitrites	Séchage > 90%
Processus mis en œuvre	Dégrade les MV selon un processus biologique contrôlé			Inhibe la dégradation putride des MV		
Type de boue traitée	Boues épaissies	Boues épaissies	Boues déshydratées	Boues déshydratées	Boues épaissies	Boues déshydratées

Tableau : Les différentes techniques de stabilisation (Source OTV)

- Le compostage

Le compostage de boues s'inspire du compostage de fumiers et de supports ligneux mais en milieu aérobie. Les boues aérées sont mélangées à un coproduit (déchets verts pour la MEL avec éventuellement des refus de criblage préalablement broyés). Puis elles sont laissées de côté pendant plusieurs semaines, étape de fermentation durant laquelle les MV sont dégradées, les boues se stabilisent et s'hygiénisent et séchent par la présence d'air. Puis vient l'étape de criblage où le produit est affiné et une partie est recyclée. Et une étape finale de maturation et stockage où sont détruits les dernières MV. Le produit fini à l'aspect solide, pellatable, il est facile à stocker et à épandre. Il est de qualité agronomique satisfaisante, hygiénisé et stable car riche en humus et éléments fertilisants.

Le gestionnaire des boues de la MEL réalise deux techniques de compostage :

- Un compost par fermentation lente :
La technique consiste à réaliser des tas qui sont retournés périodiquement. La qualité de ce compost dépend de la fréquence de retournement et de l'habileté de l'opérateur. L'utilisation d'un retourneur d'andain ou d'une remblayeuse est un investissement coûteux cependant permet d'améliorer la qualité du compost.
- Un compost par fermentation accélérée :
Une ventilation des boues mélangées est assurée via un réseau de drains.

La stabilisation ne permet pas forcément la destruction des agents pathogènes. C'est pourquoi il est possible d'ajouter une étape d'hygiénisation qui consiste à réduire le taux d'agents pathogènes de la boue. Les mêmes processus par voies biologiques ou physico-chimiques décrites précédemment permettent la réduction d'agents pathogènes. Mais cela nécessite des temps de séjour plus ou moins longs et des températures et pH spécifiques. L'étape de déshydratation ne permet pas d'atteindre à elle seule toutes les siccités souhaitées. C'est pourquoi il faut ajouter des étapes de séchage.

ANNEXE 4 – Filières de traitement classiques

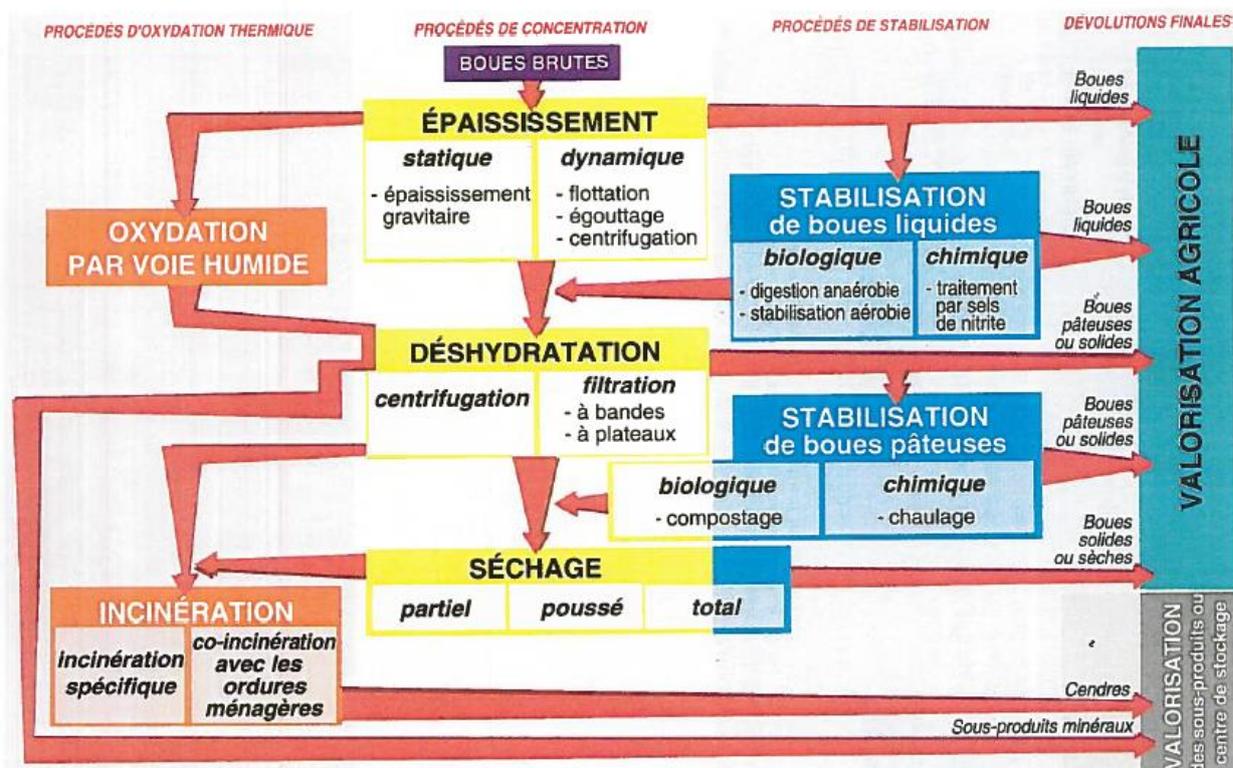


Figure : Filières de traitement classiques de boues

Etape de traitement	Objectif
Épauississement	Siccité varie entre 1 à 10 %
Déshydratation	Siccité varie de 15 à 40 % selon origine boues et machines utilisées
Stabilisation chimique ou biologique	Réduction nuisances olfactives et agents pathogènes (cependant non mis en œuvre systématiquement)
Séchage	Siccité variant entre 30 à plus de 90%
Oxydation thermique	Réduction quantité finale des boues aux seules matières minérales

Tableau : Objectifs des procédés de traitement (Source OTV)

ANNEXE 5 – Filières de traitement des petites STEP de la MEL

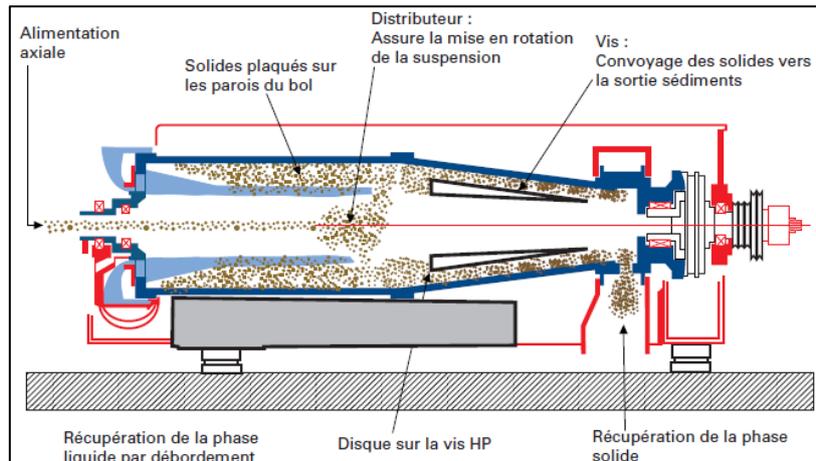


Figure 1 : Fonctionnement centrifugeuse (Source : SUEZ)



Figure 2 : Unité Mobile de Déshydratation de boues (Source : SEMEO)



Figure 3 : Lits de Séchage Plantés de Roseaux (Source MEL)

ANNEXE 6 – Espace des voiries des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier



Figure 1 : Distance des voiries de la STEP de Radinghem-en-Weppes (Source : Géoportail)



Figure 2 : Distance des voiries de la STEP de Bois Grenier (Source : Géoportail)

ANNEXE 7 – Bilan des analyses 2018 et 2019 : STEP Bois Grenier et Radinghem-en-Weppes

• Station d'épuration Bois Grenier

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

BILAN DES ANALYSES ÉLÉMENTS FERTILISANTS

Produit : BOIS GRENIER CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	MS % (brut)	pH	C/N	NTK % MS	N-NH4 % MS	P2O5 % MS	K2O % MS	CaO % MS	MgO % MS	MO % MS
01-10-2018	BO 181001 1852	09-10-2018	METROPOLE EUROPEE	14.14									
14-02-2019	LAB19-3457-1	25-02-2019	SADEF	17.90	7.90	5.9	7.680	0.4320	3.040	0.255	3.670	0.470	81.01
18-02-2019	BO 190218 0369	21-02-2019	METROPOLE EUROPEE	18.18									
05-07-2019	14970-BOUE-19	12-07-2019	METROPOLE EUROPEE	18.03					3.510	0.169	<4.898	0.463	80.97
08-07-2019	LAB19-14683-1	22-07-2019	SADEF	16.60	7.60	6.8	6.540	0.3480	3.240	0.176	4.230	0.441	80.72
Nombre				5	2	2	2	2	3	3	3	3	3
Moyenne				16.97	7.75	6.4	7.11	0.3900	3.26	0.200	4.27	0.46	80.90
% de variation				29%	4%	15%	17%	24%	15%	51%	33%	7%	<1%

% de variation : amplitude de variation entre la plus haute valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche et la plus basse valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

BILAN DES ANALYSES ÉLÉMENTS-TRACES MÉTALLIQUES

Produit : BOIS GRENIER CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	Cr + Cu + Ni + Zn
				mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
01-10-2018	BO 181001 1852	09-10-2018	METROPOLE EUROPEE	3.3	1.2	35.0	364.8		29.9	44.0		969.7	1399.4
14-02-2019	LAB19-3457-1	25-02-2019	SADEF					1.70					
18-02-2019	BO 190218 0369	21-02-2019	METROPOLE EUROPEE	1.6	0.9	19.8	305.9		21.2	30.0		874.8	1221.7
05-07-2019	14970-BOUE-19	12-07-2019	METROPOLE EUROPEE	2.1	1.0	25.3	357.9		24.3	29.0	6.2	938.5	1346.0
08-07-2019	LAB19-14683-1	22-07-2019	SADEF					1.80					
Nombre				3	3	3	3	2	3	3	1	3	3
Valeur limite					10	1000	1000	10	200	800		3000	4000
Moyenne				2.3	1.0	26.7	342.9	1.75	25.1	34.3	6.2	927.7	1322.4
% Val. Limite					10%	3%	34%	18%	13%	4%	<1%	31%	33%
Max % Val. Limite					12%	4%	36%	18%	15%	6%	<1%	32%	35%

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

BILAN DES ANALYSES COMPOSÉS-TRACES ORGANIQUES

Produit : BOIS GRENIER CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	7 PCB (1)	Fluoranthène	Benzo(b)- fluoranthène	Benzo(a)- pyrène
				mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
01-10-2018	BO 181001 1852	09-10-2018	METROPOLE EUROPEE	0.071	0.242	0.154	0.096
18-02-2019	BO 190218 0369	21-02-2019	METROPOLE EUROPEE	<0.070	0.132	0.075	0.049
05-07-2019	14970-BOUE-19	12-07-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.219	0.115	0.091
Nombre				3	3	3	3
Valeur limite	Cas Général Épandage sur pâturages			0.80	5.00	2.50	2.00
Moyenne				0.070	0.198	0.115	0.079
% Val. Limite				9%	4%	5%	4%
Max % Val. Limite				9%	5%	6%	5%

(1) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne des boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS FERTILISANTS**

Produit : BOIS GRENIER

Type : Boue d'épuration

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	MS % (brut)	pH	C/N	NTK % MS	N-NH4 % MS	P2O5 % MS	K2O % MS	CaO % MS	MgO % MS	MO % MS
02-07-2018	LAB18-13323	12-07-2018	SADEF	1.75	6.90	5.2	7.371	1.1429	3.429	0.514	6.229	0.800	69.71
02-07-2018	BO 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	1.81									
14-06-2019	13182-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	3.42					2.965	0.212	<4.898	0.436	80.17
13-12-2019	27259-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	1.73					3.782	0.227	<4.898	0.566	75.47
Nombre				4	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Moyenne				2.18	6.90	5.2	7.37	1.1429	3.39	0.318	5.34	0.60	75.12
% de variation				98%					28%	143%	27%	84%	15%

% de variation : amplitude de variation entre la plus haute valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche et la plus basse valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS-TRACES MÉTALLIQUES**

Produit : BOIS GRENIER

Type : Boue d'épuration

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	Cr + Cu + Ni + Zn
				mg/kg MS									
02-07-2018	LAB18-13323	12-07-2018	SADEF					0.87					
02-07-2018	BO 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	3.3	1.0	28.4	345.1		23.5	31.0		861.5	1258.5
14-06-2019	13182-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	2.0	1.0	19.2	329.4		18.9	24.0	6.7	863.5	1231.0
13-12-2019	27259-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	1.8	0.9	27.7	426.1		23.9	30.0	4.4	962.0	1460.0
Nombre				3	3	3	3	1	3	3	2	3	3
Valeur limite					10	1000	1000	10	200	800		3000	4000
Moyenne				2.4	1.0	25.1	366.9	0.87	22.1	28.3	5.6	902.3	1316.5
% Val. Limite					10%	3%	37%	9%	11%	4%	<1%	30%	33%
Max % Val. Limite					10%	3%	43%	9%	12%	4%	<1%	33%	37%

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
COMPOSÉS-TRACES ORGANIQUES**

Produit : BOIS GRENIER

Type : Boue d'épuration

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	7 PCB (1)	Fluoranthène	Benzo(b) - fluoranthène	Benzo(a) - pyrène
				mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
02-07-2018	BO 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	<0.070	0.147	0.118	0.074
14-06-2019	13182-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.113	0.060	0.042
13-12-2019	27259-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.147	0.095	0.073
Nombre				3	3	3	3
Valeur limite	Cas Général			0.80	5.00	2.50	2.00
	Épandage sur pâturages			0.8	4.0	2.5	1.5
Moyenne				0.070	0.136	0.091	0.063
% Val. Limite				9%	3%	4%	3%
Max % Val. Limite				9%	3%	5%	4%

(1) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

• Station d'épuration Radinghem-en-Weppes

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS FERTILISANTS**

Produit : RADINGHEM CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	MS % (brut)	pH	C/N	NTK % MS	N-NH4 % MS	P2O5 % MS	K2O % MS	CaO % MS	MgO % MS	MO % MS
16-08-2018	LAB18-17788-1	28-08-2018	SADEF	21.30	6.90	6.2	6.300	0.1870	2.840	0.182	3.980	0.527	72.30
27-08-2018	RA 180827 1617	11-09-2018	METROPOLE EUROPEE	21.22									
28-02-2019	RA 190304 0484	08-03-2019	METROPOLE EUROPEE	14.59									
28-02-2019	LAB19-6455-1	27-03-2019	SADEF	21.00	8.70	5.8	5.870	0.1110	5.090	0.744	10.500	0.775	62.85
04-03-2019	PORL19006041	14-03-2019	AUREA	14.94	7.40	5.0	8.032	0.1406	3.414	0.301	3.548	0.556	79.59
19-07-2019	16029-BOUE-19	26-07-2019	METROPOLE EUROPEE	16.24									
22-07-2019	LAB19-15783-1	01-08-2019	SADEF	15.70	8.20	5.7	7.400	0.5770	3.330	0.178	4.680	0.576	77.07
Nombre				7	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Moyenne				17.86	7.80	5.7	6.90	0.2539	3.67	0.351	5.68	0.61	72.95
% de variation				46%	28%	24%	37%	420%	79%	318%	196%	47%	27%

% de variation : amplitude de variation entre la plus haute valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche et la plus basse valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS-TRACES MÉTALLIQUES**

Produit : RADINGHEM CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	Cr + Cu + Ni + Zn
				mg/kg MS									
16-08-2018	LAB18-17788-1	28-08-2018	SADEF					0.46					
27-08-2018	RA 180827 1617	11-09-2018	METROPOLE EUROPEE	3.0	1.1	28.8	377.0		31.7	77.0		1676.5	2114.0
28-02-2019	RA 190304 0484	08-03-2019	METROPOLE EUROPEE	3.0	0.9	19.7	334.8		22.0	37.0		1016.9	1393.4
28-02-2019	LAB19-6455-1	27-03-2019	SADEF					0.75					
04-03-2019	PORL19006041	14-03-2019	AUREA		1.1	101.0	416.0	0.39	58.6	41.8		1170.0	1745.6
19-07-2019	16029-BOUE-19	26-07-2019	METROPOLE EUROPEE	2.7	1.1	26.4	444.5		31.3	47.0		1282.1	1784.3
22-07-2019	LAB19-15783-1	01-08-2019	SADEF					0.51					
Nombre				3	4	4	4	4	4	4		4	4
Valeur limite					10	1000	1000	10	200	800	0	3000	4000
Moyenne				2.9	1.1	44.0	393.1	0.53	35.9	50.7		1286.4	1759.3
% Val. Limite					11%	4%	39%	5%	18%	6%		43%	44%
Max % Val. Limite					11%	10%	44%	8%	29%	10%		56%	53%

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
COMPOSÉS-TRACES ORGANIQUES**

Produit : RADINGHEM CENTRIF

Type : Boue d'épuration déshydratée par centrifugeuse

Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	7 PCB (1)	Fluoranthène	Benzo(b)-fluoranthène	Benzo(a)-pyrène
				mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS
27-08-2018	RA 180827 1617	11-09-2018	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.434	0.278	0.180
28-02-2019	RA 190304 0484	08-03-2019	METROPOLE EUROPEE	<0.070	0.265	0.117	0.093
19-07-2019	16029-BOUE-19	26-07-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.217	0.162	0.098
Nombre				3	3	3	3
Valeur limite	Cas Général Épandage sur pâturages			0.80	5.00	2.50	2.00
Moyenne				0.8	4.0	2.5	1.5
% Val. Limite				0.070	0.305	0.186	0.124
Max % Val. Limite				9%	6%	7%	6%

(1) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne des boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS FERTILISANTS**

Produit : RADINGHEM EN WEPPEES
Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Type : Boue d'épuration
Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	MS % (brut)	pH	C/N	NTK % MS	N-NH4 % MS	P2O5 % MS	K2O % MS	CaO % MS	MgO % MS	MO % MS
02-07-2018	LAB 18-13322	12-07-2018	SADEF	3.63	6.80	5.2	7.851	0.6061	3.003	0.358	3.994	0.634	74.38
02-07-2018	RA 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	3.52									
14-06-2019	13181-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	1.21					2.998	0.234	<4.898	0.506	76.13
17-06-2019	LAB 19-13054-1	26-06-2019	SADEF	1.07	7.60	0.1	8.130	1.3200	3.740	0.713	5.450	0.940	75.70
13-12-2019	27260-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	1.16					2.769	0.204	<4.898	0.487	73.60
Nombre				5	2	2	2	2	4	4	4	4	4
Moyenne				2.12	7.20	2.7	7.99	0.9630	3.13	0.377	4.81	0.64	74.95
% de variation				239%	12%	5100%	4%	116%	35%	250%	36%	93%	3%

% de variation : amplitude de variation entre la plus haute valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche et la plus basse valeur d'analyse ramenée au taux de matière sèche

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
ÉLÉMENTS-TRACES MÉTALLIQUES**

Produit : RADINGHEM EN WEPPEES
Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Type : Boue d'épuration
Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	As mg/kg MS	Cd mg/kg MS	Cr mg/kg MS	Cu mg/kg MS	Hg mg/kg MS	Ni mg/kg MS	Pb mg/kg MS	Se mg/kg MS	Zn mg/kg MS	Cr + Cu + Ni + Zn mg/kg MS
02-07-2018	LAB 18-13322	12-07-2018	SADEF					0.60					
02-07-2018	RA 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	3.4	1.1	27.4	374.9		26.7	53.0		1168.7	1597.7
14-06-2019	13181-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	2.4	1.0	18.3	383.2		23.6	37.0	7.3	1124.2	1549.0
17-06-2019	LAB 19-13054-1	26-06-2019	SADEF					0.25					
13-12-2019	27260-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	2.4	1.0	22.8	449.6		26.2	46.0	4.5	1203.4	1702.0
Nombre				3	3	3	3	2	3	3	2	3	3
Valeur limite				10	1000	1000	1000	10	200	800		3000	4000
Moyenne				2.7	1.0	22.8	402.6	0.43	26.5	45.3	5.9	1165.4	1616.2
% Val. Limite				10%	2%	40%	4%	4%	13%	6%	<1%	39%	40%
Max % Val. Limite				11%	3%	45%	6%	13%	7%	<1%	40%	43%	

SEDE ENVIRONNEMENT, Agence MEL, 2, rue des Archers, Zone industrielle du moulin, F-62450 BAPAUME, CEDEX
Tel : 03 21 21 35 70 Fax : 03 21 21 35 75

**BILAN DES ANALYSES
COMPOSÉS-TRACES ORGANIQUES**

Produit : RADINGHEM EN WEPPEES
Période d'analyse : du 01-01-2018 au 31-12-2019

Type : Boue d'épuration
Origine : Urbain

Date de prélèvement	Référence de l'analyse	Date d'analyse	Laboratoire	7 PCB (1) mg/kg MS	Fluoranthène mg/kg MS	Benzo(b)-fluoranthène mg/kg MS	Benzo(a)-pyrène mg/kg MS
02-07-2018	RA 180702 1249	10-07-2018	METROPOLE EUROPEE	<0.070	0.375	0.270	0.158
14-06-2019	13181-BOUE-19	21-06-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.112	0.083	0.066
13-12-2019	27260-BOUE-19	20-12-2019	METROPOLE EUROPEE	0.070	0.158	0.115	0.082
Nombre				3	3	3	3
Valeur limite	Cas Général			0.80	5.00	2.50	2.00
	Épandage sur pâturages			0.8	4.0	2.5	1.5
Moyenne				0.070	0.215	0.156	0.102
% Val. Limite				9%	4%	6%	5%
Max % Val. Limite				9%	8%	11%	8%

(1) PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180

ANNEXE 8 – Extrait d'une des facture de la déshydratation de la lagune Aubers

DÉSIGNATION	QUANTITÉ	U.M.	PRIX UNITAIRE DE BASE	%	MONTANT HORS TAXES
O-1E91-18-100					
PRESTATION DE DECEMBRE 2019					
V1.7 UTILISATION GROUPE ELECTROGENE	21,00	U	89,00 €	0,0	1 869,00 €
V1.8 CURAGE ET DESHYDRATATION DES BOUES BASSIN AERATION SUR 2 POSTES DE TRAVAIL	231,10	t	99,40 €	0,0	22 971,34 €
V1.10 TRANSPORT TRAITEMENT DES BOUES	231,10	t	68,00 €	0,0	15 714,80 €

H.T. EUROS : 40 555,14 €

TVA EUROS : 4 055,51 €

T.T.C. EUROS : 44 610,65 €

ANNEXE 9 – Ecart du tonnage en matières sèche entrée/sortie par un mauvais dosage de polymère

Affaire	MEL Villeneuve d'ascq
Suivi par	Jérémy MARTINAGE
Date d'intervention	



Date	Moyenne des siccités boues initiales (g/L)	Moyenne des siccités finales (%)	Volume traité (m ³)	Tonnage MS (t)	Tonnage brut (t)	Polymère consommé (kg)	Commentaires
02/09	7,7	22,85	167	1,29		60	
03/09	7,5	22,56	208	1,55		60	échange de 17 ième bennes
04/09	7,4	22,47	275	2,04		60	
05/09	7,2	22,35	207	1,49		40	remplacement 18 ième benne à 14h
06/09							panne groupe électrogène, 5h30 - 10h
09/09	8	22,32	182	1,46		50	9 ième benne
10/09	8,3	21,76	273	2,27		50	23 ième benne
11/09	7,6	22,33	302	2,30		60	
12/09	7,4	22,16	283	2,09		50	21 ième
13/09	7,5	22,31	262	1,97		50	
16/09	7,3	22,45	314	2,29		50	22 ième benne
17/09							Faune sur l'écran de la centrifugeuse
18/09							pas de production
19/09	7,6	22,23	252	1,92		70	remontage de l'écran et programmation
20/09	7,5	22,49	354	2,66		100	
23/09	8,1	21,2	336	2,72		80	1,02 g/L
24/09	6,1	21,2	360	2,82		90	0,98 g/L
25/09	6,2	22,3	334	2,74		70	0,98 g/L
26/09	7,9	22,3	366	2,89		80	0,85 g/L
27/09	7,7	21,88	286	2,20		70	0,82 g/L
30/09	7,5	22,36	273	2,05		60	Attente benne 2H
Moyenne	7,71	22,13					
Total			5034	38,8	180,2	1160,0	

$$\frac{\text{Volume traité (m}^3\text{)} * \text{Siccité initiale } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{1000} = \text{Quantité boues en TMS}$$

$$\frac{5034 \text{ (m}^3\text{)} * 7,71 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{1000} = 38,81 \text{ TMS}$$

$$\text{Tonnage brute (TMB)} * \text{Siccité finale (\%)} = \text{Quantité boues en TMS}$$

$$150,2 \text{ (TMB)} * 0,2213 \text{ (\%)} = 33,24 \text{ TMS}$$

$$\Delta = \frac{(38.81 - 33.24)}{38.81} = 14.4\%$$

ANNEXE 10 – Comparaisons technico-économique des techniques de déshydratation mécanique

Déshydratation mécanique			
Technique	Centrifugeuse	Filtres à bandes	Filtre à plateaux
Taille de station d'épuration	Recommandée pour STEU > 2000	Recommandée pour STEU > 2000 Boues mixtes, digérées anaérobies mixtes, aération prolongée	Recommandée pour STEU > 8000 EH
Emprise foncière	40 m ² Machine compacte	40 m ² Largeur bandes 0.5 à 3 m Système encombrant	Dimension plateaux de 0,3 à 1,5 m de côté et 20 à 30 mm d'épaisseur Equipement peu compact
Type	Mécanique	Mécanique Basse, moyenne, forte pression	Mécanique
Boues d'entrée	Epaissie	Epaissie	Epaissie
Besoins énergétiques	30 à 60 kWh/t Consommation énergétique importante	10 à 25 kWh/tMS Faible consommation énergétique	20 à 40 kWh/tMS Consommation énergétique importante
Consommation de polymère	5 à 8 kg/t MS Polymère cationique Conditionnement précis et rigoureux sinon chute de performance machine	3 à 7 kg/t MS Polymère cationique	20 à 30% chaux, 8 à 10% FeCL3 Minéral ou polymère augmentation de MS artificiel, ajout de polluant

Maintenance	Maintenance faible mais spécifique Sensible aux sables et aux bourrages de filasses donc nécessiter de pré-traiter les eaux en amont	Demande de maintenance importante Rustique	Toile filtrante à changer (coût de maintenance faible car les toiles peuvent assurer des milliers de cycle de filtration)
Siccité obtenue (%)	16 à 22 %	15 à 18 %	30 à 35 % Bonne tenue en "tas" épaisseur du gâteau influence la siccité finale
Besoins en équipement	Centrifugeuse, cuve à polymère, pompe	Filtres à bandes, table à égouttage	Pompe, plateaux, toile, réservoir
Problèmes mécaniques	Mauvais réglage de la machine conduit à une mauvaise séparation liquide solide Problème mécanique de machine provoque arrête de filière	Casses fréquentes (arrêt de filière) Demande beaucoup de maintenance	
Destination envisageable	Compostage	Compostage	Agriculture
Exploitation	Centrifugeuse	Filtres à bandes	Filtre à plateaux
Fonctionnement	Continu	Continu Besoin de surveillance, fluage si pression trop importantes	Discontinu Durée d'un cycle complet entre 2 à 4h (remplissage, filtration, débatissage) Proposition de système automatisé
Main d'œuvre	Appareil sophistiqué demande une main d'œuvre qualifié en cas de disfonctionnement de l'appareil	Surveillance plus faible que les filtres à plateaux (main d'œuvre très réduite)	Système complètement automatisé donc main d'œuvre très réduite
Visuel boues	Moins bonne tenue en "tas" que les boues des filtres à bandes	Visuel de la boue en cours de déshydratation	Visuel des boues après cycle de déshydratation
Nuisance	Bruyant et odeur forte	Nuisances (intégration)	

		nuisance par carénage intégral)	
Fréquence lavage	Faible consommation eau de lavage	Nettoyage permanent pour éviter l'encrassement des toiles 10 m ³ /h pour 1 m de largeur de bande (retour d'eau important en tête de station)	Nettoyage régulier pour éviter le colmatage de la toile
Centrat en retour de tête de station	Possibilité de constater de la floculation dans les postes de la file eau par une surcharge plus ou moins importante		
Durée de vie équipement		1 à 2 ans la durée de vie toile	
Economie	Centrifugeuse	Filtres à bandes	Filtre à plateaux
Investissement	Coût investissement important	Coût investissement modéré	Investissement élevé
Fonctionnement	Coût de fonctionnement important en raison de la forte consommation en polymère, usure pièces mobiles	Procédé le moins énergivore	

ANNEXE 11 – Critères doctrine mélange

- Prérequis
 - Des stations d'épuration dont le total de capacité est inférieur à 10 000 EH, peuvent prétendre au mélange de boues.
 - Si le total de capacité des stations est supérieur à 10 000 EH, elles peuvent prétendre au mélange de boue que si le mélange n'excède pas 20% de la capacité de la station réceptrice.
- Responsabilité

Le préfet désigne un unique maître d'ouvrage des boues mélangées (Art R. 211-30). Néanmoins un contrat est établi entre les producteurs de boues afin de clarifier la quantité, la qualité des boues qui sera apportée à la station où se fera le mélange. Mais aussi, le contrat détaille les modalités de transfert de boues vers le lieu du mélange.

- Motivation

Le maître d'ouvrage devra réaliser un dossier d'autorisation (préalablement consulté par les services de Police de l'eau et les SATEGE) pour statuer le principe de mélange. Cette demande devra justifier l'intérêt agronomique et économique et expliquer en quoi une unité de traitement unique n'a pas été retenue.

- Proximité

La distance entre la station émettrice et celle réceptrice ne doit pas dépasser les 20 km. Aussi les capacités de stockage devront être suffisantes pour minimiser le transport.

Géographiquement, les deux stations sont à 5 min en voiture l'une de l'autre. La station de Bois Grenier ne dispose pas d'espace pour envisager la création d'une filière de traitement des boues à moins d'acheter du terrain.

- Qualité des boues

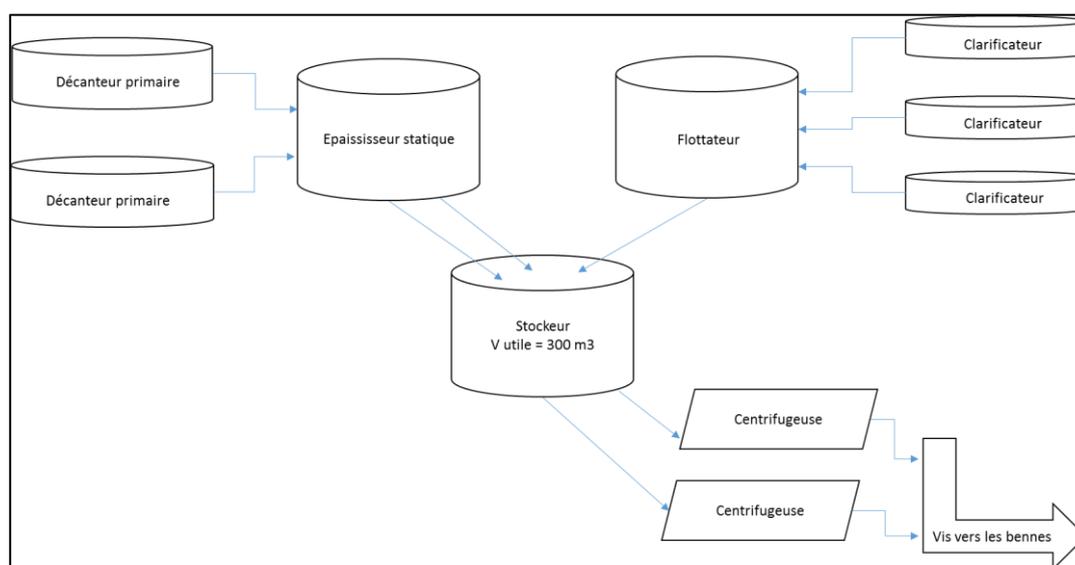
Le mélange de boues sera autorisé que si les boues sont conformes à l'arrêté du 8 Janvier 1998.

Avant chaque mélange, les stations émettrices doivent analyser leurs boues sur la présence d'éléments-traces et composés-traces organiques. Dans l'attente de ces résultats, il est recommandé de pouvoir stocker ces boues. De même, après mélange, une analyse des boues sera programmée sur site de la station réceptrice afin de contrôler les éventuelles pollutions et assurer la traçabilité. Il est à noter qu'une variation de composition de plus de 30% sur l'année exprimée sur matière sèche aura pour conséquence l'augmentation du nombre d'analyse réalisé sur les boues mélangées.

- Traçabilité

Le maître d'ouvrage doit être en mesure de suivre son mélange afin de pouvoir identifier à tout moment une pollution.

ANNEXE 12 – Synoptique de la station d'épuration d'Houplin Ancoisne



ANNEXE 13 – Tableaux des coûts du traitement déclinés par projet

Tableau 1 : Coût du traitement de boues par UMDB (facture mars et août 2019)

	UMDB (mars 2019)	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Déshydratation	Déshydratation sur station	867	m3	12.00	10 404.00 €
	Plue value groupe électrogène	867	m3	5.00	4 335.00 €
					14 739.00 €
Transport des boues déshydratées	Transport d'un caisson step-compostage	4	F/Mois	440.00	1 760.00 €
					1 760.00 €
Valorisation	Compostage boues centrifugées. déshydratées sur filtre-pressé	66.5	T	49.00	3 258.50 €
					3 258.50 €
Coût traitement					19 757.50 €
Analyses	Valeur agronomique complète	3	série	34.50	103.50 €
	Oligo-éléments	3	série	31.00	93.00 €
	Mercuré	3	analyse	28.20	84.60 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	3	série	4.10	12.30 €
					293.40 €
Total coûts variables					20 050.90 €
Déshydratation	Démontage. repli et enlèvement de l'unité de déshydratation mobile – Nettoyage	2	intervention	2400	4 800.00 €
	Plue value groupe électrogène	2	intervention	650.00	1 300.00 €
	Installation d'une UMDB	2	intervention	2 400.00	4 800.00 €
	Plue value groupe électrogène	2	intervention	650.00	1 300.00 €
					12 200.00 €
Forfait mensuel STEP	Forfait mensuel Radinghem	12	F/Mois	176.00	2 112.00 €
Total coûts fixes					14 312.00 €

Tableau 2 : Coût d'un traitement avec combiné table d'égouttage et filtre à bandes

	Combiné table d'égouttage et filtre à bandes	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Déshydratation	Polymère	504	kg	4.23	2 131.92 €
					2 131.92 €
Transport des boues déshydratées	Transport stockage step-compostage Herlies	280	T	17.00	4 760.00 €
					4 760.00 €
Valorisation	Compostage boues. déshydratées sur filtre-pressé	280	T	49.00	13 720.00 €
					13 720.00 €
Analyses	Valeur agronomique complète	2	série	34.50	69.00 €
	Oligo-éléments	2	série	31.00	62.00 €
	Mercuré	2	analyse	28.20	56.40 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	2	série	4.10	8.20 €
					195.60 €
Total coûts variables					20 807.52 €

Forfait mensuel STEP	Forfait mensuel Radinghem	12	F/Mois	176,00	2 112.00 €
Total coûts fixes					2 112.00 €

Tableau 3 : Coût du traitement par Lits de Séchage Plantés de Roseaux

	Lits de Séchage Plantés de Roseaux	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Traitement	Bassins à Rhizophytes d'Ennetières	140	T	97.00	13 580.00
					13 580.00
Transport des boues déshydratées	Transport step-compostage	140	T	14.30	2 002.00
					2 002.00 €
Valorisation ou élimination	Compostage boues	140	T	49.00	6 860.00
					6 860.00 €
Analyses	Valeur agronomique complète	2	série	34.50	69.00 €
	Oligo-éléments	2	série	31.00	62.00 €
	Mercuré	2	analyse	28.20	56.40 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	2	série	4.10	8.20 €
					195.6
Total coûts variables					22 637.60 €

Tableau 4 : Coût du traitement par mélange (Scénario 1)

	Scénario 1	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Transport avant traitement : tansfert des boues liquides sur site d'HA	Transport en citerne/hydro cureur rayon 0-20 km	78	<i>F/Mois</i>	360.00	28 080.00 €
	Heure régie chargement	6	<i>h</i>	90.00	540.00 €
					28 620.00 €
Traitement	Traitement boues en centrifugeuse	42	<i>T MS traité</i>	40.75	1 711.50 €
	Boues séchées à 90% sur VA	42	<i>T</i>	96.73	4 062.53 €
					5 774.03 €
Transport après traitement : transport des boues déshydratées sur HA OU déshydratées sur HA et séchées sur VA	Transfert bennes STEP d'HOUPLIN jusqu'au dépotage STEP de VILLENEUVE D'ASCQ	6	<i>Tr</i>	275.00	1 650.00 €
	Transport stockage step VA-parcelle Houplin séchées	51.6	<i>T</i>	16.40	846.24 €
					2 496.24 €
Valorisation ou élimination	Epannage Houplin séchées épandeur classique	51.6	<i>T</i>	10.00	516.00 €
					516.00 €
Analyses	Valeur agronomique complète	2	<i>série</i>	34.50	69.00 €
	Oligo-éléments	12	<i>série</i>	31.00	372.00 €
	Mercuré	12	<i>analyse</i>	28.20	338.40 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	12	<i>série</i>	4.10	49.20 €
					828.60 €
Total coûts variables					38 234.87 €
Forfait mensuel STEP	Forfait mensuel Radinghem	12	<i>F/Mois</i>	176.00	2 112.00 €
Forfait annuel épandage	Forfait annuel épandage	1	<i>Forfait</i>	1 900.00	1 900.00 €
Total coûts fixes					4 012.00 €

Tableau 5 : Coût du traitement par mélange (scénario 2 compostage et épandage direct en période d'épandage)

	Scénario 2	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Transport avant traitement : tansfert des boues liquides sur site d'HA	Transport en citerne/hydro cureur rayon 0-20 km	78	<i>F/Mois</i>	360.00	28 080.00
	Heure régie chargement	6	<i>h</i>	90.00	540.00
					28 620.00 €
Traitement	Traitement boues en centrifugeuse	42	<i>T MS traité</i>	40.75	1 711.50
					1 711.50 €
Transport après traitement : transport des boues déshydratées sur HA	Transport step-compostage Houplin boues centrifugées en flux tendu	104.76	<i>T</i>	15.90	1 665.68
	Transport step-parcelle Houplin centrifugée	57.14	<i>T</i>	14.40	822.82
					2 488.50 €
Valorisation ou élimination	Compostage boues centrifugées	104.76	<i>T</i>	58.00	6 076.08
	Epandage Houplin centrifugée	57.14	<i>T</i>	6.50	371.41
					6 447.49 €
Analyses	Valeur agronomique complète	2	<i>série</i>	34.50	69.00 €
	Oligo-éléments	12	<i>série</i>	31.00	372.00 €
	Mercuré	12	<i>analyse</i>	28.20	338.40 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	12	<i>série</i>	4.10	49.20 €
					828.60 €
Total coûts variables					40 096.09 €
Forfait mensuel STEP	Forfait mensuel Radinghem	12	<i>F/Mois</i>	176.00	2 112.00 €
Forfait annuel épandage	Forfait annuel épandage	1	<i>Forfait</i>	1 900.00	1 900.00 €
Total coûts fixes					4 012.00 €

Tableau 6 : Coût du traitement par mélange (scénario 3)

	UMDB boues non conformes	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Traitement	Installation d'une UMDB	6	<i>intervention</i>	2 400.00	14 400.00 €
	Plue value groupe électrogène	6	<i>intervention</i>	650.00	3 900.00 €
	Déshydratation sur station	2100	<i>m3</i>	12.00	25 200.00 €
	Plue value groupe électrogène	2100	<i>m3</i>	5.00	10 500.00 €
	Démontage, repli et enlèvement de l'unité de déshydratation mobile – Nettoyage	6	<i>intervention</i>	2400	14 400.00 €
	Plue value groupe électrogène	6	<i>intervention</i>	650.00	3 900.00 €
					72 300.00 €
Transport des boues déshydratées sur HA OU déshydratées sur HA et séchées sur VA	Transport stockage STEP CET2 Radinghem	6	<i>Tr</i>	20.00	120.00 €
					120.00 €
Valorisation ou élimination	Enfouissement en CET2 boues centrifugées, déshydratées sur filtre-pressé	233	<i>T</i>	63.00	14 679.00 €
					14 679.00 €
Analyses	Valeur agronomique complète	2	<i>série</i>	34.50	69.00 €
	Oligo-éléments	12	<i>série</i>	31.00	372.00 €
	Mercure	12	<i>analyse</i>	28.20	338.40 €
	Analyse faites par le laboratoire VSE de la MEL	12	<i>série</i>	4.10	49.20 €
					828.60 €
Total coûts variables					87 927.60 €

Forfait mensuel STEP	Forfait mensuel Radinghem	12	<i>F/Mois</i>	176.00	2 112.00 €
Forfait annuel épandage	Forfait annuel épandage	1	<i>Forfait</i>	1 900.00	1 900.00 €
Total coûts fixes					4 012.00 €

ANNEXE 14 – Emissions de gaz à effet de serre du traitement et de la valorisation des boues liquides de Radinghem-en-Weppes en fonction de chaque projet

Emissions de gaz à effet de serre pour le traitement des boues liquides par unité mobile de déshydratation

Etape de traitement	Données Gestaboues IRSTEA	Hypothèses prises	Calculs	Emissions directes (kg eq CO2)			Emissions indirectes (kg eq CO2)
				CO2 (PRG 25)	N2O (PRG 298)	Electricité/Réactif	
Stockage RW (ou BG)	Silo aéré	0 kg / Kg DBO5 (DBO5 entrée avec abattement à 90%)	DBO5 RW= 102 kg/an	0			
	Consommation électrique (système agitation)	5 KWh/t MS 0.09 kg eq CO2/KWh	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	5*42=210KWh 210*0.09=19 kg eq CO2/KWh			19.00
Transport réactif	Réactif déshydratation	0.704 kg eq CO2 / tMS.km et 30 km		0.704*42*30= 887 kg eq CO2			887.00
Transport unité	Unité + équipements	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km	UMDB à 50 km de la STEP	0.1167*42*50=245 kg eq CO2			245
Préparation des polymères		37.5 Wh / tMB boues (sur la base qu'1 m3 = 1 tMB) et 0.090 kg eq CO2 / kWh	867 m3 pour l'année	37.5*867=32512 Wh 0.09*32512=2926 kg eq CO2			2926
Déshydratation	Consommation électrique de la centrifugeuse classique	60 KWh/t MS 0.09 kg eq CO2/KWh	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	60*42=2520 KWh 0.09*2520= 227 kg eq CO2			227.00
	Polymère	7 kg/t MS	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	7*42= 294 kg eq CO2			294
Compostage	Processus de compostage	10kg/TMS (CH4) et 0.8kg/TMS(N2O)	Rendement de capture centrifugeuse 95%	10*40=400 kg eq CH4 400*25=1000 kg eq CO2 0.8*40=32 kg eq N2O 32*298=9536 kg eq CO2	1000	9536	
	Diesel	10L/TMS et 2.79 kg eq CO2/L		10*40=486.5 L 400*2.79=1116 kg eq CO2			1116

	Consommation électrique	60L/TMS et 0.09 kg eq CO2/L		60*40=2400 L 2400*0.09=216 kg eq CO2				216
	Transport par camion de + de 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km	Site compostage situé à 50 km de la STEP	0.1167*40*50=233 kg eq CO2				233
Infrastructure	Usine de compostage	2.892 kg eq CO2/tonne boues traitées	42 TMS	2.892*42=121 kg eq CO2				121
	Silo aéré	0.0067/Tonne boues traitées	42 TMS	0.0067*42=0.28 kg eq CO2				0.28
Total en Teq CO2						1	9.54	6.28

Emissions de Gaz à Effet de serre du traitement et valorisation des boues liquides (traitement table d'égouttage et filtres à bande)

Etape de traitement	Données Gestaboues IRSTEA	Hypothèses prises	Calculs	Emissions directes (kg eq CO2)			Emissions indirectes (kg eq CO2)
				CO2 (PRG 1)	CH4 (PRG 25)	N2O (PRG 298)	Electricité/Réactif
Stockage RW	Silo aéré	0 kg / Kg DBO5 (DBO5 entrée avec abattement à 90%)	DBO5 RW= 42 kg/an	0	0		
	Consommation électrique (système agitation)	5 kWh/t MS 0.09 kg eq CO2/kWh	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	5*42=210 kWh 210*0.09=18.9 kg eq CO2/kWh			19.00
Réactif déshydratation	Transport réactif	0.704 kg eq CO2 / tMS.km et 30 km	SNF fournisseur	0.704*42*30= 887 kg eq			887.00
	Préparation des polymères	37.5 kWh / tMB boues et 0.090 kg eq CO2 / kWh	42 TMS /15% siccité = 280 TMB	37.5*280=10500 kWh 0.09*10500=945 kg eq CO2			945
Epaississement	Table à égouttage	45 kWh/t MS	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	45*42=1890 kWh 0.09*1890=170 kg eq CO2			170
	Polymère	6 kg/t MS	Production de boues estimée de RW = 42 TMS	6*42=252 kg eq CO2			252
Déshydratation	Consommation électrique des filtres à bande	18 kWh/t MS 0.09 kg eq CO2/kWh	Production de boues estimée de RW = 46TMS (rendement de capture de la table à égouttage)	18*46=828 kWh 0.09*828= 75 kg eq CO2			75.00

			95% et 6 TMS réactif)					
Compostage	Processus de compostage	10kg/TMS (CH4) et 0.8kg/TMS(N2O)	Capture du filtre à bande 95% Production de boues estimée de RW = 44 TMS	44*10*25=11000 kg eq CO2 44*0.8*298=10490 kg eq CO2		11000	10490	
	Diesel	10L/TMS et 2.79 kg eq CO2/L		10*44=440 L 440*2.79=1228 kg eq CO2				1228
	Consommation électrique	60L/TMS et 0.09 kg eq CO2/L		60*44=2640 L 2700*0.09=238 kg eq CO2				238
	Transport par camion de + de 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km	Site compostage situé à 50 km de la STEP	0.1167*44*50=257 kg eq CO2				
Infrastructure	Table d'égouttage	0.0022/tonne boues traitées	Boues traitées 44 TMS	0.0022*44=0.1 kg eq CO2				0.1
	Usine de déshydratation	0.0257/tonne boues traitées	Boues traitées 44 TMS	0.0257*44=1.1 kg eq CO2				1.1
	Usine de compostage	2.892 kg eq CO2/tonne boues traitées	Boues traitées 44 TMS	2.892*44=127 kg eq CO2				127
	Silo aéré	0.0067/Tonne boues traitées	Boues traitées 44 TMS	0.0067*44=0.3 kg eq CO2				0.3
Total en Teq CO2					11	10.5	4.2	

Emission de Gaz à effet de serre pour le traitement des boues liquides par lits de séchage plantés de roseaux

Etape de traitement	Données Gestaboues IRSTEA	Hypothèses prises	Calculs	Emissions directes (kg eq CO2)			Emissions indirectes (kg eq CO2)
				CO2 (PRG 1)	CH4 (PRG 25)	N2O (PRG 298)	Electricité/Réactif
Déshydratation	Minéralisation	45.22 g/EH/an (CH4) 51.81 g/EH/an (N2O)	1700 EH	0.04522*1700*25=1922 kg eq CO2	0.05181*1700*298=26247 kg eq CO2		
	Consommation électrique pompe	0.05 kWh/EH et 0.09 kg eq CO2/kWh	1700EH	0.05*1700=85 kWh 85*0.09=8 kg eq CO2			8

Compostage	Processus de compostage	10kg/TMS (CH4) et 0.8kg/TMS(N2O)	Production boues produites à RW estimée à 21 TMS	10*21=210 kg CH4 210*25=5250 kg eq CO2 0.8*21*298=5006 kg CH4	5250	5006	
	Diesel	10L/TMS et 2.79 kg eq CO2/L		10*21=210 L 210*2.79=586kg /TMS			586
	Consommation électrique	60L/TMS et 0.09 kg eq CO2/L		60*21=1260 L 1260*0.09=113 kg/TMS			113
	Transport par camion de + de 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km	Site compostage situé à 50 km de la STEP	0.1167*21*50=123 kg eq CO2			123
Infrastructure	LSPR						1336.66
	Usine de compostage	2.892 kg eq CO2/tonne boues traitées		2.892*21=61			61
Total Teq CO2					7.2	31.3	2.3

Emissions de Gaz à effet de serre pour le traitement des boues liquides par mélange

Etape de traitement	Données Gestaboues IRSTEA	Hypothèses prises	Calculs	Emissions directes (kg eq CO2)			Emissions indirectes (kg eq CO2)
				CO2 (PRG 1)	CH4 (PRG 25)	N2O (PRG 298)	Electricité/ Réactif
Stockage RW (ou BG)	Silo aéré	0 kg / Kg DBO5 (DBO5 entrée avec abattement à 90%)	DBO5 RW= 102 kg/an	0	0		
	Consommation électrique (système agitation)	5 KWh/t MS 0.09 kg eq CO2/KWh	Production de boues estimée de RW = 42TMS	5*42=210 KWh 210*0.09=18.9 kg eq CO2/KWh			19.00
Transfert boues liquides	Transport par camion + 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km 12 km de distance entre la STEP RW et la STEP HA	Le transport de boues dans Gestaboues est calculé pour des boues à épandre. Sans autre source de donnée nous utilisons cette donnée pour le transport de boues de la STEP de RW à HA	0.1167*42*12=59 kg eq			59

Stockeur-mélangeur HA	Silo non aéré < 2m	0.12 kg / kg DBO5 (DBO5 entrée avec abattement à 90%)	DBO5 HA = 4124500 kg/an l'ajout de RW à HA est négligeable car ne modifie pas la qualité et la quantité de HA	$0.9 \cdot 4124500 = 3712050 \text{ kg/an}$ $0.12 \cdot 3712050 = 445446 \text{ kg eq CO2}$	445	446		
	Consommation électrique (système agitation)	5 KWh/t MS 0.09 kg eq CO2/KWh	Production de boues estimée de RW+HA = 5213 TMS	$5 \cdot 5213 = 26065 \text{ KWh}$ $26065 \cdot 0.09 = 2346 \text{ kg eq CO2/KWh}$				2346
Transport	Réactif déshydratation	0.704 kg eq CO2 / tMS.km et 30 km		$0.704 \cdot 5213 \cdot 30 = 110099 \text{ kg eq}$				110099.00
Déshydratation HA	Consommation électrique de la centrifugeuse classique	40 KWh/t MS 0.09 kg eq CO2/KWh	Production de boues estimée de RW+HA = 5213 TMS	$40 \cdot 5213 = 208520 \text{ KWh}$ $0.09 \cdot 208520 = 18767 \text{ kg eq CO2}$				18767.00
	Polymère	5 kg/t MS	Production de boues estimée de RW+HA = 5213 TMS	$5 \cdot 5213 = 26065 \text{ kg eq CO2}$				26065
Transfert boues déshydratées	Transport par camion + 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km 19 km de distance entre la STEP HA et la STEP VA (taux de capture déshydratation 95%)	Production de boues estimée de RW+HA = 4952 + 5 TMS = 4957 T MS	$0.1167 \cdot 4957 \cdot 19 = 10991 \text{ kg eq}$				10991.00
Séchage VA	Consommation thermique	930 KWh/tee sècheur indirect 0.09 kg eq CO2 / kWh	tee= T MS/(siccité entrée) -(T MS/siccité sortie) TFE M.PIMOR 2003 siccité entrée 27.7% et siccité sortie 90.6%	$(4957/0.277) - (4957/0.906) = 12424 \text{ tonnes eau évacuées}$ $930 \cdot 12424 = 11554320$ $11554320 \cdot 0.09 = 1039889 \text{ kg eq CO2}$				1039889.00
	Consommation électrique sècheur	105 KWh/tee 0.24 kg eq CO2 / kWh (gaz naturel)	12424 tonnes eau évacuées	$105 \cdot 12424 = 1304520 \text{ KWh}$ $0.24 \cdot 1304520 = 313084 \text{ kg eq CO2}$				313084.00
Transport STEP VA-STOCK VA	Transport par camion + 32 t - classe euro 3	0.1167 kg eq CO2 / tMS.km	300 m entre la STEP et le stockage de boues	$0.1167 \cdot 4957 \cdot 0.3 = 173 \text{ kg eq}$				173
Transport STOCK VA-CHAMP	Transport par tracteur 100 Kw et épandeur de	0.7656 kg eq CO2 / tMS.km	80 km entre la STEP et le champ	$0.7656 \cdot 4957 \cdot 80 = 303606 \text{ kg eq}$				303606

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne des boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

	produits solides							
Epandage		0.2875 kg N20/TMB	4957TMS et 90.6% siccité =5471T MB	5471*0.2875=1573kg N20 1573*298=468728kq eq CO2			468728	
	Fioul	3.2 kg eq CO2/L	3.92 T/ha					
	Litre consommé pour l'épandage par TMS	71.1 L/TMS	4957 TMS	3.2*71.1=227.52 L/TMS 227.52*4957=1127817kg eq CO2				1127817
	Séquestration	-.25kg CO2/kg MS	4957 TMS	4957*(-0.25)=-1240 kg eq CO2	-1240.00			
Infrastructure	Stockage 1	0.0067 / T boues traitée silo 250 m3 à	4957 TMS	0.0067*4957=33 kg eq				33.00
	Stockage 2	0.0067 / T boues traitée silo 250 m3 à	4957 TMS	0.0067*4957=33 kg eq				33.00
	Centrifugeuse pour déshydratation	0.0735 kg eq CO2/ t boues traitées et durée de vie 15 ans	4957 TMS	0.0735*4957=364 kg eq				364
	Stockage boues	Epaisseur dalle = 50 cm Hauteur muret = 2.5 m Epaisseur muret= 20cm Surface dalle béton = 5.5 m² Longueur muret = Surface dalle béton^0.5 m V = [261 x ((Surface dalle béton x épaisseurs dalle) + 3 x (Longueur muret x hauteur muret x épaisseurs muret))]	4957TMS et V x 3.7879E-06					0.006196621
	Sécheur thermique	26.4856						131289.12
Total en Teq CO2					-1.2	445.4	468.7	3084.6

ANNEXE 15 – Espace disponible aux abords des STEP de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier



Surface de la parcelle disponible sur la station d'épuration de Radinghem-en-Weppes



Surface de la parcelle disponible sur la station d'épuration de Bois Grenier

ANNEXE 16– Coût d'investissement des LSPR de la STEP Radinghem-en-Weppes

	Nbr	Unité	Prix Unitaire HT	Prix HT
Massif filtrant				
Compost	84	m3	47.44 €	3 971.94 €
F et P Gravelle 3/6	167	m3	95.58 €	16 006.11 €
F et P géospaceur	84	m3	6.02 €	503.95 €
F et P Gravelle 20/40	126	m3	109.74 €	13 783.16 €
Roseaux	3348	Unité	5.20 €	17 409.60 €
Géotextile	1026	m ²	2.95 €	3 026.70 €
Géomembrane	1026	m ²	10.65 €	10 925.51 €
				65 626.98 €
Canalisations				
F et P drains	210	ml	21.24 €	4 460.56 €
F et P refoulement DN 125	30	ml	80.24 €	2 407.24 €
				6 867.80 €
Terrassement et voirie des lits				
Terrassement des lits	1	forfait	41 300.00 €	41 300.00 €
Voirie autour des lits	1	forfait	41 300.00 €	41 300.00 €
				82 600.00 €
Equipement				
Défecteurs	18	1 équipement	212.50 €	3 825.00 €
Pompes	2	1 équipement	1 950.00 €	3 900.00 €
Vannes	6	1 équipement	600.00 €	3 600.00 €
				11 325.00 €
Total				166 419.77 €

ANNEXE 17 – Electre I : famille technique et famille environnement

Les familles de critères sont présentées dans le tableau suivant :

Famille		Critères
Finance	C_{r1}	Coût d'investissement
	C_{r2}	Coût études et frais recherches
	C_{r3}	Coût de fonctionnement
	C_{r4}	Coût global actualisé sur 20 ans
Technique	C_{r1}	Qualité dépôt de boues
	C_{r2}	Qualité retour en tête percolât/centrat
	C_{r3}	Consommation électrique
	C_{r4}	Consommation en réactif
Environnement	C_{r1}	Nuisances sonores
	C_{r2}	Pollution air
	C_{r3}	Intégration paysagère
	C_{r4}	Utilisation énergies renouvelables

Tableau : Famille de critères

L'importance de chaque critère dans la prise de décision est traduite par un poids k_j tel que :

Critères	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
Poids (k_j)	3	3	2	1

Tableau Poids des critères techniques

Critères	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
Poids (k_j)	3	2	1	1

Tableau Poids des critères environnementaux

Chaque projet est évalué en fonction des critères retenus à l'aide d'une échelle qualitative et des scores. Plus le score est élevé, plus les impacts du projet sont moindres. Les tableaux de performance sont donnés dans les tableaux suivants :

Projets	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
P_1	13	15	5	5
P_2	17	20	20	20
P_3	20	20	5	5

Tableau de performance technique

Projets	C_{r1}	C_{r2}	C_{r3}	C_{r4}
P_1	15	15	10	10
P_2	20	10	20	18
P_3	10	5	10	10

Tableau de performance environnemental

A l'aide d'indices de concordance et discordances nous allons faire un choix.

L'indice de concordance pour deux actions a et b est noté par $C(a,b)$, compris entre 1 et 0, il mesure la pertinence de l'assertion « a surclasse b », comme suit :

$$C(a,b) = \frac{\sum_{\forall j: g_j(a) \geq g_j(b)} k_j}{K} \text{ avec } K = \sum_{j=1}^n k_j$$

La matrice des indices de concordance technique est donnée par :

	P_1	P_2	P_3
P_1	-	0	0.3
P_2	1	-	0.6
P_3	1	0.6	-

Tableau Matrice de concordance technique

La matrice des indices de concordance environnemental est donnée par :

	P_1	P_2	P_3
P_1	-	0.7	1
P_2	0.7	-	1
P_3	0.3	0	-

Tableau Matrice de concordance environnemental

Sinon l'indice de discordance est :

$$D(a,b) = \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(b) - g_j(a)]$$

avec δ est la différence maximale entre le même critère pour deux actions donnée.

La matrice de discordance technique est obtenue comme suit avec pour une valeur de

$$\delta = 20-5=15$$

Projets	P_1	P_2	P_3
P_1	-	1	0.46
P_2	0	-	0
P_3	0	1	-

Tableau Matrice de discordance technique

La matrice de discordance environnemental est obtenue comme suit avec pour une valeur de

$$\delta = 20-10=10$$

Projets	P_1	P_2	P_3
P_1	-	1	0
P_2	0.5	-	0
P_3	1	1	-

Tableau Matrice de discordance environnemental

ANNEXE 18 – Note de calcul des longueurs et largeurs des LSPR

- **Calcul de la longueur et largeur des LSPR de la STEP de Radinghem-en-Weppes**



Figure : Longueur de la parcelle disponible à la STEP de Radinghem-en-Weppes



Figure : Largeur de la parcelle disponible à la STEP de Radinghem-en-Weppes

Largeur parcelle disponible	19.75 m
Distance voirie	4 m
Nombre de voirie	1
Largeur de parcelle réellement disponible	$19.75 - 4 = 15.75$ m
Largeur d'1 lit	$\frac{15.75}{2} = 7.88$ m
Surface nécessaire pour 1 lit	139.50 m ²
Longueur d'1 lit	$\frac{139.50}{7.88} = 17.71$ m
Longueur parcelle disponible	82.5 m
Nombre de voirie	2
Longueur réellement disponible (sans voirie)	74.5 m
Longueur de 3 lits	$17.71 * 3 = 53.13$ m
Disponibilité parcelle : validé	53.13 m < 74.5 m

Tableau : calcul de la surface nécessaire pour les LSPR par rapport à la surface disponible de Radinghem_en-Weppes

La parcelle disponible de la STEP de Radinghem-en-Weppes est suffisante.

• **Calcul de la longueur et largeur des LSPR de la STEP de Bois Grenier**



Figure : Longueur de la parcelle disponible à la STEP de Bois Grenier



Figure : Largeur de la parcelle disponible à la STEP de Bois Grenier

Largeur parcelle disponible	22.67 m
Distance voirie	4 m
Nombre de voirie	2
Largeur de parcelle réellement disponible	$22.67 - (2 \times 4) = 14.67 \text{ m}$
Largeur d'1 lit	$\frac{14.67}{2} = 7.34 \text{ m}$
Surface nécessaire pour 1 lit	107.31 m ²
Longueur d'1 lit	$\frac{107.31}{7.33} = 14.63 \text{ m}$
Longueur parcelle disponible	32.9 m
Nombre de voirie	2
Longueur réellement disponible (sans voirie)	24.9 m
Longueur de 3 lits	$14.63 \times 3 = 43.89 \text{ m}$
Disponibilité parcelle : non validé	$43.89 \text{ m} > 24.9 \text{ m}$

Tableau : calcul de la surface nécessaire pour les LSPR par rapport à la surface disponible de Bois Grenier

Il est nécessaire d'avoir plus de terrain car la longueur disponible est insuffisante pour tous les lits. Il est nécessaire d'acheter du foncier.

Deux solutions :

- Solution achat parcelle communale
- Solution parcelle privée

1) Solution achat parcelle communale



Localisation de la parcelle communale



Dimensionnement sur la parcelle disponible et la parcelle communale

2) Solution parcelle privée



Localisation parcelle privée



Dimensionnement sur la parcelle disponible et la parcelle privée

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s) : Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Spécialité : Exploitation / Travaux

Auteur

DAVIDAS Céline

Année

2020

Titre

Choix et dimensionnement d'une filière de traitement pérenne de boues liquides des stations d'épuration de Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier

Nombre de pages texte 60 annexes 33

Nombre de références bibliographiques 30

Structure d'accueil : Métropole Européenne de Lille

Maître de stage : Monsieur PYZAK Daniel

Résumé

Dans un contexte d'intégration de nouvelles communes à son territoire, la Métropole Européenne de Lille a repris à sa charge la gestion des stations d'épuration Radinghem-en-Weppes et Bois Grenier dont les filières de traitement des boues liquides ne correspondaient pas aux orientations de son schéma directeur.

Pour résoudre ce problème, elle a mis en place une solution de déshydratation de boues par unité mobile mais celle-ci s'avère coûteuse et le compostage prévu pour ces boues est confronté à des évolutions réglementaires.

L'objectif de l'étude est de déterminer et dimensionner une filière de traitement des boues pérenne pour ces stations d'épuration.

Mots-clés

Boues d'épuration urbaines – Assainissement collectif – Déshydratation de boues liquides – Lits de séchage plantés de roseaux – Mélange de boues – Filtre à bandes