

Université du Québec  
Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

# **TRAITEMENT DE STABILISATION ET DE CONDITIONNEMENT ÉLECTROLYTIQUE DES BOUES DE FOSSES SEPTIQUES**

Par  
Hayat El Amri

Mémoire pour l'obtention du grade de  
Maître ès science (M. Sc.)  
En sciences de l'eau

## **Jury d'évaluation**

Examineur interne et président de Jury	Professeur Tarek Rouissi INRS-ETE
Examineur externe	Professeure Dominique Claveau-Mallet École Polytechnique de Montréal
Directeur de recherche	Professeur Patrick Drogui INRS-ETE

# Remerciement

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Allah pour toutes ses bénédictions envers moi et ma famille. Que Dieu nous garde sur le droit chemin et accepte nos prières et bons gestes.

À mon directeur de thèse, le Dr. Patrick Drogui, qui m'a donné la chance de travailler avec lui et son équipe du laboratoire d'électro-technologies environnementales et procédés oxydatifs (LEEPO), pour son soutien continu, sa patience et ses conseils tout au long de mon parcours de recherche. Ses connaissances approfondies, son dévouement et sa perspicacité ont été d'une valeur inestimable pour l'achèvement de ce projet de recherche.

Je tiens à remercier le soutien du centre technologique des résidus industriels (CTRI), sans lequel cette recherche n'aurait pas été possible, et je suis redevable aux membres de l'équipe LEEPO qui ont volontiers partagé leur temps et leurs expériences au profit de cette recherche.

Enfin, je remercie sincèrement ma famille, pour leur amour indéfectible, leurs encouragements et leur confiance en mes capacités. Votre soutien émotionnel et moral a été le pilier de ma force.

# Résumé

La fosse septique est l'un des systèmes de traitement des eaux domestiques le plus utilisé pour les résidences isolées. Le système de fosse septique produit des boues et écumes et d'autres substances en raison de la sédimentation. Les boues de fosses septiques (BFS) ne sont pas toujours traitées efficacement d'un point de vue microbiologique en raison du manque des méthodes fiables de traitement de décontamination et de gestion de ces biosolides. Ce projet vise à traiter, conditionner et stabiliser les boues de fosses septiques par voie électrolytique. Ensuite les boues déshydratées pourront être réutilisées comme compost.

Les premiers tests avaient pour but de déterminer le polymère le plus performant permettant de majorer la siccité des boues. Par la suite, différentes conditions opératoires de traitement électrolytique (pH, type d'anode, concentration en électrolyte, intensité de courant et temps d'électrolyse) ont été imposées afin de déterminer les meilleures conditions de conditionnement et de stabilisation des BFS. L'application du traitement électrochimique a permis d'améliorer la filtrabilité des BFS.

Le processus implique une série d'étapes pour traiter les boues de fosses septiques au Québec, en commençant par leur caractérisation bio-physico-chimique. Des tests de déshydratation sont ensuite réalisés en utilisant de 1 à 6 kg/tbs de polymère cationique (Percol 789) ajouté aux boues brutes. Les boues sont acidifiées à un pH de 4 en utilisant de l'acide sulfurique 2N avant d'être soumises à une électro-oxydation dans un réacteur électrochimique de 500 mL, qui utilise une cathode en graphite et une anode en oxyde d'iridium.

Ensuite les boues traitées sont flocculées avec un polymère cationique à des concentrations comprises entre 1 et 6 kg/tbs, puis séparées par filtration sous vide en utilisant un filtre en crêpe avec une porosité de 25  $\mu\text{m}$ . L'optimisation du processus d'électro-oxydation, visant à maximiser la déshydratabilité des boues et à minimiser la consommation d'énergie, est réalisée en ajustant trois paramètres : le courant (0,2A à 1A), le temps d'électro-oxydation (10 à 40 minutes) et la quantité de polymère (1 à 5 kg/tbs).

Les meilleures conditions de conditionnement et de stabilisation électrochimiques des boues ont été enregistrées en imposant une intensité de courant de 0.22 A, un temps de traitement de 25 min

et une concentration de polymère de 02 kg/tbs (tonne de boue sèche). Des gains de siccité variant entre 21 et 26 points de siccité ont été enregistrés. Cette hausse de la siccité permet ainsi de réduire de 70 à 80 % la masse de boues générées.

La siccité des boues non traitées variait entre 5 % et 9%, alors que la siccité des boues traitées se situait entre 27% et 31%. Les essais de stabilisation électrochimique indiquent une élimination efficace des microorganismes indicateurs de la présence de pathogènes (coliformes totaux et fécaux). Un abattement allant jusqu'à 4 unités logarithmiques sur les coliformes fécaux a été enregistré.

Mots-clés : Boues de fosses septiques, électro-oxydation, désinfection, déshydratation.

# Abstract

Septic tank systems are the most used method for treating domestic wastewater from isolated residences. Present bacteria in septic tanks partially degrade the domestic effluent and with sedimentation the effluent is separated into three layers, from the top we have scum, clarified effluent and sludge. Septic tank sludge is generally untreated due to the lack of management and treatment methods.

This project aims to decontaminate and stabilize septic sludge using electrooxidation in the initial phase, followed by dewatering the treated sludge by adding a cationic polymer for flocculation then separating the solid and filtrate using a vacuum pump. This process of combining electrooxidation and dewatering should allow the elimination of organic and inorganic molecules that generate foul odors while improving the filterability of septic tank sludge. The dehydrated sludge can then be reused as compost or for soil amendment in agricultural areas.

The process starts with a bio-physicochemical characterization of septic sludge sampled at an eco-center in Quebec, CA. then control tests of dewatering the raw sludge by only adding quantities from 1kg/tds (ton dry sludge) to 6kg/tds of cationic polymer (Percol 789). Before electrooxidation the sludge is acidified to pH 4 using sulfuric acid 2N. A square shaped electrochemical reactor (500 mL of useful volume), with graphite cathode (surface of 110 cm<sup>2</sup>) and titanium coated with iridium oxide (Ti/IrO<sub>2</sub>, active surface of 65 cm<sup>2</sup>) meshed anode are used for the electrooxidation process. For dewatering, the sludge is flocculated with a cationic polymer (solution preparation 1g/L) at concentrations between 1 and 8 kg/tds then separated using a vacuum filtration unit including a Bruckner unit, vacuum pump and a 25µm fiber filter. three parameters were studied for the central composite design, the current was varied between 0.2A and 1A, the time of the electrooxidation between 10 min and 40 min and the polymer quantity between 1 kg/tds and 5kg/tds to maximize the dewaterability of the sludge and minimize the energy consumption.

The application of acidification and electrooxidation treatment has improved the dewaterability of the septic tank sludge. A dryness of 30% was recorded following the application of the electrochemical treatment, compared to a dryness of 2% obtained with untreated sludge, flocculated only (control test). This increase in dryness allows for mass reduction up to 80% of the sludge after separation. From a microbiological point of view (capacity to eliminate total and fecal

coliforms) this electrochemical process proved to eliminate bacteria while maintaining the fertilizing properties of the septic tank sludge.

Keywords: Septic sludge, Electrooxidation, Dewatering, disinfection.

# Table des matières

Remerciement .....	i
Résumé .....	ii
Abstract .....	iv
Table des matières.....	vi
Liste des figures .....	ix
Liste des tableaux.....	x
Introduction .....	1
1. Revue de littérature .....	3
1.1. Origine et caractéristiques des boues de fosses septiques .....	3
1.1.1. Origine des boues de fosses septiques .....	3
1.1.2. Composition des boues de fosses septiques .....	5
1.1.3. Récupération des BFS.....	8
1.2. Zone d'étude .....	10
1.2.1. Centres de traitement des boues de fosses septiques (BFS) en Abitibi-Témiscamingue.....	11
1.2.2. Problématique des BFS en Abitibi-Témiscamingue.....	12
1.3. Gestion actuelle des BFS .....	14
1.3.1. Réglementation sur la vidange des BFS.....	14
1.4. Traitement existant des boues de fosses septiques .....	15
1.4.1. Déshydratation et séparation .....	16
1.4.2. Traitement de désinfection .....	18
1.5. Traitement électrochimique d'oxydation avancée .....	21
1.5.1. Brevet ÉLEC-STAB .....	21
1.5.2. Traitement par électro-oxydation .....	22
1.6. Utilisation des BFS comme matière résiduelle fertilisante.....	24
1.6.1. Classification selon les contaminants chimiques (Catégorie C).....	24
1.6.2. Classification selon les Odeurs (Catégorie O).....	25
1.6.3. Teneur en corps étranger (Catégorie E) .....	26
1.6.4. Qualité et de désinfection des résidus (Catégorie P) .....	27
1.6.5. Utilisation des MRF selon la classification C-P-O-E .....	28

1.7.	Synthèse critique .....	29
2.	Hypothèses, Objectifs et Démarche Méthodologique.....	31
2.1.	Objectif .....	31
2.1.1.	Objectif principal .....	31
2.1.2.	Objectifs spécifiques .....	31
2.2.	Hypothèses .....	32
2.3.	Démarche expérimentale .....	33
3.	Matériels et méthodes .....	36
3.1.	Site d'échantillonnage et conservation des boues .....	36
3.2.	Méthode analytique .....	37
3.2.1.	Analyse des solides totaux .....	37
3.2.2.	Mesure du pH et de la conductivité .....	37
3.2.3.	Mesure de la siccité.....	38
3.2.4.	Mesure des métaux, cations et anions majeurs.....	38
3.2.5.	Analyse microbiologique .....	38
3.2.6.	Estimation de la consommation énergétique.....	39
3.3.	Méthode expérimentale .....	39
3.3.1.	Unité d'électro-oxydation .....	39
3.3.2.	Traitement des boues .....	40
3.3.3.	Floculation et séparation .....	42
3.3.4.	Réactifs et évaluation des coûts de traitement.....	43
4.	Résultats et discussion.....	44
4.1.	Caractérisation des boues de fosses septiques .....	44
4.2.	Tests préliminaires : effet des paramètres opératoires sur la siccité .....	46
4.2.1.	Type et concentration de polymère.....	46
4.2.2.	Type d'anodes et temps de traitement.....	47
4.2.3.	Conditions opératoires du processus de traitement par électro-oxydation.....	50
4.3.	Application des conditions optimales sur les boues de Rouyn Noranda et comparaison avec les boues de Portneuf.....	61
4.3.1.	Consommation et coûts des réactifs.....	61
4.3.2.	Métaux et éléments nutritif.....	63
4.3.3.	Microorganismes indicateurs de pathogènes.....	66
5.	Conclusion et recommandations.....	68



6. Références .....70

# Liste des figures

Figure 1-1 Représentation schématique d’une fosse septique (Ministère du développement durable de l’environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014).....	3
Figure 1-2 Région d'Abitibi Témiscamingue .....	10
Figure 1-3 Étapes de la vidange sélective, source :( Technologies Saint Laurant eaux usées 2003) .....	9
Figure 1-4 Traitements existants à échelle réelle, source : (Shukla, Patwa et al. 2022).....	15
Figure 1-5 Schéma du processus d'électro-oxydation d'un effluent.....	22
Figure 2-1 Démarche expérimentale.....	33
Figure 3-1 Dispositif d'électro-oxydation .....	39
Figure 3-2 Système de séparation des boues de fosses septiques après floculation .....	42
Figure 4-1 Évolution de la siccité en fonction du type et concentration des polymères sélectionnés.....	46
Figure 4-2 Influence de l'intensité de courant et le temps de traitement sur la siccité des BFS en utilisant l'anode $TiIrO_2$ , polymère Percol-789 avec concentration 5 kg/tbs .....	47
Figure 4-3 Influence de l'intensité de courant et le temps de traitement sur la siccité des BFS en utilisant l'anode en BDD .....	48
Figure 4-4 Formation de la mousse lors de l'électro-oxydation .....	50
Figure 4-5 Contribution des facteurs sur la réponse siccité .....	53
Figure 4-6 Contribution des facteurs sur la réponse consommation énergétique.....	54
Figure 4-7 Contribution des facteurs et interactions sur la siccité.....	56
Figure 4-8 Contribution des facteurs et interactions sur la consommation énergétique.....	57
Figure 4-9 Conditions optimales du processus de traitement des BFS.....	59

# Liste des tableaux

Tableau 1-1 Caractéristiques des boues de fosses septiques .....	5
Tableau 1-2 Caractéristiques des boues de fosses septiques .....	6
Tableau 1-3 Information générale sur l'Abitibi Témiscamingue .....	10
Tableau 1-4 Avantages et des inconvénients des différents procédés opérés à de basses températures (Benkaraache 2017).....	20
Tableau 1-5 Teneurs limites en contaminants chimiques (catégories C) sur la base de la matière sèche (Marc Hébert 2015) .....	25
Tableau 1-6 Catégories d'odeurs selon le type de MRF(Marc Hébert 2015) .....	26
Tableau 1-7 Catégories par défaut de certain MRF pour la teneur en corps étrangers (Marc Hébert 2015).....	27
Tableau 1-8 Critères de qualité et de désinfection des résidus relativement aux catégories P pour Biosolides municipaux, digestats de biométhanisation et résidus divers contaminés par matière fécale (Marc Hébert 2015).....	27
Tableau 1-9 Usages possibles des MRF, selon la classification des MRF(Marc Hébert 2015)....	29
Tableau 1-10 Avantage et inconvénient des méthodes conventionnelles de gestion des BFS .....	30
Tableau 2-1 Paramètres à mesurer et la méthode utilisée, source : centre d'expertise d'analyse environnementale de Québec (CEAEQ) .....	34
Tableau 3-1 Date et lieu des échantillons de BFS reçu.....	36
Tableau 3-2 Facteurs considérés dans le plan factoriel.....	40
Tableau 3-3 Réponses étudiées dans le plan factoriel.....	41
Tableau 4-1 Caractérisation physico-chimique des boues de fosses septiques échantillonnées ...	45
Tableau 4-2 Résultats de la turbidité et MES en fonction Conditions et anodes appliquées .....	49
Tableau 4-3 Plan factoriel des quatre facteurs principaux étudiés .....	51
Tableau 4-4 Calcul de contribution des facteurs principaux et interactions sur les réponses .....	52
Tableau 4-5 Plan factoriel à trois facteurs.....	55
Tableau 4-6 Facteurs considérés dans le plan factoriel à trois facteurs .....	55
Tableau 4-7 Contribution des facteurs principaux et interactions sur les réponses.....	56
Tableau 4-8 Résultats du plan composite central ainsi que l'évolution de la réduction de masse des boues après traitement.....	58

Tableau 4-9 Résultats de la siccité en fonction du changement de la concentration des solides totaux.....	60
Tableau 4-10 Essais de conditionnement et électrolytique des boues de fosses septiques de Rouyn Noranda Boue 2 et comparaison avec les boues de Portneuf Boue 1.....	61
Tableau 4-11 Calcul du coût total du processus de traitement et disposition des Boue-2 (Site de Portneuf).....	63
Tableau 4-12 Concentrations (mg/kg) de métaux dans la fraction solide des boues de fosses septiques (Rouyn Noranda) traitées et non traitées en appliquant les conditions optimales.....	64
Tableau 4-13 Concentrations (mg/L) des éléments nutritifs métaux dans la fraction liquide des BFS traitées et non traitées en appliquant les conditions optimales (Boue 3, Rouyn Noranda) ...	65
Tableau 4-14 Dénombrement des coliformes fécaux et totaux dans les boues non- traitées et traitées de deux échantillons dans la fraction solide des BFS ainsi que le pourcentage de désinfection (boues déshydratées) .....	66
Tableau 4-15 Dénombrement des coliformes fécaux et totaux dans la fraction liquide (obtenues après déshydratation) des Boues 3 non- traitées et traitées ainsi que le pourcentage de désinfection.....	66

# Introduction

En régions éloignées, l'isolement de certaines communautés limite souvent l'accès à des ouvrages de décontamination des eaux. Cette situation pose un ensemble distinct de défis et d'opportunités dans le domaine de l'assainissement. Au Québec-Canada, plus de 1 000 000 de résidences isolées, la vidange est obligatoire pour toute résidence ou bâtiment isolé dont le débit journalier d'eaux usées domestiques est au moins 3 240 litres par jour (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014) selon le règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées. Les fosses septiques sont souvent utilisées pour le traitement des eaux usées domestiques dans ces régions isolées (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014). Des biosolides sont générés pendant le traitement et doivent être gérés avec soin pour éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement. L'un de ces défis est le traitement et la gestion des boues septiques. En l'absence d'installations de traitement des eaux usées, les régions isolées sont confrontées au dilemme suivant : comment gérer efficacement l'accumulation des boues issues de fosses septiques de manière durable pour la santé publique et environnemental ?

Les boues septiques requièrent une attention particulière. Si elles sont mal gérées, elles peuvent devenir un vecteur potentiel de contamination des sources d'approvisionnement en eau potable et constituer une menace directe pour la santé des communautés isolées. À l'inverse, grâce à des méthodes de traitement innovantes et adaptées à chaque lieu, les boues septiques peuvent être transformées et passer d'un déchet en une ressource ayant des applications dans l'agriculture, la production d'énergie et bien d'autres domaines.

Compte tenu des contraintes géographiques, climatiques et logistiques propres à ces régions, il est essentiel d'identifier des solutions qui soient non seulement efficaces mais aussi réalisables (en considérant les ressources et l'accès limités).

Ce projet vise à décontaminer et à stabiliser les boues de fosses septiques à l'aide d'une technique d'oxydation électrochimique basée sur le brevet ELEC-STAB (Drogui et al. 2014). Cette approche technologique peut aisément s'intégrer dans les chaînes actuelles de traitement des boues d'épuration. Il permet d'améliorer grandement les caractéristiques de filtrabilité des boues (hausse

de la siccité des boues et de la capacité de filtration) tout en stabilisant efficacement les boues du point de vue microbiologique (destruction des germes pathogènes et élimination des odeurs).

Le premier chapitre traite de la littérature existante portant sur les méthodes actuelles de traitement des boues de fosses septiques. Ce chapitre présente également les méthodes électrochimiques d'oxydation qui se distinguent par leurs caractères non-polluants, économiques, automatisable et pouvant être opérées à des temps de traitement relativement réduits (Drogui, Blais et Mercier 2007). À partir de la revue de littérature, une démarche méthodologique a été élaboré concernant le développement de processus de traitement de désinfection et déshydratation des boues de fosses septiques, suivant un plan factoriel et une modélisation en utilisant le plan composite central. Les conditions optimales obtenues ont été appliquées sur les boues de fosses septiques de Rouyn-Noranda dont les résultats sont présentés au cinquième chapitre.

# 1. Revue de littérature

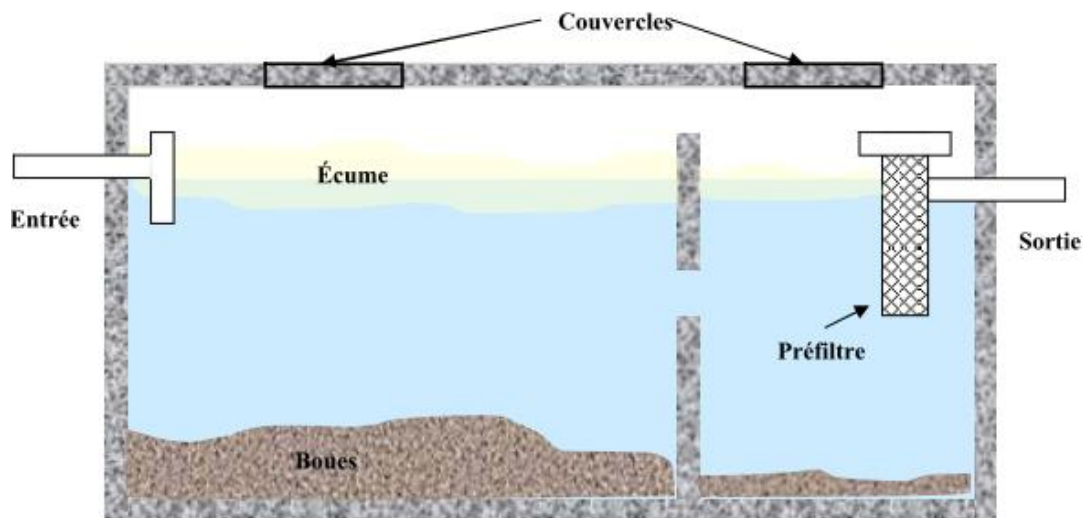
## 1.1. Origine et caractéristiques des boues de fosses septiques

### 1.1.1. Origine des boues de fosses septiques

Les eaux usées d'une résidence isolée qui n'est pas raccordée à un réseau d'égout sont traitées et évacuées par une installation septique autonome. L'installation septique fait intervenir les processus naturels pour traiter les eaux usées. L'installation septique traite et évacue les effluents vers le champs d'épuration (Corbeil 2010). Une installation septique possède habituellement deux composantes qui assurent la purification des eaux usées provenant des résidences qui est la fosse septique (traitement primaire) et l'élément épurateur (traitement secondaire) (Corbeil 2010).

Les boues des fosses septiques ou biosolides représentent le déchet produit par la fosse septique qui est un système de traitement des eaux usées domestique.

Les eaux usées domestiques vont vers la fosse septique en s'écoulant à travers la canalisation. La fosse septique est spécialement conçue pour retenir les eaux usées suffisamment longtemps (temps de rétention hydraulique s'élève à 48 heures (GRAY 1995)) pour permettre aux solides de sédimenter au fond (boues) comme le montre la Figure 1-1. Cette matière organique décantée représente les boues des fosses septiques après une décomposition partielle par les bactéries qui se trouvent dans la fosse septique.



**Figure 1-1 Représentation schématique d'une fosse septique (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014)**

Le système de fosse septique fait en sorte que les huiles et les graisses remontent à la surface (écume dans la Figure 1-1). Cette couche d'écume aide à conserver la fosse septique étanche et cela aide les bactéries anaérobies à effectuer un meilleur travail de décomposition des matières organiques (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014).



### 1.1.2. Composition des boues de fosses septiques

**Tableau 1-1 Caractéristiques des boues de fosses septiques**

Lieu	Température °C	pH	DBO <sub>5</sub> mg/L	ST <sup>(1)</sup> g/L	SV <sup>(2)</sup> mg/L	MES <sup>(3)</sup> mg/L	MVES <sup>(4)</sup> mg/L	CF <sup>(5)</sup> UFC/ 100 mL	CT <sup>(6)</sup> UFC /100 mL	Référence
Wardsville, Ontario-Canada	27	6.7	3637	31.3	18	39	22.2	-	-	(Lossing, Champagne and McLellan 2010)
Ferme Hawkestone, Canada	-	8.4	380	-	-	-	-	0.11x10 <sup>6</sup>	0.42x10 <sup>6</sup>	(Brandes 1978)
Hôpital Orillia house, Canada	-	-	15000	28.49	-	-	-	0.58x10 <sup>6</sup>	1.6x10 <sup>6</sup>	(Brandes 1978)
Station expérimentale Whitby, Canada	-	6.8	4900	27.07	-	-	-	0.6x10 <sup>6</sup>	16x10 <sup>6</sup>	(Brandes 1978)
Maison 1, Ontario Canada	-	-	-	42.92	-	1 300	30.725	-	1.2x10 <sup>4</sup>	(Kinsley, Crolla and Joy 2006)
Maison 2, Ontario Canada	-	6.63	-	-	-	3000	24.28	-	-	(Kinsley, Crolla and Joy 2006)

(1) Solides totaux

(2) Solides volatiles

(3) Matière en suspension

(4) Matière volatile en suspension

(5) Coliformes fécaux

(6) Coliformes totaux

**Tableau 1-2 Caractéristiques des boues de fosses septiques**

Lieu	N-NH <sub>3</sub> mg/L	NO <sub>3</sub> mg/L	TKN mg/L	Pt mg/L	Cl mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Référence
Wardsville, Ontario-Canada	203	<1	572	186	-	-	-	-	-	(Lossing, Champagne and McLellan 2010)
Hawkestone Farm, Canada	22	<1	170	18	57	6	53	20	22	(Brandes 1978)
Hôpital Orillia house, Canada	92	<1	650	160	83	36	82	28	82	(Brandes 1978)
Station expérimentale Whitby, Canada	26	<1	298	135	139	8	61	10	153	(Brandes 1978)
Maison 1, Ontario-Canada	-	-	-	-	66	75	163	-	911	(Kinsley, Crolla and Joy 2006)
Maison 2, Ontario-Canada	-	-	-	-	81	73	152	-	562	(Kinsley, Crolla and Joy 2006)

Comme le montre les tableaux 1-1 et 1-2, les boues de fosses septiques contiennent de la matière organique et inorganique. La composition des boues de fosses septiques peut varier en fonction de divers facteurs tels que la source des eaux usées, les habitudes d'utilisation et le temps écoulé depuis le dernier pompage. Les principaux composants présents dans les boues septiques sont :

- **L'eau** : Les boues septiques contiennent également de l'eau, bien qu'elle soit moins liquide que la couche d'effluents d'une fosse septique. La concentration en solide totaux est très élevée. D'après le tableau 1-1, elle peut aller jusqu'à 42 g/L.
- **Solides organiques**: Ils proviennent principalement des déchets humains, des restes de nourriture et d'autres matières biodégradables. Ce sont les principaux composants de la couche de boue.
- **Pathogènes** : Bien que le système de fosse septique soit un système de traitement biologique, les boues septiques contiennent une variété d'agents pathogènes, y compris des bactéries (*E. coli* et coliformes fécaux et totaux), des virus, des protozoaires et des parasites.
- **Huiles et graisses** : Avec le temps, les matières grasses peuvent s'accumuler à la surface du réservoir et former une couche d'écume. Elle constitue un composant important des eaux usées lorsque les fosses sont pompées.
- **Composés azotés** : Il peut s'agir d'ammoniac, de nitrates et de nitrites, qui proviennent principalement de la dégradation des protéines et de l'urée.
- **Phosphates** : Ils proviennent souvent des détergents et des déchets humains.
- **Métaux lourds** : Des métaux comme le zinc, le cuivre, le plomb et d'autres peuvent être présents, provenant de diverses sources domestiques (nourriture, médicament, produit cosmétique, etc.).
- **Contaminants chimiques** : Il peut s'agir de produits chimiques ménagers, de produits pharmaceutiques, de produits de soins personnels, etc. Leur concentration dépend en grande partie de ce qui est jeté dans les égouts.
- **Gaz** : La fosse septique est un système anaérobie fermé, donc au cours du processus de décomposition, des gaz tels que le méthane, le sulfure d'hydrogène, le dioxyde de carbone et d'autres sont produits.

### **1.1.3. Récupération des BFS**

La fosse septique a un volume limité. Elle doit être régulièrement vidée pour prévenir le transport de matières solides vers le système de drainage, ce qui pourrait le rendre. S'il n'y a pas de vidange après un certain moment les boues et les écumes sont déversées à l'extérieur de la fosse à l'air libre.

Il y a deux types de vidange, soit une vidange totale où la fosse est entièrement vidée. La vidange sélective, quant à elle, est un processus de nettoyage des fosses septiques qui implique l'utilisation d'un camion spécialisé équipé d'une chambre filtrante. Lors de ce processus, le contenu de la fosse est aspiré dans le camion, puis il passe à travers un filtre qui retient les matières solides et les débris. Le liquide filtré est ensuite réinjecté dans la fosse, tandis que les déchets solides sont conservés dans le camion pour être éliminés de manière appropriée.

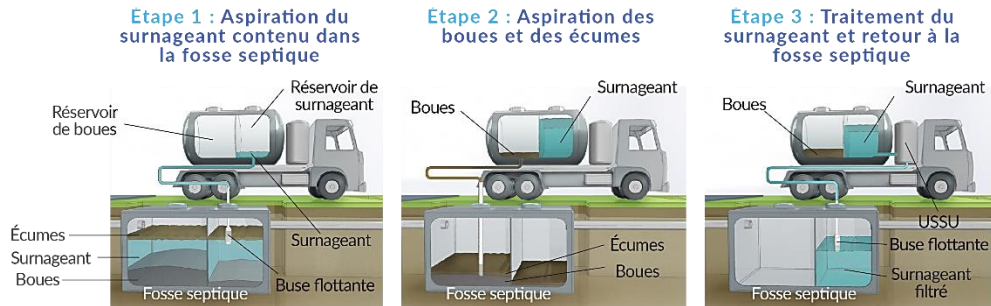
- **Vidange totale**

La vidange complète est simple, il suffit d'ouvrir le couvercle et de pomper l'entièreté de son contenu à l'aide d'un camion vacuum. Il faut ensuite disposer des eaux usées dans un site approuvé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

- **Vidange sélective**

La vidange sélective consiste à séparer les matières solides de la fosse et le liquide. Pour ce faire, le camion est équipé d'un réservoir à double chambre (Figure 1-3). La première chambre traite les liquides et les solides par un procédé physico-mécanique (principe de l'essorage d'une laveuse), tandis que la deuxième chambre emmagasine les solides.

Une seule fosse à la fois peut être traitée. Les solides sont emmagasinés dans un réservoir et se retrouvent isolés d'une vidange subséquente. Par conséquent, aucune matière ne peut être mélangée d'une vidange à l'autre.



**Figure 1-2 Étapes de la vidange sélective, source : ( Technologies Saint Laurant eaux usées 2003)**

Le liquide retourné à la fosse contient la même flore bactérienne qui permet de poursuivre la digestion des solides. Ce principe est recommandé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec.

« Le camion de vidange sélective sépare les boues solides de la fosse à 99,7 % et renvoie exclusivement le liquide ainsi filtré à l'intérieur de la fosse afin de conserver la flore bactérienne.

Cette vidange est la plus recommandée car :

- ✓ Le camion peut recueillir la fraction solide des boues issue de 8 à 10 fosses contrairement au camion-citerne standard qui recueille la fraction solide des boues de 4 à 5 fosses.
- ✓ L'empreinte carbone de ce camion est de 49 % à 54 % moins élevée qu'un camion-citerne standard, donc il entraîne une diminution des gaz à effet de serre.

## 1.2. Zone d'étude

La région de l'Abitibi-Témiscamingue (Figure 1-2), une des plus vastes régions du Québec, se situe à l'extrême ouest de la province.



**Figure 1-3 Région d'Abitibi Témiscamingue**

Le tableau 1-3 suivant regroupe les principales informations sur la région et qui sont le nombre d'habitants, la ville principale qui le plus grand nombre d'habitants, nombre total de municipalités et le nombre de municipalités régionales de comté (MRC).

**Tableau 1-3 Information générale sur l'Abitibi Témiscamingue**

<b>Population totale (2021)</b>	148 242 habitants
<b>Municipalités régionales de comté (MRC)</b>	5
<b>Municipalités</b>	79
<b>Ville principale</b>	Rouyn-Noranda
<b>Superficie</b>	57,736.50 km <sup>2</sup>

## **1.2.1. Centres de traitement des boues de fosses septiques (BFS) en Abitibi-**

### **Témiscamingue**

Malgré la grande superficie de la région d'Abitibi-Témiscamingue, celle-ci ne contient que deux sites de traitement des BFS.

- **Site de La Vallée-de-l'Or**

Le site de la MRC de La Vallée-de-l'Or est composé de six bassins de lagunage où les camions de vidange de fosses septiques peuvent décharger leur contenu. Les boues sont ensuite décantées dans ces lagunes, puis asséchées et valorisées notamment pour la réhabilitation de sites miniers.

Le site accueille les boues de la majorité des municipalités de l'Abitibi-Témiscamingue dont celles de l'ensemble des municipalités de la MRC d'Abitibi à l'exception de Launay et Trécesson. Notons qu'en moyenne 90 % des boues de fosses septiques vidangées sur le territoire de la MRC d'Abitibi sont traitées dans les installations de la MRC de La Vallée-de-l'Or.

Pour les boues provenant de l'extérieur de La Vallée-de-l'Or, un taux de 30,48 \$/tonne est chargé aux entrepreneurs (RMC de La-Vallée-de-l'Or 2015).

En revanche, avec la prise en charge par la ville de Val-d'Or de la vidange et du traitement des boues de fosses septiques sur son territoire à même des installations indépendantes de celles de la MRC de La Vallée-de-l'Or, nous pouvons considérer que le site de disposition des boues est en mesure de traiter un apport régional supplémentaire (RMC de La-Vallée-de-l'Or 2015). Il est important de souligner, ici, que seuls les entrepreneurs spécialisés en vidange des boues de fosses septiques ayant un permis d'accès sont autorisés à disposer de leur chargement sur le site.

Depuis 2010, le centre de Val d'Or utilise les Géotubes® pour déshydrater les boues des fosses septiques. Cela a permis une diminution de volume de 80% (MRC de la Vallée de l'Or 2015). Cette technologie consiste à mélanger les boues des fosses septiques à un polymère, puis mis dans sac poreux pour séchage à l'air libre. Les boues solides sont ensuite épandues sur les parcs à résidus miniers des anciennes mines (MRC de la Vallée de l'Or 2015).

- **Site d’Abitibi-Ouest**

La MRC d’Abitibi-Ouest est propriétaire d’un camion-citerne/vacuum et d’un site de disposition des boues de fosses septiques. Elle offre le service de collecte et traitement des boues de fosses septiques à l’ensemble des municipalités du territoire de la MRC d’Abitibi-Ouest et à certaines autres municipalités, dont celles de Launay et Trécesson.

Le service s’adresse également aux industries, commerces et institutions. En moyenne, la MRC d’Abitibi-Ouest traite 10 % des boues de fosses septiques du territoire d’application. Situé à Palmarolle, le site a été autorisé par le ministère de l’Environnement en 1990. Il est constitué de trois bassins de déshydratation (des lagunes en sable) dont le fond est recouvert d’un mètre de bran de scie. La capacité totale est de 7180 m<sup>3</sup> et aucune information n’est actuellement disponible sur la capacité résiduelle. Seules les boues de fosses septiques transportées par la MRC d’Abitibi-Ouest y sont déversées (MRC d’Abitibi 2016-2020).

Les résidus solides des BFS après déshydratation par lagunage, sont utilisées à l’implantation d’un couvert végétal sur les digues sablonneuses du site et à amender le sol de projets expérimentaux de plantation de peuplier hybride et de pin gris. Pour les années 2015 à 2017, la MRC d’Abitibi-Ouest a mandaté Multitech Environnement pour la valorisation des boues déshydratées (MRC d’Abitibi 2016-2020).

D’après le rapport sur les eaux en Abitibi, la rivière Dagenais qui se trouve près du centre de réception des boues à Palmarolle a une qualité très mauvaise (Organisme de bassin versant Abitibi-Jamésie 2020). Concernant l’état de santé de la rivière, elle est hypereutrophe en 2021. Durant la même année un taux de 188 µg/l de phosphore total a été noté (Organisme de bassin versant Abitibi-Jamésie 2020) dans la rivière Dagenais.

### **1.2.2. Problématique des BFS en Abitibi-Témiscamingue**

Le rapport d’état de situation sur la gestion des boues de fosses septiques (Ministère du développement durable de l’environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014), fait mention que seulement 13% des municipalités de la région d’Abitibi-Témiscamingue prennent en charge la vidange des fosses de septiques. Lorsque la vidange est sous la responsabilité du citoyen, dans 69 % des cas le lieu de disposition des boues des fosses septiques vidangées est



inconnu. Contre 6 % lorsque la vidange est prise en charge par une municipalité, MRC ou régie (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014). Il est de la responsabilité du citoyen d'avoir une installation septique conforme, bien entretenue et fonctionnelle en tout temps. Sinon le système de traitement menace la santé des lacs, rivières et eaux souterraines. Parmi les signes de dysfonctionnement lié à la négligence des systèmes de fosses septiques, on peut trouver :

- Une odeur d'égout se dégage des conduites et des fossés;
- Un liquide gris ou noir apparaît à la surface de votre terrain;
- Des traces de débordement sont visibles autour des couvercles de la fosse septique ;
- L'analyse de votre eau de puits ou de celui de votre voisin révèle une contamination bactérienne.

- **Contamination des eaux**

D'après le rapport sur l'état des eaux de surface et des puits résidentiels en Abitibi 2020 (Organisme de bassin versant Abitibi-Jamésie 2020), la qualité des eaux de surface et des puits résidentiels en Abitibi n'est pas conforme aux normes. En ce qui concerne les eaux provenant des puits résidentiels, il convient à noter que plus de 70% de la population d'Abitibi Témiscamingue se fournit en eau potable depuis l'eau souterraine. Le rapport montre qu'en Abitibi « *49% des puits individuels sont non conformes à au moins un paramètre. Les contaminants les plus problématiques sont : les coliformes totaux (29%), le manganèse (70%) et l'arsenic (16%)* ». La contamination par les métaux est due à l'activité minière dans la région. La contamination par les coliformes totaux est causée par les rejets des eaux usées non traités.

- **Transport et traitement des BFS**

Dans la région d'Abitibi Témiscamingue seul 13% du coût de la vidange est pris en charge par la municipalité (Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques 2014). Le rapport stipule que les résultats de l'enquête montrent que lorsque les citoyens charger d'organiser la vidange, seuls 30 % des répondants municipaux savent où sont disposées les boues. Aussi, seuls 37% des habitants ont effectué un relevé sanitaire de la fosse septique.

- **Gaz à effet de serre**

Seuls deux centres de traitement des boues des fosses septiques fonctionnent à pleine capacité dans cette région, à savoir celui d'Abitibi-Ouest et celui de Val-d'Or. En conséquence, les BFS doivent être transportées sur de longues distances, engendrant ainsi encore plus d'émission de CO<sub>2</sub> et de méthane, un gaz à effet de serre 25 fois plus puissant. La situation est d'autant plus problématique lorsque l'on considère que ces deux centres doivent desservir une superficie de 57 736 kilomètres carrés. Le transport des boues entre le Témiscamingue et la Vallée-de-l'Or, par exemple, aggrave source d'émission de gaz à effet de serre (GES)<sup>1</sup>.

### **1.3. Gestion actuelle des BFS**

#### **1.3.1. Réglementation sur la vidange des BFS**

Autre que la réglementation sur la vidange, il y a aussi la gestion des boues. D'après la réglementation sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées 2018) : « *Gestion des boues et autres résidus : Les boues et les autres résidus provenant de l'accumulation ou du traitement des eaux usées domestiques, des eaux ménagères ou des eaux de cabinet d'aisances doivent faire l'objet d'un traitement, d'un recyclage, d'une valorisation ou d'une élimination conforme à la Loi.* ». En ce qui concerne la valorisation conforme à la Loi, la section 2.5.1 traite les critères d'utilisation des boues de fosses septiques comme matière résiduelle fertilisante.

L'entretien des fosses septiques est de juridiction provinciale et le MELCC (selon le Q-2, R.22 anciennement Q-2, R.8) oblige à ce que les fosses septiques soient vidangées tous les 2 ans au Québec (à l'exception des résidences secondaires qui peuvent être tous les 4 ans)(Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées 2018).

- **Q-2, R.22**

Le règlement Q-2, R.22 porte sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées. En ce qui concerne la vidange, les dispositions suivantes sont citées :

---

<sup>1</sup>Un projet pour lutter contre les GES des fosses septiques, Journal « le citoyen » Rouyn-Noranda Abitibi-Ouest, 25/06/2021

« Une fosse septique visée au deuxième alinéa de l'article 9.1, à l'article 10 ou à l'article 11 qui est utilisée d'une façon saisonnière doit être vidangée au moins une fois tous les 4 ans.

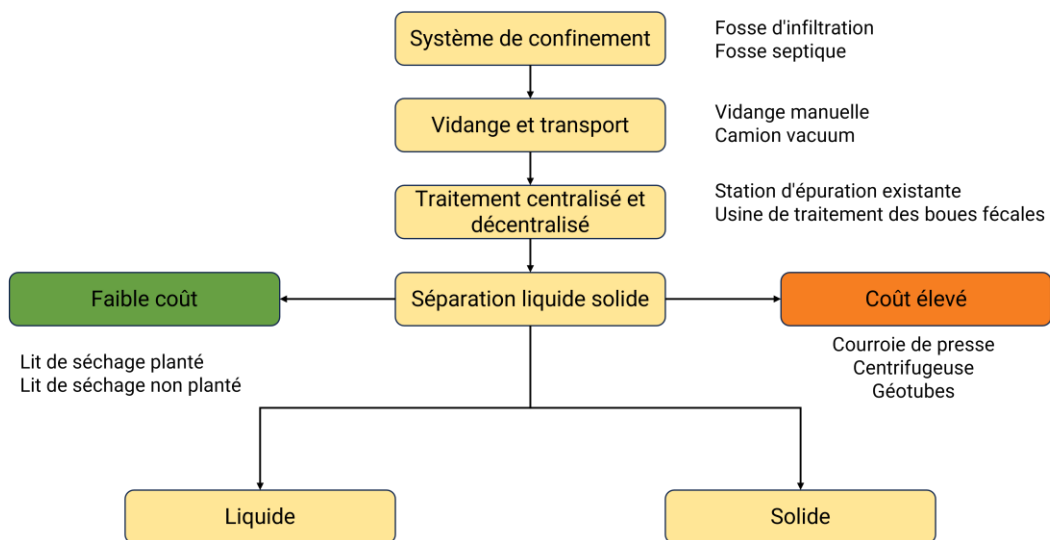
Une fosse septique visée au deuxième alinéa de l'article 9.1, à l'article 10 ou à l'article 11 qui est utilisée à longueur d'année doit être vidangée au moins une fois tous les 2 ans.

Toutefois, dans le cas où une municipalité pourvoit à la vidange des fosses septiques, une fosse septique peut être vidangée soit conformément aux dispositions des premier et deuxième alinéas, soit selon le mesurage de l'écume et des boues.

Dans ce dernier cas, une fosse septique doit être vidangée lorsque l'épaisseur de la couche d'écume est égale ou supérieure à 12 cm ou que l'épaisseur de la couche de boues est égale ou supérieure à 30 cm. » Son utilisation engendre des économies d'eau potable en raison de la recommandation de remplir les fosses septiques après les avoir vidangées afin d'assurer un fonctionnement optimal et d'éviter l'affaissement ou le soulèvement de celles-ci. »<sup>2</sup>

En ce qui concerne les prix de vidange, il n'y a pas de différence de prix entre vidange totale ou sélective, mais les prix peuvent varier d'une municipalité à une autre.

#### 1.4. Traitement existant des boues de fosses septiques



**Figure 1-4 Traitements existants à échelle réelle, source : (Shukla, Patwa et al. 2022)**

La figure 1-4 résume les procédés de séparations ainsi que les méthodes de traitements du filtrat et des boues sèches utilisés à échelle réelle pour la séparation des boues de fosse septique.

<sup>2</sup> Dépliant informatif sur les fosses septiques de la MRC de Charlevoix-Est, mars 2014

### **1.4.1. Déshydratation et séparation**

- **Centrifugation**

La centrifugation est une méthode de déshydratation mécanique couramment utilisée dans le traitement des boues des grandes stations d'épuration. Elle est versatile et peut épaissir ou déshydrater les boues en modulant les conditions opératoires. Cependant, il est difficile d'ajuster graduellement la vitesse appropriée pour éviter le cisaillement des floccs issus du processus de floculation des boues dans une centrifugeuse (Singh, Mohan et al. 2017).

Cette technique exploite la force centrifuge pour sécher les solides en les poussant vers la périphérie d'un cylindre rotatif horizontal. Lorsque les boues floculées sont introduites dans ce cylindre, la force centrifuge les propulse contre la paroi (Strande et al. 2014). L'efficacité du processus dépend des caractéristiques des boues (indice de volume et capacité de rétention d'eau) ainsi que de la vitesse de rotation du bol centrifuge.

Bien que la centrifugation nécessite peu d'espace au sol, elle requiert des opérateurs compétents. Ses inconvénients majeurs comprennent une consommation d'énergie accrue, des frais d'entretien plus élevés et des nuisances sonores.

- **Lagunage**

Le lagunage est une méthode d'épuration qui permet la stabilisation des boues dans des fossés d'oxydation, soit artificiels ou naturels. Il est classé en plusieurs types, notamment le lagunage aérobique (pour l'épuration biologique des eaux résiduaires pré-épurrées mécaniquement), le lagunage facultatif et le lagunage anaérobique (visant à réduire les substances organiques des eaux résiduaires brutes ou clarifiées) (Régie Intermunicipale Argenteuil Deux-Montagnes 2003).

Pour mettre en place cette technique, il est nécessaire de :

- ✓ Construire au moins un étang d'une profondeur d'au moins 1,5 m.
- ✓ Avoir au minimum deux cellules et des déversoirs ajustables.
- ✓ Assurer une accessibilité pour l'entretien et une capacité d'entreposage allant à cinq ans.
- ✓ Utiliser des matériaux imperméables pour éviter les infiltrations.
- ✓ Positionner les étangs à plus de 150 m des résidences et aménager des fossés de dérivation autour pour éviter les débordements.

Les avantages du lagunage incluent ses coûts réduits, ce qui en fait une option économique pour traiter divers types de déchets (résidentiels, municipaux, industriels, agricoles). Toutefois, il nécessite de grands volumes d'espace (Shukla, Patwa et al. 2022).

- **Géobags**

Les géobags sont des outils efficaces pour la déshydratation des boues humides. Avant leur épandage, les boues extraites des géobags doivent être compostées pour garantir leur qualité. De plus, ces boues doivent être séchées au soleil pour éliminer les pathogènes et helminthes avant le compostage (Singh, Mohan et al. 2017).

Conçus à partir de textiles perméables, les géotubes servent à déshydrater les boues et les sédiments. Cette méthode, à la fois innovante et économique, se distingue par sa passivité, nécessitant peu de main-d'œuvre et d'entretien d'équipement. Sa rapidité est également un avantage en comparaison avec les lits de séchage et le lagunage, capable d'augmenter la teneur en solides à environ 22-27% en un temps réduit selon le type du géotextile utilisé (entre 4 et 26 jours) (Fowler et al., 1996).

Requérant un équipement minimal, notamment une pompe pour le remplissage des boues, cette technologie est économiquement avantageuse. Elle peut opérer continuellement, 24 heures sur 7 jours, avec une main-d'œuvre restreinte.

- **Lits de séchage**

Le rôle des lits de séchage plantés et non plantés dans la gestion des boues de vidange est de faciliter le processus de déshydratation et de séchage des boues. Les deux types de lits de séchage sont couramment utilisés dans les pays en développement pour le traitement des boues de vidange (Shukla, Patwa et al. 2022).

Les lits de séchage plantés impliquent l'utilisation de végétation, telle que des roseaux ou de l'herbe, qui contribue au processus de déshydratation en absorbant l'humidité des boues. Les plantes contribuent également à la décomposition de la matière organique contenue dans les boues grâce à l'activité microbienne. Les lits de séchage plantés sont efficaces pour réduire le volume des boues et produire un produit partiellement stabilisé.

En revanche, les lits de séchage non plantés n'impliquent pas l'utilisation de végétation. Ils s'appuient uniquement sur les processus naturels d'évaporation et de drainage pour éliminer l'humidité des boues. Les lits de séchage non plantés sont plus simples à concevoir et à utiliser que les lits de séchage plantés, mais ils peuvent nécessiter un temps de séchage plus long (Shukla, Patwa et al. 2022).

Les deux types de lits de séchage ont leurs avantages et leurs limites. Les lits de séchage plantés sont plus efficaces en termes de déshydratation et de stabilisation, mais ils nécessitent plus d'entretien et de soins. Les lits de séchage non plantés sont plus simples à construire et à exploiter, mais leur efficacité en termes de déshydratation peut être moindre (Singh, Mohan et al. 2017).

En résumé, les lits de séchage plantés et non plantés jouent un rôle crucial dans la gestion des boues de vidange en facilitant le processus de déshydratation et de séchage, en réduisant le volume des boues et en stabilisant partiellement les boues.

#### **1.4.2. Traitement de désinfection**

- **Four solaire**

Le séchage thermique vise à éliminer l'eau contenue dans les boues par évaporation. En utilisant un séchage à haute température, il est possible d'atteindre une teneur en matière sèche jusqu'à 95%, résultant en un produit sous forme granulaire ou en poudre (Mathioudakis et al. 2013).

Généralement, le four solaire à boue est une structure isolée inclinée à 45 degrés, dotée d'un revêtement en verre. Lorsqu'il est sous l'effet du soleil, il peut atteindre des températures internes allant à 180°C (Singh, Mohan et al. 2017).

Pour le traitement des boues, ces fours sont construits en briques et ciment. Ils sont couverts par des plaques de toiture transparentes et amovibles, puis fermés une fois remplis de boues. Le processus de séchage dure plusieurs mois, en fonction de l'isolation.

À la suite de ce séchage, les boues traitées sont assainies, prêtes à être enfouies ou utilisées comme améliorants pour la fertilité du sol des vergers alentour. Grâce à ce dispositif, la contamination biologique du sol par les boues est grandement réduite. Bien que cette technologie soit facile d'utilisation et produise des boues hygiéniques, sa capacité de traitement est modeste (12 m<sup>3</sup> en 8

mois) et son coût est supérieur à celui des fosses d'enfouissement traditionnelles, ce qui est un inconvénient.

Le séchage solaire a permis un abattement des coliformes jusqu'à trois unités logarithmiques et deux unités logarithmiques pour les Enterococcus, dépendant de la saison (Mathioudakis et al. 2013).

- **Traitement alcalin**

Le processus de traitement alcalin stabilise les boues, liquides ou semi-solides, par l'introduction de chaux. Pour une désinfection efficace, le pH des boues est ajusté à 12 pour une période minimale de 12 heures jusqu'à 24 heures (Singh, Mohan et al. 2017).

Cette méthode est attrayante en raison du coût abordable de la chaux et de ses effets positifs sur la consistance des boues grâce à son alcalinité. Néanmoins, ce procédé ne diminue pas la quantité de matière organique biodégradable dans les boues, ce qui peut entraîner une reprise de fermentation si les conditions ultérieures le favorisent (Singh, Mohan et al. 2017). L'introduction de la chaux accroît également le poids des boues. Ce traitement peut réduire respectivement jusqu'à 6 et 5 logs de coliformes fécaux et de Salmonella et jusqu'à 94 % des œufs d'helminthes viables (Mendez, Jimenez et al. 2002).

- **Traitement par oxydation humide assistée par plasma (OHAP)**

Ce procédé est conçu pour oxyder diverses boues, incluant celles d'origine municipale, industrielle et agroalimentaire, grâce à un four rotatif muni d'un générateur plasma chauffant jusqu'à 600°C (Ted Mulhern et al. 2006).

L'oxydation des boues assistée par plasma est une méthode de traitement des boues qui utilise un panache de plasma pour catalyser l'oxydation des boues humides à des températures relativement basses (230°C) et à forte teneur en eau. L'OHAP offre plusieurs avantages, notamment une réduction économique du volume des boues, de faibles coûts d'exploitation, des produits inertes, une réduction significative des gaz à effet de serre et la possibilité de générer de la chaleur utile à partir des boues (Ted Mulhern et al. 2006). Il peut être utilisé pour l'oxydation de diverses boues organiques provenant de sources municipales, agricoles et industrielles. Le procédé ne nécessite pas une déshydratation ou un séchage complet des boues, ce qui en fait un traitement

complémentaire aux méthodes de déshydratation mécanique. L'efficacité du OHAP a été démontrée lors d'essais en laboratoire et à plus grande échelle (Ted Mulhern et al. 2006).

Les coûts totaux, combinant investissement, capital et opération, sont moins onéreux que ceux de l'incinération. Les frais liés à l'achat et à l'exploitation du four sont également compétitifs par rapport à l'épandage et l'enfouissement traditionnels. L'OHAP a un taux d'élimination des pathogène de 100% (Ted Mulhern et al. 2006).

Dans son mémoire de Maîtrise sur l'étude d'une filière technologique d'épuration des eaux usées domestiques pour les collectivités en milieu nordique (Cas du village de Salluit), A. Benkaraache (Benkaraache 2017) présente les traitements déjà en usage en milieu nordique ou pouvant être applicables aux conditions nordiques extrêmes pour le traitement des eaux usées domestiques. Le tableau 1-4 suivant regroupe quelques avantages et inconvénients des procédés utilisés à basse température.

**Tableau 1-4 Avantages et des inconvénients des différents procédés opérés à de basses températures (Benkaraache 2017)**

Procédé	Avantages	Inconvénients
Lagunes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facile à opérer</li> <li>• Très faibles coûts d'exploitation</li> <li>• Permet le stockage de volumes d'eau importants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande production de boues, surtout en hiver</li> <li>• Ne permet pas d'obtenir une élimination significative des nutriments</li> <li>• Nécessite beaucoup d'espace</li> </ul>
Marécages naturels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facile à opérer</li> <li>• Très faibles coûts d'exploitation</li> <li>• Permet d'améliorer la qualité de l'effluent issu des lagunes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite une grande surface</li> <li>• Indisponibilité de données relatives au procédé (hydrologie, porosité, sol, profondeur, etc.)</li> <li>• Milieu favorable pour les plantes invasives</li> </ul>
Biofiltration conventionnelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité du matériel filtrant</li> <li>• Bonne élimination des bactéries</li> <li>• Facile à opérer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessite un lavage périodique</li> <li>• Sensibilité importante à la température</li> </ul>
Biofiltration avancée (MBBR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Système très compact</li> <li>• Bonne capacité d'élimination de la matière organique et de nitrification</li> <li>• Facile à opérer</li> <li>• Faible perte de charge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune élimination de phosphore</li> <li>• Diminution du rendement avec la diminution de la température</li> <li>• Coûts d'aération élevés</li> </ul>



## **1.5. Traitement électrochimique d'oxydation avancée**

### **1.5.1. Brevet ÉLEC-STAB**

Dans le cadre de l'entente de ce projet de recherche avec le CTRI (Centre Technologique Des Résidus Industriels), il a été mentionné que le procédé ÉLEC-STAB devrait être adapté pour le traitement des boues de fosses septiques. Le procédé ÉLEC-STAB est une invention d'un procédé électrochimique de conditionnement et de stabilisation des boues d'épuration municipales et industrielles. Ce procédé a pour objectif de réduire efficacement les bactéries pathogènes et les odeurs, tout en améliorant la déshydratation des boues (Drogué et al. 2014).

Tout d'abord, un acide inorganique est ajouté aux boues pour générer une boue acidifiée ( $3.5 < \text{pH} < 5.0$ ). Ensuite cette dernière est mise dans une cellule électrolytique ayant des électrodes anodiques et cathodiques. L'oxydation anodique des certains ions (tels que les ions chlorures) initialement présents (ou ajoutés) dans les boues permet de générer un agent bactéricide ( $\text{HClO}$ , acide hypochloreux) utilisé pour la désinfection des boues. Lors de l'électrolyse, une densité de courant anodique se situant entre 1.2 et 8.8  $\text{A}/\text{dm}^2$  est appliquée). La durée de la réaction électrochimique se situe généralement entre 10 et 120 min (Drogué et al. 2014). L'électrolyse est effectuée sans apport extérieur de chaleur, la réaction électrochimique étant elle-même exothermique. Une augmentation de la température conduit à une transformation de la structure physique des boues, laquelle induit une diminution de l'hydrophilie particulière, ce qui est favorable à une meilleure déshydratation des boues.

Dans son article sur l'utilisation de l'électrooxydation pour le traitement des boues municipales et les boues des usines de papeteries (Drogué, Bureau et al. 2013), les expériences réalisées à l'aide des boues de papeteries ont montré que l'oxydation électrochimique était efficace pour augmenter la siccité des boues (moyenne  $25.3 \pm 1.2$  %). Cela a permis de réduire environ 21.2 % le poids des boues. Aussi, cette méthode s'est avérée efficace pour éliminer les indicateurs pathogènes, réduction de 4 à 5 unités logarithmiques des coliformes totaux et fécaux dans boues que ce soit municipal ou d'usine de papeteries.

### 1.5.2. Traitement par électro-oxydation

L'électro-oxydation (EO) est un processus dans lequel un courant électrique est appliqué pour dégrader les polluants. Dans le cadre du traitement des boues, l'EO est utilisée pour traiter et stabiliser les boues.

- **Électro-oxydation directe**

Dans l'électro-oxydation directe, les composants des boues sont oxydés directement à la surface de l'anode. Lorsque les contaminants organiques et inorganiques présents dans les boues s'approchent de l'anode, ils subissent des réactions d'oxydation (figure 1-5) (Cheng, Singh et al. 2012). Les matières organiques contenues dans les boues peuvent être directement oxydées en dioxyde de carbone et en eau, tandis que l'ammoniac peut être converti en azote. Les agents pathogènes sont également inactivés au cours de ce processus. L'oxydation des polluants s'effectue à la surface des électrodes. Il y a un effet direct sur les polluants en solution lorsque l'échange d'ions s'effectue exclusivement sur l'électrode (Cheng, Singh et al. 2012).

L'efficacité de l'électro-oxydation directe dépend en grande partie du matériau utilisé comme électrode anodique. Les matériaux d'anode couramment utilisés comprennent le titane recouvert d'oxydes métalliques tels que l'oxyde de ruthénium ou l'oxyde d'iridium (Kruthika, Karthika et al. 2013).

L'EO directe permet d'atteindre des niveaux élevés d'oxydation et constitue un moyen efficace de désinfecter les boues. Comme elle ne fait pas appel à des additifs chimiques, elle ne risque pas d'introduire des polluants secondaires.

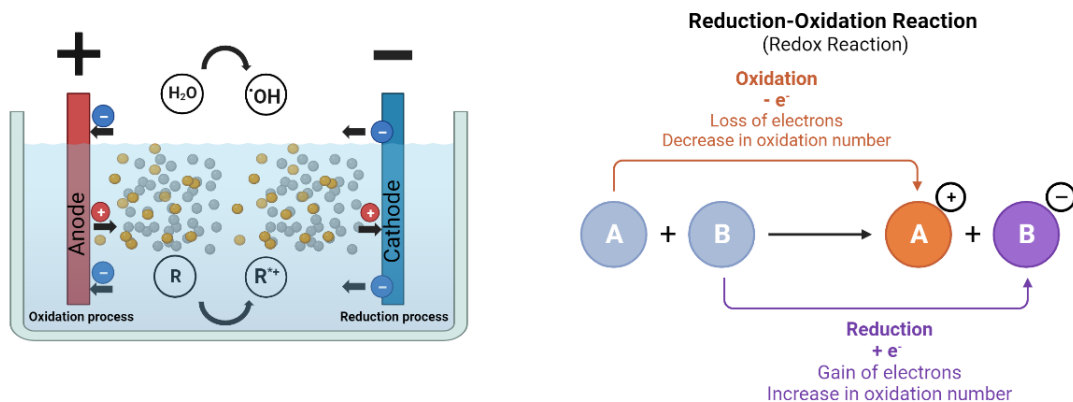


Figure 1-5 Schéma du processus d'électro-oxydation d'un effluent

Les molécules organiques sont détruites par l'action des radicaux  $\bullet\text{OH}$  générés à la surface des électrodes. Lorsque l'eau est oxydée à l'anode, elle produit des radicaux hydroxyles ( $-\text{OH}$ ). Ces radicaux peuvent réagir avec une large gamme de polluants présents dans les boues, les décomposant en substances plus simples et moins nocives (Kruthika, Karthika et al. 2013).

Le radical hydroxyle peut réagir avec la matière comme l'indique la réaction.

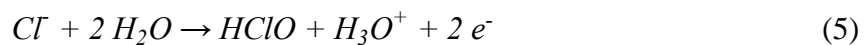
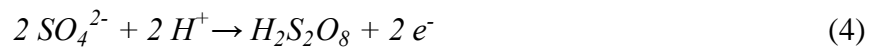


L'un des principaux atouts du traitement électrochimique est la production du radical hydroxyle, qui interagit avec les contaminants organiques dans les boues. Le radical organique peut s'associer à l'oxygène ou à un radical hydroxyle pour engendrer des produits oxydés, comme l'illustre la réaction.



- **Électro-oxydation indirecte**

Dans ce processus, les contaminants contenus dans les boues ne sont pas directement oxydés à l'anode. Des oxydants sont produits par voie électrochimique dans l'électrolyte. Ces oxydants réagissent par la suite avec les polluants en solutions. En présence d'ions sulfates et d'ions chlorures, ceux-ci peuvent être oxydés à l'anode et formés respectivement l'acide persulfurique ( $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) et l'acide hypochloreux ( $\text{HClO}$ ) (Daghrir, Drogui et al. 2014).



L'efficacité de l'EO indirecte dépend des conditions qui favorisent la génération de radicaux et d'autres espèces oxydantes.

Dans le traitement des boues, l'objectif est de réduire le volume des boues, de les désinfecter et de les stabiliser afin de réduire leur impact sur l'environnement. L'électro-oxydation directe et l'électro-oxydation indirecte offrent toutes deux des méthodes sans produits chimiques pour atteindre cet objectif.

## 1.6. Utilisation des BFS comme matière résiduelle fertilisante

Dans un contexte de compostage, selon les lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage, les matières de l'amas en compostage doivent avoir une siccité égale ou supérieure à 30 % en tout temps.

En se basant sur les critères de référence et normes réglementaires du guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes, pour être considéré comme matière résiduelle fertilisante un résidu solide doit avoir un minimum de 25 % de siccité.

En supposant que les boues de fosses septiques ont une siccité supérieur à 25%, ils peuvent être utilisées comme matière résiduelle fertilisante. Pour ce faire, ils doivent répondre à des critères qui sont mentionnés dans le guide de gestion des matières résiduelles fertilisantes (Marc Hébert 2015) :

- *Ils doivent contenir moins de 125 000 mg Al + 0,5 Fe/kg (b.s.), ou sinon contenir plus de 25 % de matière organique (base sèche) et moins de 150 000 mg (Al + 0,5 Fe)/kg (b.s.).*
- *Conformité à la classification selon le type d'utilisation, la classification est selon la teneur en contaminants chimiques (catégories C), en agents pathogènes (catégories P), selon ses caractéristiques d'odeurs (catégories O) et la teneur en corps étrangers (catégories E). C'est ce qu'on appelle la classification C-P-O-E.*

### 1.6.1. Classification selon les contaminants chimiques (Catégorie C)

Le tableau 1-5 suivant regroupe les valeurs limites de la teneur en contaminant chimique pour chacun des métaux, des éléments traces inorganique, ainsi que des composés traces organiques, comme les dioxines et les furannes et les pesticides. Les teneurs limites de chaque catégorie diffèrent d'un contaminant à un autre.

Les choix des paramètres analysés et des critères numériques présentés dans le tableau 4 proviennent principalement des normes du BNQ sur les composts et sur les biosolides municipaux (Marc Hébert 2015) .

Même si l'azote et phosphore sont des éléments chimiques, ils n'ont pas été pris en charge pour l'établissement de cette catégorisation.

**Tableau 1-5 Teneurs limites en contaminants chimiques (catégories C) sur la base de la matière sèche (Marc Hébert 2015)**

Contaminants	Teneurs limites (mg/kg m.s.)	
	Catégorie C1	Catégorie C2
	Oligo-éléments	
Arsenic (As)	13	41
Cobalt (Co)	34	150
Chrome (Cr)	210	1000
Cuivre (Cu)	400	1000
Molybdène (Mo)	10	20
Nickel (Ni)	62	180
Sélénium (Se)	2	14
Zinc (Zn)	700	1850
	Contaminants stricts	
Cadmium (Cd)	3	10
Mercure (Hg)	0.8	4
Plomb (Pb)	120	300
Dioxines et furannes	17	50

### **1.6.2. Classification selon les Odeurs (Catégorie O)**

Le tableau 1-6 donne un aperçu sur la classification des odeurs. Vu l'intensité des odeurs qui peut changer selon le temps, température, etc., cette classification peut être remplacé par test d'olfactométrie ou par flairage.

**Tableau 1-6 Catégories d'odeurs selon le type de MRF (Marc Hébert 2015)**

Catégorie	Description	Exemple
O1	Peu ou pas odorant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biosolides papetiers et résidus de désencrage à C/N <math>\geq 70</math> ;</li> <li>• Résidus de désencrage chaulant (primaires ou mixtes) ayant un pouvoir neutralisant supérieur ou égal à 30 % (b.s.) et une siccité supérieure ou égale à 40 % en tout temps ;</li> <li>• Biosolides municipaux ou papetiers – étangs vidangés depuis <math>\geq 4</math> ans (période entre la dernière vidange, totale ou partielle, et la nouvelle vidange incluant, le cas échéant, la période de stockage des boues en lit de séchage ou en sacs de déshydratation) ;</li> <li>• Biosolides municipaux séchés provenant uniquement d'un procédé de digestion anaérobie</li> </ul>
O2	Malodorant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biosolides municipaux ou papetiers – étangs non vidangés depuis <math>&lt; 4</math> ans (période entre la dernière vidange, totale ou partielle, et la nouvelle) ;</li> <li>• Digestats divers provenant de digesteurs anaérobies (biométhanisation) et non déshydratés à l'aide de centrifugeuses à haute vitesse ;</li> <li>• Biosolides de fosses septiques ;</li> </ul>
O3	Fortement malodorant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biosolides papetiers issus d'un procédé kraft, ayant un C/N <math>\geq 50</math> et <math>&lt; 70</math> ;</li> <li>• Résidus de crevettes et autres crustacés non traités ;</li> <li>• Boues de transformation de la viande ;</li> <li>• Résidus de pomme de terre et autres résidus de transformation de légumes ou de fruit ;</li> </ul>

Les boues de fosses septiques sont classées dans la catégorie O2, c'est-à-dire elles sont des biosolides malodorants.

### 1.6.3. Teneur en corps étranger (Catégorie E)

Les corps étrangers sont des objets produits par une intervention humaine, tels que des pièces de monnaie, métal, verre, plastique et bien d'autres matériaux similaires, d'une taille supérieure à 2 mm, La taille d'un grain de sable grossier. Les corps étrangers affectent principalement la qualité esthétique du résidu (Marc Hébert 2015).

Notons qu'avant cette classification, les BFS doivent toujours faire l'objet d'un dégrillage pour l'obtention d'une catégorie E1 ou E2 (Marc Hébert 2015).

**Tableau 1-7 Catégories par défaut de certain MRF pour la teneur en corps étrangers  
(Marc Hébert 2015)**

	E1 – tout usage	E2 – usage restreint
Corps étrangers tranchants (CETr)	≤ 1 par 500 mL	-
Corps étrangers de longueur supérieure à 25 mm et dont la largeur est supérieure à 3 mm	≤ 2 par 500 mL	-
Corps étrangers totaux (> 2mm)	0.5 % (m.s.)	1.0% (m.s.)

Il est suggéré avant de faire la classification de prévoir un premier dégrillage plus grossier, suivi du dégrillage obligatoire à 1,25 cm au moins pour les BFS d'après le guide de gestion des matières résiduelles fertilisantes. Les boues sont par défaut dans la catégorie E2 (Marc Hébert 2015).

#### **1.6.4. Qualité et de désinfection des résidus (Catégorie P)**

Les biosolides municipaux, les digestats de biométhanisation et les résidus divers contaminés par des matières fécales sont regroupés dans le tableau 1-8 ci-dessous.

**Tableau 1-8 Critères de qualité et de désinfection des résidus relativement aux catégories P pour Biosolides municipaux, digestats de biométhanisation et résidus divers contaminés par matière fécale (Marc Hébert 2015)**

Catégorie	Critères
P1	a) Séchage thermique : respect des exigences de désinfection de la norme du BNQ sur les biosolides municipaux (CAN/BNQ 0413-400). b) Traitement alcalin : respect des exigences de désinfection de la norme du BNQ sur les biosolides municipaux (CAN/BNQ 0413-400).
P2	a) Chaulage à pH ≥ 12 pendant un minimum de 2 heures et maintien à pH ≥ 11,5 pendant un minimum de 22 heures. b) E. coli < 2 000 000 UFC/g (b.s) et traitement biologique aérobie et taux d'assimilation de O <sub>2</sub> ≤ 1 500 mg O <sub>2</sub> /kg mat. organique/heure. c) E. coli < 2 000 000 UFC/g (b.s.) et incorporation du résidu au sol en moins de 6 heures. d) E. coli < 2 000 000 UFC/g (b.s.) et traitement biologique par boues activées et âge des boues ≥ 20 jours. e) E. coli < 2 000 000 UFC/g (b.s.) et de catégorie d'odeur O1 ou O2, y compris les digestats provenant d'une unité de biométhanisation (digestion anaérobie). f) Salmonelles non détectées pour au moins 2 échantillons sur 3 et catégorie d'odeur O1 ou O2. g) Salmonelles non détectées pour au moins 2 échantillons sur 3 et incorporation du résidu au sol < 6 h.

La catégorie P1 du guide de gestion MRF est considérée comme pratiquement exempte d'agents pathogènes fécaux, c-à-d exempts de matières fécales ou traités pour fournir une désinfection de 99,9% ou plus contre les virus et les bactéries et de 99 % ou plus contre les parasites. (Marc Hébert 2015)

Ainsi, à une exception près, les MRF de catégorie P1 ne sont pas soumis à des restrictions de distribution spécifiques. En effet, le Québec interdit l'épandage de biosolides municipaux non certifiés BNQ pour fertiliser les parcelles destinées à la consommation humaine et au pâturage. Selon les preuves scientifiques de catégorie P1 et les normes RPEP, les MRF sont considérées comme exemptes de contamination fécale humaine si le niveau de pollution est inférieur à 0,1 % de la matière sèche des résidus (Marc Hébert 2015).

Les MRF de la P2 sont traités pour une désinfection partielle, censée tuer plus de 90 % des E. coli dans le monde (tuant plus de 98 % des E. coli)(Marc Hébert 2015). Comme il s'agit d'un correctif partiel, de nombreuses restrictions de distribution supplémentaires s'appliquent. Cette combinaison de désinfection partielle et de restrictions d'utilisation offre généralement le même niveau de sécurité que la catégorie P1. Les MRF qui ne répondent pas à ces exigences de base devront subir une désinfection supplémentaire avant d'être distribuées dans la campagne(Marc Hébert 2015).

#### **1.6.5. Utilisation des MRF selon la classification C-P-O-E**

La catégorisation selon les contaminants chimiques (C) et les odeurs (O) n'influence pas le type de culture, contrairement aux catégories P2 et E2. Les catégories P2 et E2 peuvent limiter en particulier le type de culture; les catégories O2 et O3 affectent les distances séparatrices par rapport aux voisins, et la catégorie C2 a une influence sur les doses d'épandage. Une MRF qui ne satisfait pas aux exigences minimales de la classe C2-P2-O3-E2 est considérée comme étant « hors catégorie », elle ne doit pas être épandue, sauf dans des cas exceptionnels(Marc Hébert 2015).

Le tableau 1-9 est un exemple des usages des MRF selon les catégories P et E.



**Tableau 1-9 Usages possibles des MRF, selon la classification des MRF (Marc Hébert 2015)**

Cultures/usages	P1-E1	P2	E2
Cultures Vivrières (alimentation humaine)	Souvent	Non	Parfois
Pâturages	Souvent	Non	Non
Prairies	Oui	Oui	Non
Mais et grains pour l'alimentation animale	Oui	Oui	Oui
Horticulture ornementale/Aménagement paysager	Oui	Non	Oui
Sylviculture	Oui	Oui	Oui
Paillis/hydro-ensemencement/aménagement paysager	Souvent	Non	Parfois
Aménagements en bordure de route et bermes filtrantes	Souvent	Non	Oui
Fabrication de terreaux horticoles tout usage	Souvent	Non	Parfois
Végétalisation de lieux dégradés	Oui	Oui	Oui

## 1.7.Synthèse critique

Les méthodes de gestion des boues actuelles ont de nombreux désavantages comme :

- La nécessité d'une grande surface pour la mise en place des systèmes de traitement, comme le lagunage et les lits de filtration ;
- L'utilisation de la centrifugeuse et le four sont des exemples d'équipements qui rendent coûteux le fonctionnement des ouvrages d'assainissement ;
- L'inefficacité de l'enlèvement des germes pathogènes.

Au meilleur de nos connaissances, l'électro-oxydation n'a jamais été utilisée pour le conditionnement et stabilisation des boues de fosses septiques.

**Tableau 1-10 Avantage et inconvénient des méthodes conventionnelles de gestion des BFS**

Type	Méthode	Inconvénients	Avantages	Références
<b>Séparation</b>	Lit de séchage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siccité dépend des conditions climatiques</li> <li>• Temps de séchage élevé</li> <li>• Pas de désinfection</li> <li>• Grande surface au sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Séchage naturel</li> <li>• Siccité entre 20% et 40%</li> <li>• Coût d'exploitation entre 86 \$/tbs (tonne de boue sèche) et 113 \$/tbs</li> </ul>	Plan de gestion de matière résiduelle 2003, Shukla, Patwa et al. 2022
	Pressoir rotatif / à bande	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût entre 565 \$/tbs et 1085 \$/tbs</li> <li>• Consommation de polymère</li> <li>• Pas de désinfection</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité d'exploitation</li> <li>• Siccité entre 26% et 45%</li> <li>• Mode continue d'utilisation</li> </ul>	Plan de gestion de matière résiduelle 2003, Shukla, Patwa et al. 2022
	Géotubes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande surface d'aménagement</li> <li>• Non réutilisable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Séchage naturel</li> <li>• Siccité entre 15 % et 50 % selon le temps de séchage et polymère</li> </ul>	Shukla, Patwa et al. 2022
<b>Décontamination</b>	Chaulage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation de la masse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût entre 74 \$/tbs et 164 \$/tbs</li> </ul>	Plan de gestion de matière résiduelle 2003
	Co-compostage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus lent</li> <li>• Fortes odeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût entre 15 \$/tbs et 70 \$/tbs</li> </ul>	Plan de gestion de matière résiduelle 2003, Shukla, Patwa et al. 2022
	Traitement thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût entre 300 \$/tbs et 400 \$/tbs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilisation + séparation</li> </ul>	Plan de gestion de matière résiduelle 2003

## **2. Hypothèses, Objectifs et Démarche Méthodologique**

### **2.1. Objectif**

#### **2.1.1. Objectif principal**

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer les performances épuratoires d'un procédé électrochimique pour le conditionnement et la stabilisation des boues de fosse septique. Pour ce faire, nous exploitons le potentiel du procédé ÉLEC-STAB breveté et conçu pour améliorer les caractéristiques de filtrabilité des boues. La technologie ÉLEC-STAB peut aisément s'intégrer dans les chaînes actuelles de traitement des boues d'épuration. Elle contribue à améliorer significativement les caractéristiques de filtrabilité des boues (hausse de la siccité des boues et de la capacité de filtration) tout en stabilisant efficacement les boues du point de vue microbiologique (destruction des germes pathogènes et élimination des odeurs). En même temps, elle permet de préserver les propriétés fertilisantes des boues en maintenant la concentration des nutriments inorganiques ( $P_{\text{tot}}$  et N-NTK) et de la matière organique dans les boues déshydratées.

#### **2.1.2. Objectifs spécifiques**

Les objectifs spécifiques liés au projet sont :

- i. Évaluer le conditionnement des BFS stabilisées microbiologiquement en fonction du type de polymère et sa concentration ;
- ii. Étudier les paramètres d'opération (pH, intensité du courant, durée du traitement, etc.) en appliquant la méthodologie de surface de réponse composée d'un plan factoriel suivi d'un plan central composite. Ceci permettra de déterminer les conditions optimales pour le conditionnement et la stabilisation des BFS ;
- iii. Établir un bilan de masse des BFS et estimer les coûts d'opération.

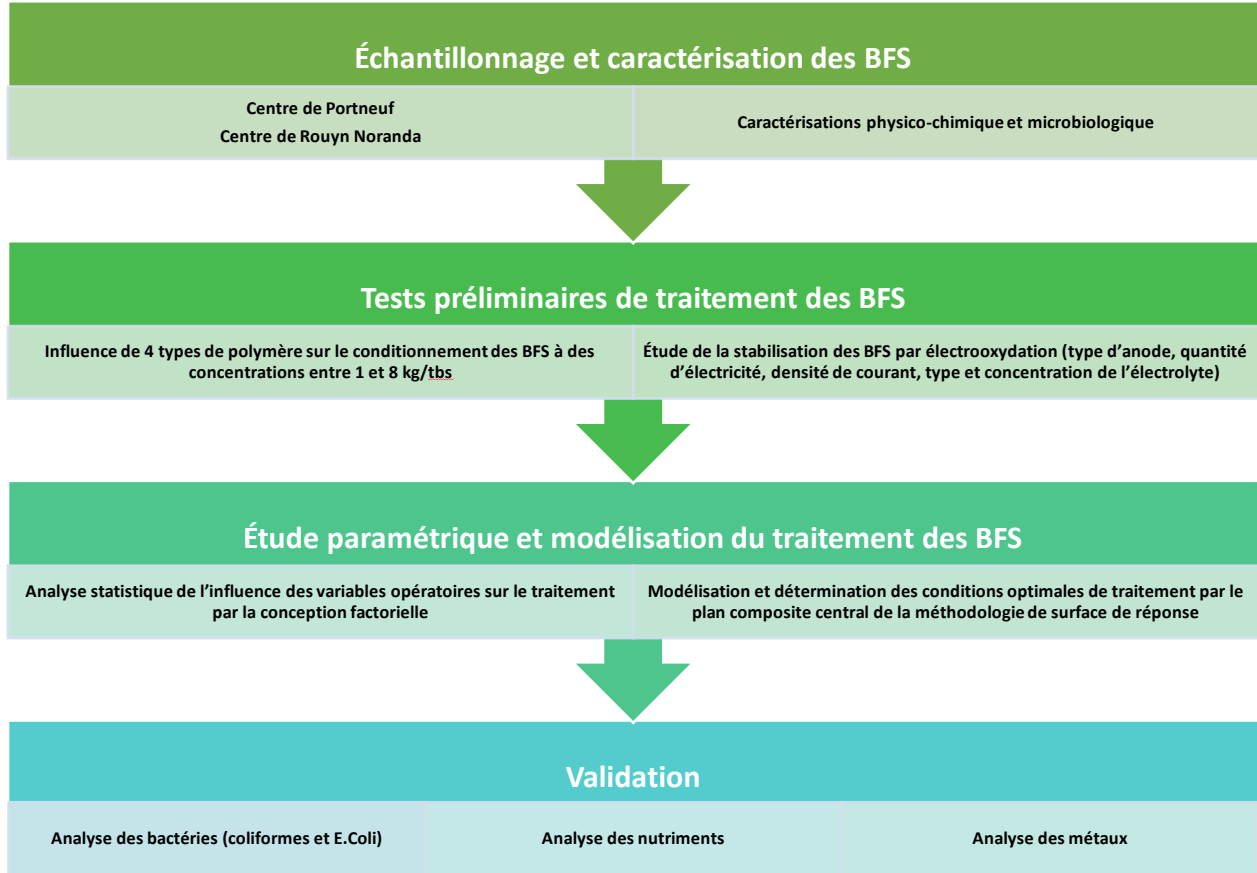
## 2.2. Hypothèses

**Hypothèse 1 :** L'utilisation du procédé EO induit la génération de radicaux hydroxyles pour la désinfection des boues de fosses septiques avant conditionnement. Il serait possible de générer du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) sur une cathode de graphite par réduction cathodique de l'oxygène dissous. Cela permettra la désinfection des BFS.

**Hypothèse 2 :** Il est essentiel de choisir le type de polymère adapté aux caractéristiques spécifiques des boues traitées. Le polymère adéquat peut dépendre de la composition chimique ou de la taille des particules. Une étude préalable des propriétés des boues permettrait de sélectionner le polymère le plus efficace. Cela contribuerait à réduire les coûts opérationnels et d'impact environnemental. Un taux de siccité plus élevé signifie que les solides contiennent moins d'eau, rendant leur manipulation plus aisée et moins coûteuse, tout en réduisant le volume global de déchets. Cela se traduit par une diminution des frais de transport et de traitement ultérieur, tels que le compostage.

### 2.3. Démarche expérimentale

La figure 2-1 résume la méthodologie suivie concernant le développement du procédé électrolytique adapté au traitement décentralisé des boues de fosses septiques.



**Figure 2-1 Démarche expérimentale**

L'échantillonnage des boues de fosses septiques a été fait sur deux sites, le premier site est celui de l'écocentre de Neuville situé à Portneuf à environ 30 minutes de Québec. Ce site a été identifié pour démarrer les travaux, en attendant la réception des échantillons issus de la région de Rouyn Noranda. Le deuxième site d'échantillonnage est celui d'une résidence de Rouyn Noranda située à environ 866 km de Québec. Le tableau 2-1 suivant regroupe les paramètres à mesurer pour la caractérisation physicochimique.

**Tableau 2-1 Paramètres à mesurer et la méthode utilisée, source : centre d'expertise d'analyse environnementale de Québec (CEAEQ)**

<b>Paramètre à mesurer</b>	<b>Unité</b>	<b>Méthode</b>
pH	-	MA. 100 – pH 1.1 (CEAEQ)
POR	mV	-
Conductivité	mS/cm	MA. 115 – Cond. 1.1(CEAEQ)
Solides totaux	g/L	MA. 100 – S.T. 1.1 (CEAEQ)
Coliformes fécaux	UFC / 100 mL	MA. 700 - Fec. Ec 1.0 (CEAEQ)
E. Coli	UFC / 100 mL	MA. 700 - Ec.BCIG 1.0 (CEAEQ)

La deuxième phase de la méthodologie consiste à réaliser des tests de conditionnement des boues, c'est-à-dire flocculer les boues avec un polymère. Quatre types de polymère de différentes charges cationique et anionique (ZETAG-7563, ZETAG -4110, PERCOL-789, AQ-2682) ont été testés. Les boues seront flocculées à des concentrations qui varient entre 1 à 8 kg/tonne de boues sèches (tbs).

Le critère principal d'évaluation des tests de conditionnement est la siccité. Le polymère qui donnera une meilleure siccité sera choisi pour la deuxième étape qui sera les tests d'électro-oxydation. Lors de l'électro-oxydation, la stabilisation des boues est évaluée d'un point de vue microbiologique (élimination des indicateurs de contamination fécale). Les essais sont réalisés dans un réacteur électrolytique d'électro-oxydation comprenant respectivement des électrodes anodiques de diamant dopé au bore (BDD pour Boron doped diamond) et d'oxyde d'iridium déposé sur titane (Ti/IrO<sub>2</sub>). La cathode est une électrode en graphite (Gr). L'intensité de courant imposé varie entre 0.5A et 1.5A pendant un temps se situant entre 20 min et 60 minutes. Le pH imposé est compris entre 4 et 7. Le volume utile du réacteur est de 0.5 L. Suite au traitement électro-oxydatif, un volume de 150mL de boues traitées est flocculé à l'aide d'un polymère identifié à partir des tests préliminaires de conditionnement. Par la suite, les boues flocculées sont transférées dans une unité de déshydratation sous vide. Les boues déshydratées sont récupérées et séchées à 105°C pour l'évaluation de la siccité des boues.

La troisième partie du projet consiste à l'application d'un plan de surface de réponse (plan factoriel suivi d'un plan central composite) pour étudier l'effet des facteurs principaux et de leurs interactions sur la réponse (la siccité des boues et la consommation énergétique). Après l'obtention d'un modèle significatif du plan factoriel, le plan composite central été successivement utilisé pour

déterminer les conditions optimales du processus de traitement des boues de fosses septiques. La stabilisation d'un point de vue microbiologique a été évaluée par la mesure des concentrations résiduelles des coliformes, bactéries hétérotrophes aérobies et des salmonelles dans les boues déshydratées. Les propriétés fertilisantes des boues traitées ont été également évaluées en mesurant les concentrations résiduelles de  $\text{NH}_4$ , P et DCO dans les boues déshydratées et dans le filtrat de déshydratation des boues.

### 3. Matériels et méthodes

#### 3.1. Site d'échantillonnage et conservation des boues

L'échantillonnage des boues de fosses septiques a été fait à l'écocentre de Portneuf près de Québec et à Rouyn Noranda en Abitibi-Témiscamingue.

**Tableau 3-1 Date et lieu des échantillons de BFS reçu**

<b>Date d'échantillonnage</b>	<b>Lieu d'échantillonnage</b>
Mai 2022	Portneuf
Aout 2022	Portneuf
Octobre 2022	Rouyn Noranda
Juillet 2023	Rouyn Noranda

L'écocentre de Portneuf possède une grande fosse dans laquelle les camions de pompages des boues septiques vident leurs boues. L'échantillonnage a été fait au niveau de la fosse (composée d'un seul compartiment) de réception des boues.

L'échantillonnage d'octobre 2022 a été fait manuellement dans une fosse domestique à deux compartiments. Pour juillet 2023 la prise d'échantillon a été faite directement à partir du camion vacuum de pompage.

Après échantillonnage les chaudières contenant les boues de fosses septiques sont mises dans une chambre froide à 4°C.

Les boues issues de l'écocentre de Neuville à Portneuf ont été prélevées dans une fosse où les camions de vidanges déversent les boues. Ces boues septiques peuvent provenir des fosses septiques ayant deux compartiments de sédimentations ou un seul compartiment. L'écocentre de Neuville à Portneuf reçoit les boues de fosses septiques tout au long de l'année.

Les boues issues de Rouyn-Noranda ont été directement prélevées dans une fosse à deux compartiments en octobre 2022. Cette fosse n'a pas été vidangée durant les quatre dernières années. Au cours de l'échantillonnage, les boues et les écumes ont été prélevés séparément. Différents ratios (boues/écumes) ont été préparés et testés au laboratoire :



- i) Le premier ratio (ratio 50/50) est composé de 50% (v/v) de boues et 50% (v/v) d'écumes;
- ii) Le deuxième ratio (66/33) est constitué de 66% (v/v) de boues et 33% (v/v) d'écumes;
- iii) Le troisième ratio (75/25) est composé de 75% (v/v) de boues et 25% (v/v) d'écumes.

Ceci permet de tester l'efficacité épuratoire du système ELEC-STAB pour le conditionnement et la stabilisation de biosolides ayant différents ratios boues/écumes.

## 3.2. Méthode analytique

### 3.2.1. Analyse des solides totaux

Les solides totaux ont été mesurés selon la méthode d'analyse (MA. 100 – S.T. 1.1) du centre d'expertise d'analyse environnementale de Québec (CEAEQ). Cette méthode consiste à sécher à 105°C pendant une nuit un volume déterminé de l'échantillon dans une coupelle d'aluminium préalablement pesée. La différence entre la masse de la coupelle avant et après séchage permet de calculer la concentration en solide totaux. La formule de calcul est la suivante :

$$ST(mg / L) = \left( \frac{P_s - P_v}{V} \right) * 10^6 \quad (6)$$

Où :

ST : Concentration en solide totaux [mg/L]

Ps : Masse de la coupole en aluminium + masse de l'échantillon après une nuit de séchage dans l'étuve [g]

Pv : Masse de la coupole vide [g]

V : Volume échantillon mis dans la coupole [mL]

### 3.2.2. Mesure du pH et de la conductivité

Le pH a été mesurés à l'aide du pH-mètre AP115 de la marque Fisher Scientific. L'appareil a été calibré avec des solution tampon de pH 4, 7 et 10 avant chaque utilisation. La conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre Seven Compact S230.

### 3.2.3. Mesure de la siccité

La siccité est déterminée par la masse de solides restant après chauffage à 105°C pendant une nuit selon la méthode d'analyse (MA. 100 – S.T. 1.1) du centre d'expertise d'analyse environnementale de Québec (CEAEQ). La formule de calcul est la suivante :

$$Siccité(\%) = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 \quad (7)$$

Où :

$m_3$  : Masse de la coupole + échantillon après étuve [g]

$m_2$  : Masse de la coupole + échantillon avant la mise en étuve [g]

$m_1$  : Masse de la coupole vide sans échantillon [g]

### 3.2.4. Mesure des métaux, cations et anions majeurs

La méthode MA. 200 – Mét. 1.2 du CEAEQ a été utilisé pour déterminer la concentration des métaux dans les boues brutes, dans les boues déshydratées et le filtrat en duplicata. La méthode de la chromatographie ionique MA.300 -Ions 1.2 du CEAEQ a été suivie pour la quantification des anions et cations dans les phases liquides et solides des boues septiques. Les analyses métaux, cations et anions ont été réalisées par le laboratoire AGAT Laboratoires.

### 3.2.5. Analyse microbiologique

Trois indicateurs de contamination bactérienne ont été analysés : Escherichia Coli, les coliformes fécaux et les coliformes totaux. La méthode MA. 705 - Ec-BCIG 1.0 du CEAEQ a été utilisé pour la mesure du E. Coli dans les échantillons solides, c'est-à-dire dans boues déshydratées. Concernant les échantillons liquides, la méthode MA. 700 - Ec.BCIG 1.0 a été appliquée. Concernant les coliformes fécaux la méthode suivie est la MA. 700 - Ecctmi 1.0. La méthode du centre d'expertise d'analyse environnementale de Québec (CEAEQ) MA. 700 - Fec. Ec 1.0 a été appliquée pour les coliformes totaux.

### 3.2.6. Estimation de la consommation énergétique

L'étude économique du procédé d'électro-oxydation est uniquement estimée à partir du coût en énergie électrique selon la relation suivante :

$$EC\left(\frac{W.h}{m^3}\right) = \frac{I \times U \times t}{V} \quad (8)$$

Où :

EC : énergie consommée en [W.h/m<sup>3</sup>]

U : la tension du courant en Volt

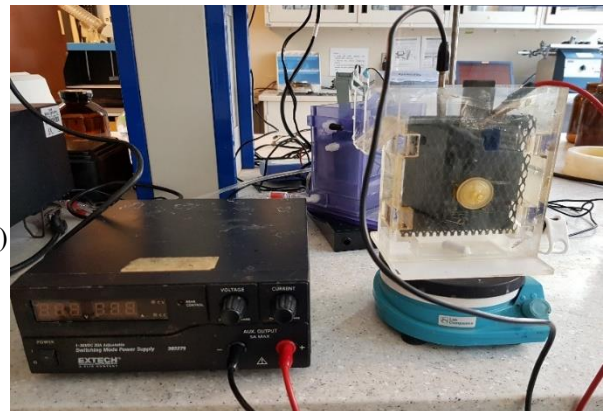
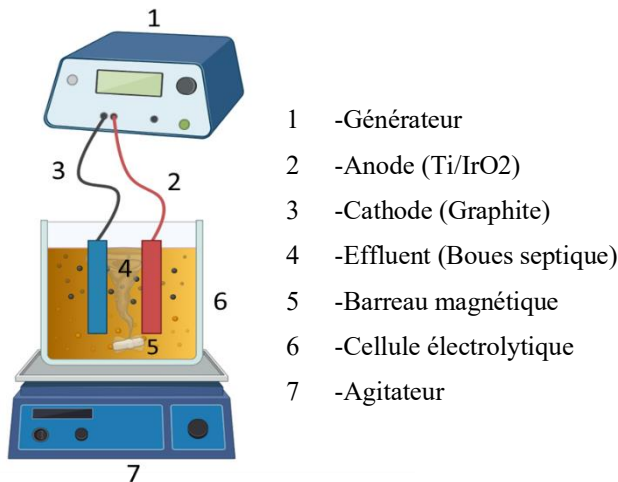
I : L'intensité du courant en Ampère

t : temps de traitement en heure

V : Volume traité en m<sup>3</sup>

### 3.3.Méthode expérimentale

#### 3.3.1. Unité d'électro-oxydation



**Figure 3-1 Dispositif d'électro-oxydation**

L'unité d'électro-oxydation utilisée pour le plan factoriel et le plan composite central, est composée d'un générateur de courants de la marque BK PRECISION 9184 DC d'une intensité maximale de 2 A et d'une tension maximale de 100 V. Une anode de titane recouvert d'oxyde d'iridium (Ti/IrO<sub>2</sub>)

d'une superficie de 65cm<sup>2</sup> a été utilisée. Une cathode en graphite d'une superficie de 110 cm<sup>2</sup>. La distance inter-électrode a été fixée à 1 cm.

La cellule électrolytique a un volume utile de 500 mL, dans lequel un barreau magnétique a été installé pour l'agitation des boues des fosses septiques lors du traitement.

### 3.3.2. Traitement des boues

Le traitement par électro-oxydation des boues de fosses septiques est basé sur le brevet ELEC-STAB. Dans un premier lieu le plan factoriel a permis d'étudier l'influence des facteurs principaux jugés pertinents (la quantité d'électricité appliquée, la quantité de polymère et la quantité d'anti-mousse) sur la variance des réponses (siccité et consommation énergétique). Deuxièmement, le plan factoriel permet d'observer l'interaction entre ces facteurs (tableau 3-2) et leur impact sur les réponses. Le domaine de variation des facteurs a été déterminé à partir des tests préliminaires. Deux réponses ont été étudiées (tableau 3-3) : la siccité des boues et la consommation énergétique. Les différents effets peuvent être calculés en utilisant la méthode de régression linéaire dite des moindres carrés selon l'équation suivante :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \dots + b_5X_5 + \dots + b_{23}X_2X_3 + \dots + b_{45}X_4X_5 \quad (9)$$

Dans cette équation, Y représente la réponse et « b0 » représente la moyenne de la réponse aux essais. Les termes X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> et X<sub>4</sub> représentent les facteurs comme le montre le tableau 3-2.

Les coefficients « b<sub>1</sub> », « b<sub>2</sub> » et « b<sub>3</sub> » représentent les effets principaux des paramètres associés. Les coefficients « b<sub>12</sub> », « b<sub>13</sub> », « b<sub>23</sub> » et « b<sub>34</sub> » représentent les effets d'interaction entre les facteurs.

**Tableau 3-2 Facteurs considérés dans le plan factoriel**

Variables codées (X <sub>i</sub> )	Facteur (U <sub>i</sub> )	Champ expérimental		U <sub>i,0</sub>	ΔU <sub>i</sub>
		Valeur min (-1)	Valeur max (+1)		
X <sub>1</sub>	U <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)	10	40	25	15
X <sub>2</sub>	U <sub>2</sub> : Concentration anti-mousse (mL/L)	1	5	3	2
X <sub>3</sub>	U <sub>3</sub> : Intensité de courant (A)	0.5	1	0.75	0.25
X <sub>4</sub>	U <sub>4</sub> : Concentration polymère (kg/tbs)	1	5	3	2

Dans le tableau 3-2 au-dessus, les termes  $\Delta U_i$  et  $U_{i,0}$  ont été calculé à partir des valeurs min (-1) et max (1) du champs expérimental des facteurs, selon les équations suivantes :

$$U_{i,0} = \frac{U_{i,max} + U_{i,min}}{2} \quad (10)$$

Ce terme représente la valeur de  $U_i$  au centre du domaine expérimental, avec  $U_{i,max}$  et  $U_{i,min}$  qui sont respectivement les valeurs maximales et minimales de chaque variable. Alors que :

$$\Delta U_i = \frac{U_{i,max} - U_{i,min}}{2} \quad (11)$$

Représente l'étape de la variation.

**Tableau 3-3 Réponses étudiées dans le plan factoriel**

Réponse	Nom	Unité
Y1	Siccité des boues déshydratées	% (p/p)
Y2	Consommation énergétique	KWh/m3

L'influence de chaque facteur  $X_i$  sur une réponse  $Y_i$  est calculée selon l'équation suivante :

$$P_i = \left( \frac{b_i^2}{\sum b_j^2} \right) \times 100 (i \neq 0) \quad (12)$$

Où :

$P_i$  : représente le taux d'influence de  $X_i$  sur  $Y_i$

$b_i^2$  : coefficient de  $X_i$  au carré

$\sum b_j^2$  : la somme de tous les carrés des coefficients

En se basant sur le plan factoriel pour déterminer les conditions de traitement optimale, le processus de traitement des boues de fosses septiques a été modélisé à l'aide d'un plan composite central. La réponse peut être décrite en s'appuyant sur l'équation polynomiale du second ordre suivant :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \leq j}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (13)$$

Où :

Y : la réponse recherchée à prédire

$b_0$  : une constante

$b_i, b_{ii}, b_{ij}$  : coefficient linéaire, quadratique et interactif

$x_i$  : le facteur codé

$\varepsilon$  : l'erreur du modèle de prédiction

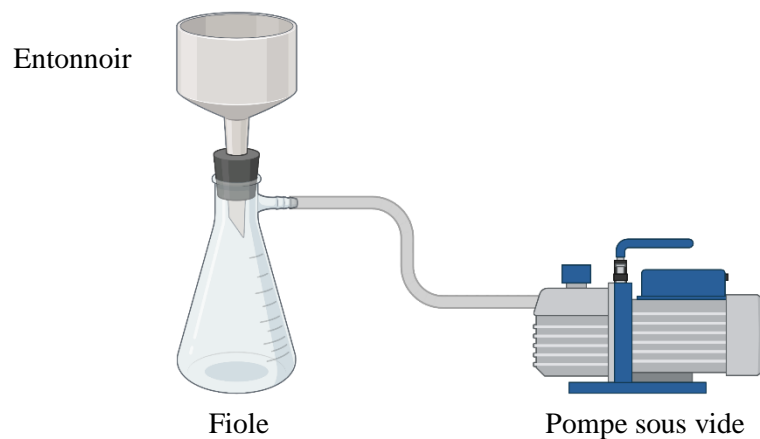
Les critères appliqués pour l'optimisation du processus de traitement des boues de fosses septiques sont :

- Maximiser le pourcentage de la siccité ;
- Minimiser de consommation énergétique.

### 3.3.3. Flocculation et séparation

Des tests préliminaires d'identification du type de polymère (utilisé comme flocculant) ont été réalisés. Des polymères cationiques et anioniques (Percol 789, AQ2682, ZETAG 7563, ZETAG 4110) ont été testés avec des concentrations se situant entre 1 à 8 kg/tbs.

La déshydratation des boues de fosses septiques après flocculation a été effectuée à l'aide d'une unité de filtration sous vide (Figure 3-2). L'unité est composée d'une pompe sous vide, un système Buchner et d'un filtre de séparation Fisher brand de CAT. No. 09-790-12F en crêpe d'une porosité de 25 $\mu$ m et d'un diamètre de 15 cm. Le temps de déshydratation a été fixé à 5 min sous une pression de 5 bars. Après séparation le gâteau (boues de fosses septiques déshydratées) est récupéré à la surface du filtre.



**Figure 3-2** Système de séparation des boues de fosses septiques après flocculation

### 3.3.4. Réactifs et évaluation des coûts de traitement

L'acidification des boues a été effectuée par un apport d'acide sulfurique. Un prix budgétaire de 100 \$CAN/t.m. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 100% (solution utilisée : 96% p/p ; d : 1,83 kg/L) a été utilisé pour l'évaluation des coûts.

Le conditionnement des boues a été effectué par un ajout de polymère organique commercial (polymère anionique ou cationique). Un coût de 7,00 \$CAN/kg a été considéré pour l'évaluation des coûts de traitement.

L'évaluation des coûts énergétiques a été effectuée en considérant un prix de 0,09 \$CAN/kWh.

Les coûts de disposition finale des boues déshydratées (en supposant que ces résidus ne soient pas considérés comme étant des matières résiduelles dangereuses), y compris le transport et les frais d'élimination, ont été évalués à 0,075 \$CAN/kg de boues déshydratées humides<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> <https://www.ricbs.qc.ca/les-tarifs/> (consulté le 18/12/2023)

## **4. Résultats et discussion**

### **4.1. Caractérisation des boues de fosses septiques**

Les caractéristiques physicochimiques des boues de fosses septiques peuvent varier en fonction des conditions de stockage et d'échantillonnage. Un autre échantillonnage a été réalisé à Rouyn-Noranda en juillet 2023. Il a été directement réalisé à partir d'un camion de pompage.

Les échantillons ont une valeur de pH autour de la neutralité (pH compris entre 6.2 et 7.2). Les valeurs du potentiel oxydo-réduction des boues issues de Portneuf sont positives, tandis que celles issues de Rouyn Noranda ont des valeurs négatives. Selon quelques travaux répertoriés dans la littérature (Lim, Chiam and Wang 2014), cette différence de valeurs serait liée au contact des boues avec l'oxygène. Les boues issues de Portneuf ont été régulièrement en contact avec l'oxygène de l'air (conditions oxydantes), comparativement aux boues issues de Rouyn Noranda qui se trouvent dans des conditions réductrices.

À Portneuf la fosse d'échantillonnage est toujours ouverte. La fosse est en contact avec le milieu extérieur, c-à-d l'air circule entre la fosse et le milieu externe, d'où les valeurs positives. En revanche, l'échantillonnage d'octobre 2022 (effectué à Rouyn Noranda) a été fait directement depuis une fosse septique qui n'a pas été ouverte pendant presque 3~4 ans.



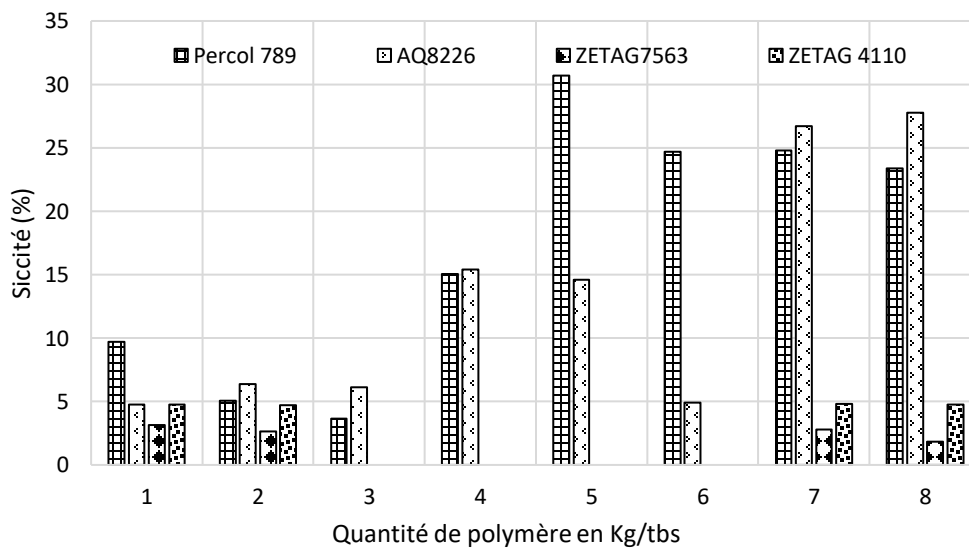
**Tableau 4-1 Caractérisation physico-chimique des boues de fosses septiques échantillonnées**

Date d'échantillonnage  Paramètres	Portneuf		Rouyn Noranda			
	26/05/2022	10/08/2022	Octobre 2022			Juillet 2023
			Ratio 1/2	Ratio 1/4	Ratio 1/3	
pH	6.5	6.21±0.03	7.2±0.39	6.6±0.25	6.5±0.35	6.4
POR (mV)	13.7	30.55±1.2	-47.1±2.57	-37±11.6	-42±17.75	-8
Conductivité (mS/cm)	1.9	2.52±0.02	1.8±0.02	2.6±0.43	2±0.03	-
Solides totaux (g/L)	16.1	11.34±0.51	13.6±0.71	19.9±0.14	18.5±0.85	7.09±1.3
E. Coli (UFC/ 100 mL)	-	-	1.1x10 <sup>5</sup>	-	-	3 x10 <sup>5</sup> (UFC/g sec)
Coliformes totaux (UFC/100mL)	-	-	3.6x10 <sup>6</sup>	-	-	8.4 x10 <sup>6</sup> (UFC/g sec)

## 4.2. Tests préliminaires : effet des paramètres opératoires sur la siccité

### 4.2.1. Type et concentration de polymère

Les premiers tests préliminaires ont été réalisés afin d'identifier le polymère le plus approprié ainsi que la concentration requise pour la floculation des boues de fosses septiques. Quatre types de polymères ont été testés : trois polymères cationiques (Percol 798, AQ8226, ZETAG 7563) et un polymère anionique (ZETAG 4110). Pour chaque polymère une solution mère de 1g/L a été préparée. Pour chaque 150 mL de boues brutes, différentes concentrations de polymères ont été ajoutées de 1 à 8 kg/tbs. Ensuite l'échantillon est agité pendant environ deux minutes, puis transféré dans une unité de filtration sous vide pendant environ 15 minutes. Les boues déshydratées sont par la suite séchées à l'étuve à 105°C pour la mesure de la siccité.



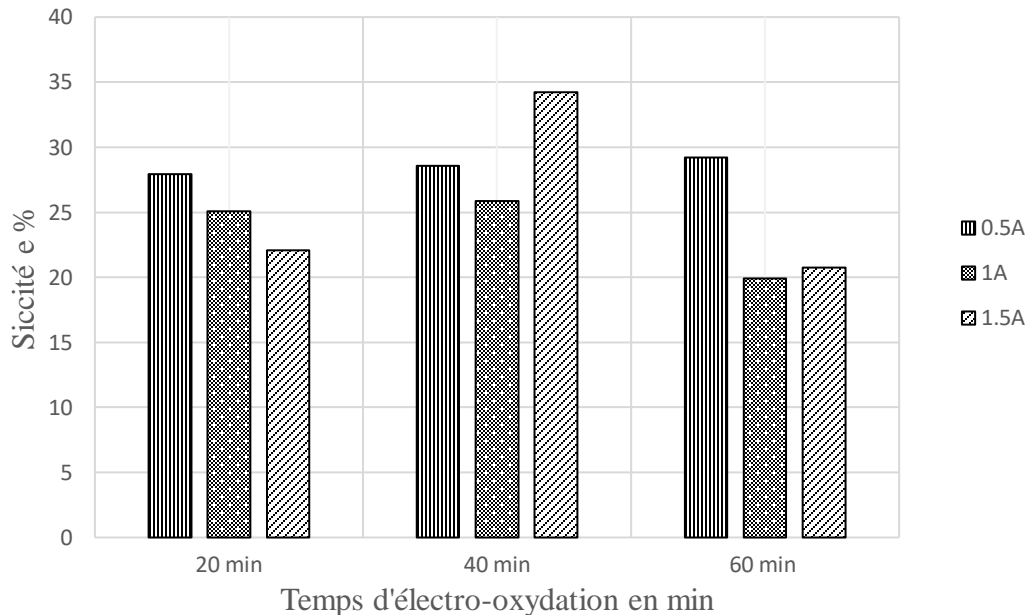
**Figure 4-1 Évolution de la siccité en fonction du type et concentration des polymères sélectionnés**

Les résultats des tests de floculation sont représentés dans la figure 4-1. Les polymères de type ZETAG n'ont montré aucune amélioration de la siccité quelle que soit la concentration utilisée. Une siccité inférieure à 5% a été enregistrée lorsque les polymères de type ZETAG sont utilisés. Le polymère Percol 789 s'est distingué en appliquant une dose de 5 kg/tbs. Une siccité allant jusqu'à 30.67% a été enregistrée en l'utilisant. D'un autre côté, une siccité de 27.7% a été

enregistrée en utilisant 8 kg/tbs de polymère AQ822. D'après ces résultats le polymère cationique Percol-789 a été choisi avec une concentration de 5 kg/tbs à la suite du traitement électro-oxydatif.

#### 4.2.2. Type d'anodes et temps de traitement

- Utilisation de l'anode en  $TiIrO_2$



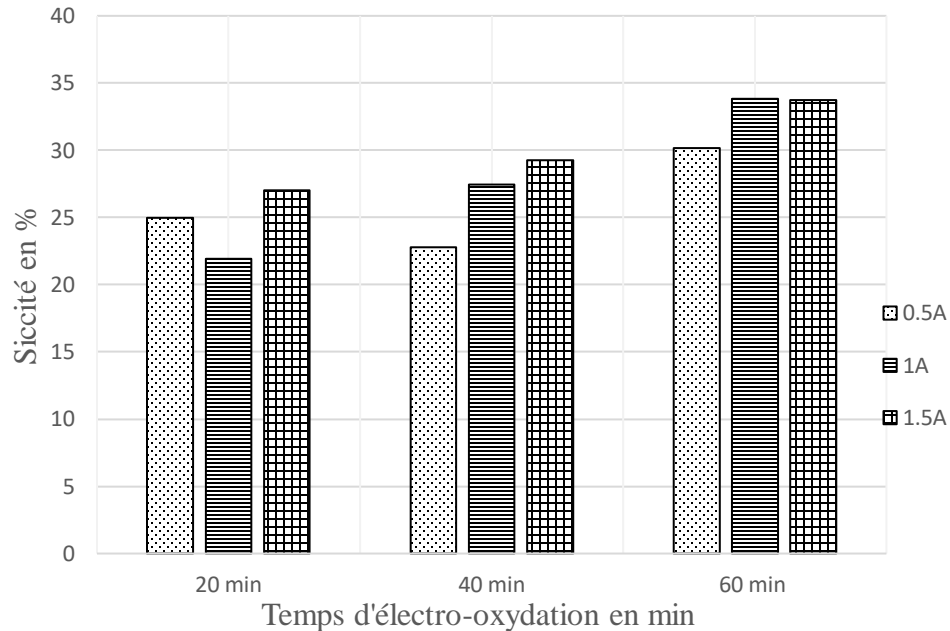
**Figure 4-2 Influence de l'intensité de courant et le temps de traitement sur la siccité des BFS en utilisant l'anode  $TiIrO_2$ , polymère Percol-789 avec concentration 5 kg/tbs**

Des intensités de de courant se situant entre 0.5 à 1.5 A ont été appliquées en utilisant une anode de  $Ti/IrO_2$ . Une intensité de courant de 1.5 A n'a pas pu être testée à cause des quantités importantes de mousses générées lors de l'électrolyse. Des temps de traitement variant entre 20 et 60 min ont été appliqués. Après le traitement par électro-oxydation les boues traitées ont été floculées et déshydratées pour la mesure de siccité.

Des siccités se situant entre 27 et 29% ont été enregistrées en imposant une intensité de 0.5A. En comparaison, des siccités variantes entre 20 et 25% ont été mesurées en appliquant une intensité de 1.0 A. La siccité la plus élevée (34%) a été enregistrée en imposant une intensité de 1.5A au bout de 40 min d'électrolyse. Lorsque l'électrolyse se poursuit à 60 min, une diminution de la siccité (de 34% à 20.7%) pour une même intensité de 1.5A. La production de la mousse serait fort

probable à l'origine d'une telle chute de la siccité. De grands volumes de mousses sont générés lorsque les quantités d'électricité augmentent (en allongeant le temps d'électrolyse). Les volumes importants de mousses perturbent la réaction d'électrolyse et influencent négativement la siccité.

- **Utilisation de l'anode en BDD**



**Figure 4-3 Influence de l'intensité de courant et le temps de traitement sur la siccité des BFS en utilisant l'anode en BDD**

En utilisant l'anode en BDD, une augmentation générale de la siccité est remarquée en fonction du temps pour les trois intensités de courant appliquées.

Les plus hauts pourcentages de siccité qui ont été mesurés (30 et 34%) à 60 minutes de traitement avoisinent les 30 et 34%. La plus forte valeur de siccité (34%) a été mesurée à 60 min en utilisant une anode de BDD, alors que cette même valeur de siccité a été obtenue à 40 min d'électrolyse en utilisant une anode de Ti/IrO<sub>2</sub>. N'empêche qu'encore une fois la formation de la mousse a été très forte pour les tensions appliquées 1 et 1.5 A. Ces résultats nous emmènent à identifier le Ti/IrO<sub>2</sub> comme étant l'anode la plus appropriée pour le conditionnement des boues de fosses septiques.

- **Matière en suspension et turbidité du filtrat après traitement**

Le tableau suivant regroupe les résultats des MES et de la turbidité des filtrats obtenus durant les tests préliminaires d'électro-oxydation. La turbidité initiale des boues de fosse septiques brutes est

supérieure au domaine de détection du turbidimètre qui est 4000 NTU. Il n'existe actuellement aucune norme de rejet concernant la turbidité au Québec. Tandis que, la limite des MES dans le rejet des effluents est 50 mg/L.

**Tableau 4-2 Résultats de la turbidité et MES en fonction Conditions et anodes appliquées**

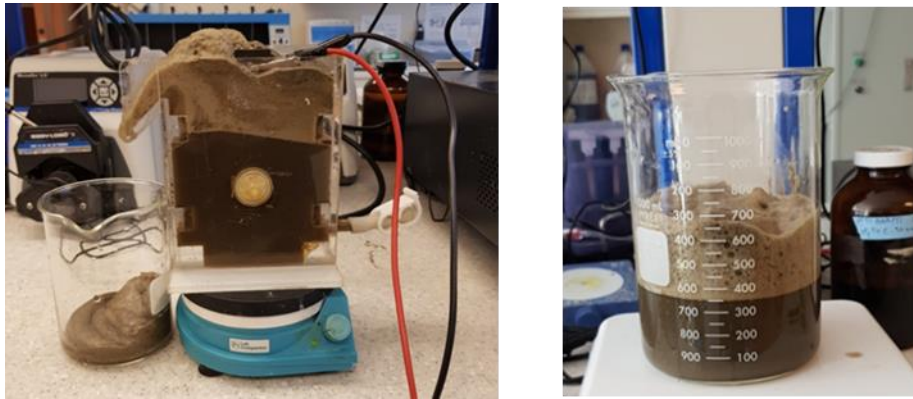
Tests	Conditions opératoires		Anode en Ti/IrO2		Anode en BDD		Norme de rejet MES mg/L
	Temps de traitement min	Intensité de courant A	Turbidité NTU	MES mg/L	Turbidité NTU	MES mg/L	
Test 1	20	0.5	30.2	65	10.4	50	50
Test 2		1	21.6	120	21.6	52	
Test 3		1.5	20.4	44	24.6	101	
Test 4	40	0.5	30.3	61	26.7	90	
Test 5		1	20.4	60	13.3	70	
Test 6		1.5	28.7	81	26.4	98	
Test 7	60	0.5	42.8	75	53.4	100	
Test 8		1	18	60	19.9	66	
Test 9		1.5	17.5	71	10.5	64	

Il n'y pas de différence notable entre les résultats des deux anodes en qui concerne la turbidité. Pour les MES, tous les résultats sont au-dessus de la norme ce qui nécessite un autre traitement. À noter que le traitement du filtrat de déshydratation après traitement fait le sujet de recherche d'une autre collègue.

- **Production de la mousse**

Durant les tests préliminaires du traitement par électro-oxydation, en augmentant l'intensité de courant, la production de mousse s'est élevée et s'est épaissie jusqu'à débordement, ce qui a créé deux phases différentes dans le réacteur (figure 4-4). Cela est principalement dû à l'augmentation de la quantité d'oxygène au niveau de l'anode et d'hydrogène au niveau de la cathode (Chakchouk, Elloumi et al. 2017, Abdelhay, Jum'h et al. 2019), qui soulèvent les solides en plus de l'agitation avec un barreau magnétique.

Pour réduire la formation de mousse, l'étude de l'effet d'un anti-mousse (TWEEN 80) a été ajoutée aux facteurs étudiés dans le plan factoriel.



**Figure 4-4 Formation de la mousse lors de l'électro-oxydation**

#### **4.2.3. Conditions opératoires du processus de traitement par électro-oxydation**

- **Plan factoriel**

Les quatre facteurs étudiés dans l'étude factorielle (tableau 4-3) sont : temps de traitement ( $X_1$ ), anti-mousse ( $X_2$ ), intensité de courant ( $X_3$ ) et concentration du polymère ( $X_4$ ). Le choix du champ expérimental de chaque variable a été basé sur les tests préliminaires. Le plan d'expérience généré à l'aide du logiciel (Design-Expert 13, 2021, Stat-Ease Inc., Minneapolis) pour analyser l'interaction entre les facteurs et l'influence des variables sur les réponses, comprend une matrice factorielle de 24 avec 4 facteurs, ce qui équivaut à un total de 16 tests.

**Tableau 4-3 Plan factoriel des quatre facteurs principaux étudiés**

Nombre Exp.	Matrice d'expérience factorielle				Plan d'expérimentation				Réponse	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	U <sub>1</sub> : temps (min)	U <sub>2</sub> : anti mousse (mL/L)	U <sub>3</sub> : Courant (A)	U <sub>4</sub> : Polymère (kg/tbs)	Y <sub>1</sub> Siccité (%)	Y <sub>2</sub> Énergie consommée (kWh/m <sup>3</sup> )
1	-1	-1	-1	-1	10	1	0.5	1	1.96	0.86
2	+1	-1	-1	-1	40	1	0.5	1	1.79	3.2
3	-1	+1	-1	-1	10	5	0.5	1	7.03	0.77
4	+1	+1	-1	-1	40	5	0.5	1	2.03	3.13
5	-1	-1	+1	-1	10	1	1	1	1.55	2.28
6	+1	-1	+1	-1	40	1	1	1	1.48	10.4
7	-1	+1	+1	-1	10	5	1	1	2.04	2.31
8	+1	+1	+1	-1	40	5	1	1	2.09	9.87
9	-1	-1	-1	+1	10	1	0.5	5	22.05	0.81
10	+1	-1	-1	+1	40	1	0.5	5	23.73	4.28
11	-1	+1	-1	+1	10	5	0.5	5	17.73	0.82
12	+1	+1	-1	+1	40	5	0.5	5	31.13	3.25
13	-1	-1	+1	+1	10	1	1	5	27.6	1.73
14	+1	-1	+1	+1	40	1	1	5	26.35	9.43
15	-1	+1	+1	+1	10	5	1	5	27.68	2.87
16	+1	+1	+1	+1	40	5	1	5	26.58	10.6

Le tableau ci-dessus regroupe la matrice d'expérience factoriel, du plan d'expérimentation ainsi que les résultats des réponses étudiées, qui sont la siccité et la consommation énergétique.

À partir des facteurs établis dans le tableau ci-dessus, les réponses de la siccité et consommation énergétique ont été modélisé par régression linéaire à l'aide du logiciel design expert. Les coefficients d'interaction qui ne figurent pas dans l'équation de la siccité ont été négligé ( $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{24}$ ,  $b_{123}$ ,  $b_{234}$  et  $b_{1234}$ ).

Pour l'équation d'approximation de la réponse consommation énergétique, seule les deux facteurs principaux temps de traitement (X<sub>1</sub>) et intensité de courant (X<sub>3</sub>) ainsi que l'interaction intensité\*temps de traitement (X<sub>13</sub>) ont été pris en compte (coefficients d'interactions non négligeables). Tous les autres effets (principaux et interaction) ont été négligé dû à leur effet qui est minime.

Équation de la siccité :

$$\text{Siccité} = 13.93 + 11.43X_4 + 0.49X_3 + 0.47X_1 + 1.2 X_4X_3 + 1.1X_1X_4 - 0.77X_3X_1 - 1.41X_1X_3X_4 + 1.04X_1X_2X_4 + 0.61X_2 \quad (14)$$

Équation de la consommation énergétique :

$$\text{Consommation énergétique} = 4.16 + 1.28X_3X_1 + 2.02X_3 + 2.6X_1 \quad (15)$$

**Tableau 4-4 Calcul de contribution des facteurs principaux et interactions sur les réponses**

Réponse	Facteurs	% de contribution
Siccité	X <sub>3</sub> : Intensité de courant (A)	0.18
	X <sub>34</sub> : Intensité de courant* Concentration polymère	1.04
	X <sub>4</sub> : Concentration polymère (kg/tbs)	94.78
	X <sub>31</sub> : Intensité de courant* Temps de traitement	0.44
	X <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)	0.16
	X <sub>413</sub> : Temps de traitement* Intensité de courant * Concentration polymère	1.44
	X <sub>14</sub> : Temps de traitement* Concentration polymère	0.9
	X <sub>2</sub> : Concentration anti-mousse (mL/L)	0.27
	X <sub>421</sub> : Temps de traitement* Concentration anti-mousse* Concentration polymère	0.77
	Consommation énergétique	X <sub>3</sub> : Intensité de courant (A)
X <sub>31</sub> : Intensité de courant* Temps de traitement		19.05
X <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)		78.59

Les contributions des facteurs sur les réponses représentées dans le tableau 4-4, ont été calculé à partir de l'équation (12).

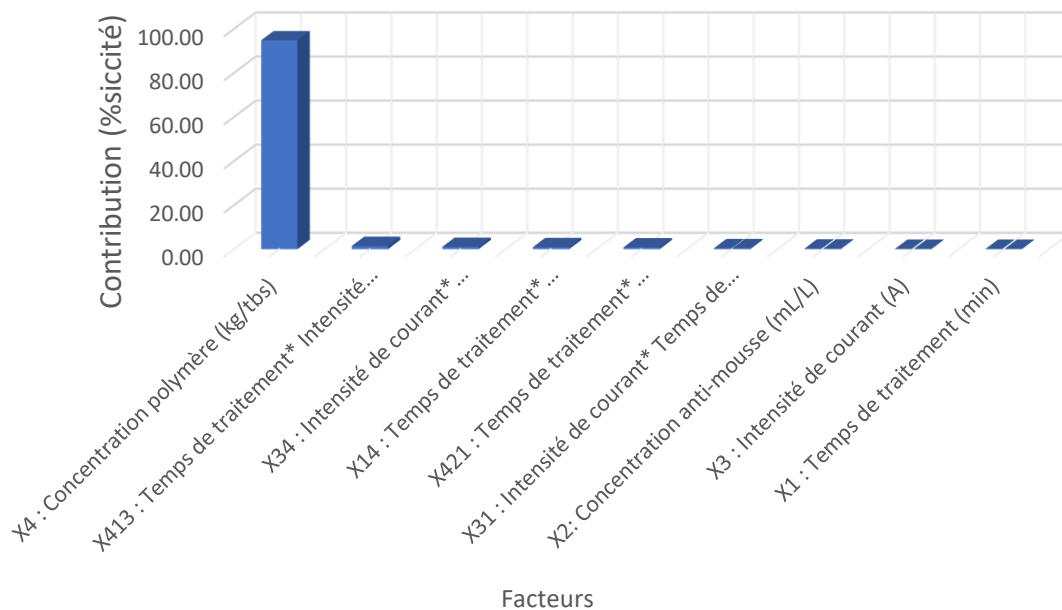
Le principal facteur contribuant à la siccité est le polymère à 94.78%. En deuxième et troisième position, nous avons les interactions polymère, intensité, temps ainsi que l'interaction polymère,



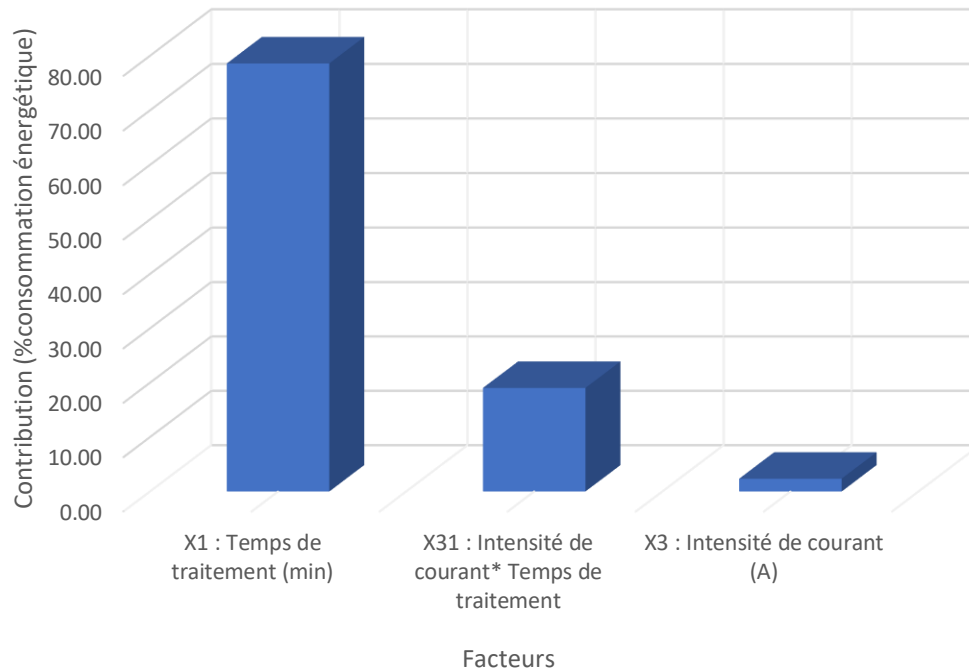
intensité ont une contribution respectivement de 1.44% et 1.04%. Pour les autres facteurs principaux et interactions, leur contribution est négligeable.

Il y a deux facteurs principaux et une interaction (intensité de courant\*temps de temps de traitement) qui influence la consommation énergétique. En première place le temps de traitement qui a une contribution de 78.59% à la réponse, suivit de l'interaction intensité de courant\*temps de traitement avec 19.05%. L'intensité de courant quant à lui, a une contribution de 2.12 %. La contribution du polymère et de l'anti-mousse est négligeable.

La figure 4-5 est une représentation graphique des contribution calculées dans le tableau 4-4 de la réponse siccité. La concentration en polymère a la plus grande contribution (94%), comparé elle les autres facteurs et interactions sont négligeable.



**Figure 4-5 Contribution des facteurs sur la réponse siccité**



**Figure 4-6 Contribution des facteurs sur la réponse consommation énergétique**

La figure 4-6 représente les contributions calculées dans le tableau 17 de la réponse consommation énergétique. Le temps de traitement a la plus grande contribution (78.59%), suivi de l'interaction intensité de courant\*temps de traitement puis l'intensité de courant.

Principalement l'amélioration de la déshydratation des boues résulte de la lyse des cellules microbiennes présentes dans les boues, qui permet de libérer l'eau piégée dans les floccs de boue (Lu, Zheng et al. 2017).

En ce qui concerne le deuxième facteur qui est l'anti-mousse Tween 80, il n'a aucun effet sur la siccité. D'après (Liu 2020) et (Trellu, Ganzenko et al. 2016), l'électro-oxydation permet la dégradation et l'enlèvement du Tween 80 à des taux très élevés. Ce qui explique son impacte négligeable sur la siccité.

Vu l'impact négligeable de l'anti-mousse sur la siccité et la consommation énergétique, un deuxième plan factoriel a été réalisé n'incluant pas le facteur anti-mousse.

**Tableau 4-5 Plan factoriel à trois facteurs**

Variables codées (X <sub>i</sub> )	Facteur (U <sub>i</sub> )	Champ expérimental		U <sub>i,0</sub>	ΔU <sub>i</sub>
		Valeur min (-1)	Valeur max (+1)		
X <sub>1</sub>	U <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)	10	40	25	15
X <sub>2</sub>	U <sub>2</sub> : Intensité de courant (A)	0.5	1	0.75	0.25
X <sub>3</sub>	U <sub>3</sub> : Concentration polymère (kg/tbs)	1	5	3	2

Les trois facteurs étudiés dans la seconde étude factorielle (tableau 4-5) sont : temps de traitement (X<sub>1</sub>), intensité de courant (X<sub>2</sub>) et concentration de polymère (X<sub>3</sub>). Le plan d'expérience comporte une matrice factorielle de 2<sup>3</sup> avec 3 le nombre de facteurs ce qui fait un total de 8 tests.

**Tableau 4-6 Facteurs considérés dans le plan factoriel à trois facteurs**

Nombre Exp.	Matrice factorielle			Plan d'expérimentation			Réponse	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	U <sub>1</sub> : temps (min)	U <sub>2</sub> : Courant (A)	U <sub>3</sub> : Polymère (kg/tbs)	Y <sub>1</sub> Siccité (%)	Y <sub>2</sub> Énergie consommée (kWh/m <sup>3</sup> )
1	-1	-1	-1	10	0.5	1	7.04	0.78
2	+1	-1	-1	40	0.5	1	1.79	3.2
3	-1	+1	-1	10	1	1	2.04	2.31
4	+1	+1	-1	40	1	1	2.1	9.86
5	-1	-1	+1	10	0.5	5	22.05	0.81
6	+1	-1	+1	40	0.5	5	23.8	4.28
7	-1	+1	+1	10	1	5	27.6	1.73
8	+1	+1	+1	40	1	5	26.3	9.4

Le tableau 4-6 ci-dessus regroupe la matrice d'expérience factoriel, plan d'expérimentation ainsi que les résultats des réponses étudiées, qui sont la siccité et la consommation énergétique.

Les nouvelles équations sont :

Équation de la siccité :

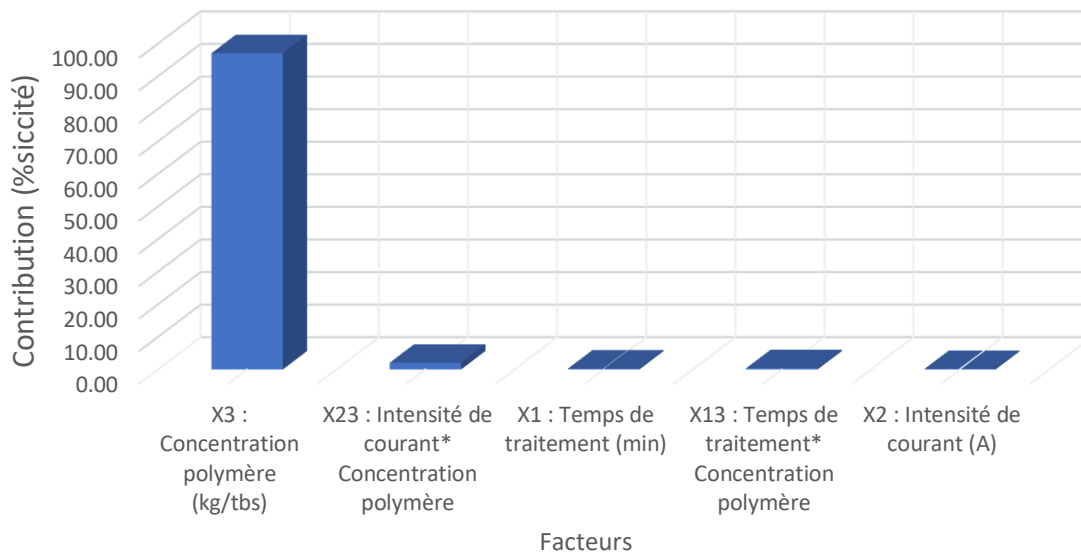
$$\text{Siccité} = 14.09 + 10.85X_3 + 0.42X_2 - 0.59X_1 + 1.59 X_3X_2 + 0.7X_1X_3 \quad (16)$$

Équation de la consommation énergétique :

$$\text{Consommation énergétique} = 4.05 + 1.17X_1X_2 + 1.78 X_2 + 2.64X_1 \quad (17)$$

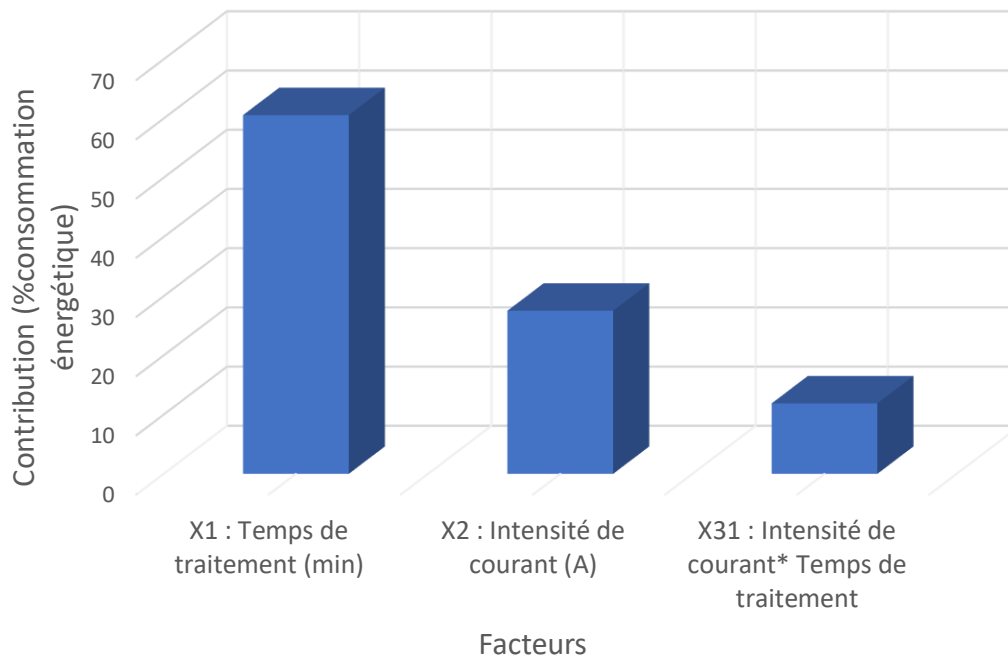
**Tableau 4-7 Contribution des facteurs principaux et interactions sur les réponses**

Réponse	Facteurs	% de contribution
Siccité	X <sub>2</sub> : Intensité de courant (A)	0.15
	X <sub>23</sub> : Intensité de courant* Concentration polymère	2.09
	X <sub>3</sub> : Concentration polymère (kg/tbs)	97.19
	X <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)	0.29
	X <sub>13</sub> : Temps de traitement* Concentration polymère	0.15
Consommation énergétique	X <sub>2</sub> : Intensité de courant (A)	27.53
	X <sub>31</sub> : Intensité de courant* Temps de traitement	11.89
	X <sub>1</sub> : Temps de traitement (min)	60.57



**Figure 4-7 Contribution des facteurs et interactions sur la siccité**

D'après le tableau 4-7 et figure 4-7, la concentration en polymère contribue à elle seule à 97.19 % sur la variation de la siccité, ce qui est proche de la contribution précédente calculé avec quatre facteurs. En deuxième position, nous avons l'interaction intensité de courant\*concentration de polymère avec 2.09% de contribution. Pour les autres facteurs principaux et interactions leurs contribution est nulle.



**Figure 4-8 Contribution des facteurs et interactions sur la consommation énergétique**

Il y a deux facteurs principaux et une interaction (intensité de courant\*temps de temps de traitement) qui influence la consommation énergétique (figure 4-8). En première place le temps de traitement qui a une contribution de 60.57% à la réponse, suivit de l'intensité de courant avec 27.53%. L'interaction temps de traitement\*intensité de courant quant à elle, a une contribution de 11.98%. La contribution du polymère est négligeable.

- **Plan composite central et conditions optimales**

Dans le tableau suivant, les essais de contrôles CONT-1 et CONT-3 sont des tests dans lesquels les boues de fosse septiques n'ont reçu de traitement par ni d'acidification, elles sont flocculées et filtrées seulement. Les tests contrôles ont permis le calcul du pourcentage de réduction de masse des boues générées à la fin du processus de traitement. L'essai contrôle permet également de montrer que les quantités de polymère utilisées dans la floculation des boues traitées est inférieure à celle des boues non traitées.

**Tableau 4-8 Résultats du plan composite central ainsi que l'évolution de la réduction de masse des boues après traitement**

Tests	Facteurs			Réponses		Réduction de masse % (p/p)
	Polymère kg/tbs	Courant A	Temps min	Siccité % (p/p)	CE KWh/m <sup>3</sup>	
CONT-1	1	-	-	2.10	-	-
CONT-3	5	-	-	7.81	-	-
<b>1</b>	6	0.6	25	15.44	2.28	67.87
<b>2</b>	1	0.6	25	22.60	2.73	78.05
<b>3</b>	5	0.8	16	21.77	2.18	77.21
<b>4</b>	4	0.6	25	20.27	2.63	75.53
<b>5</b>	4	0.6	25	19.86	2.48	75.03
<b>6</b>	2	0.8	34	27.93	4.85	82.24
<b>7</b>	2	0.4	34	27.24	1.81	81.79
<b>8</b>	4	0.6	25	26.14	2.50	81.03
<b>9</b>	4	0.2	25	24.16	0.52	79.47
<b>10</b>	5	0.4	34	28.28	1.79	82.46
<b>11</b>	4	1	25	18.83	4.92	73.66
<b>12</b>	5	0.4	16	22.43	0.81	77.89
<b>13</b>	2	0.4	16	28.58	0.84	82.65
<b>14</b>	4	0.6	25	21.92	2.50	77.38
<b>15</b>	4	0.6	40	17.39	4.08	71.48
<b>16</b>	4	0.6	25	20.69	2.40	76.02
<b>17</b>	2	0.8	16	26.17	2.24	81.05
<b>18</b>	5	0.8	34	14.32	4.62	65.37
<b>19</b>	4	0.6	25	25.06	2.68	80.21
<b>20</b>	4	0.6	10	21.83	1.00	77.28

La meilleure siccité a été obtenue au niveau du test 13 dans les conditions suivantes : un temps de traitement de 16 minutes avec une intensité de courant appliqué de 0.4 A et 2 kg/tbs de polymère ajouté lors de la floculation. Cela a permis d'obtenir une siccité de 28% environ, ce qui a réduit la masse des boues septique de 82% environ avec une consommation énergétique 0.8 KWh/m<sup>3</sup>. Des résultats de siccité proche ont été obtenus lors des tests 6 et 10 mais les résultats de leur consommation énergétique sont 2 à 6 fois plus grands que celui du test 13. Cela est dû au temps de traitement et à l'intensité de traitement qui sont plus élevés au niveau des tests 6 et 10.

En comparant le test 13 et 12 qui ont les mêmes conditions de traitement électro-oxydatif sauf pour la quantité de polymère ajoutée lors de la floculation. Lors du test 12, 5 kg/tbs de polymère a été ajoutés qui est supérieure à la quantité ajoutée lors du test 13, mais la siccité obtenue a été bien

inférieur dans le test 12. Cela peut être expliqué par une surdose de polymère, comme l'explique (Wu., Huang. and Lee 1997) une surdose de polymère fragilise les floes et augmente la viscosité ce qui réduit l'efficacité de déshydratation.

Les équations modèles des réponses siccité et consommation énergétique sont :

$$\text{Siccité} = 23 - 4.51X_3 - 3.38X_2 - 1.05X_1 \quad (18)$$

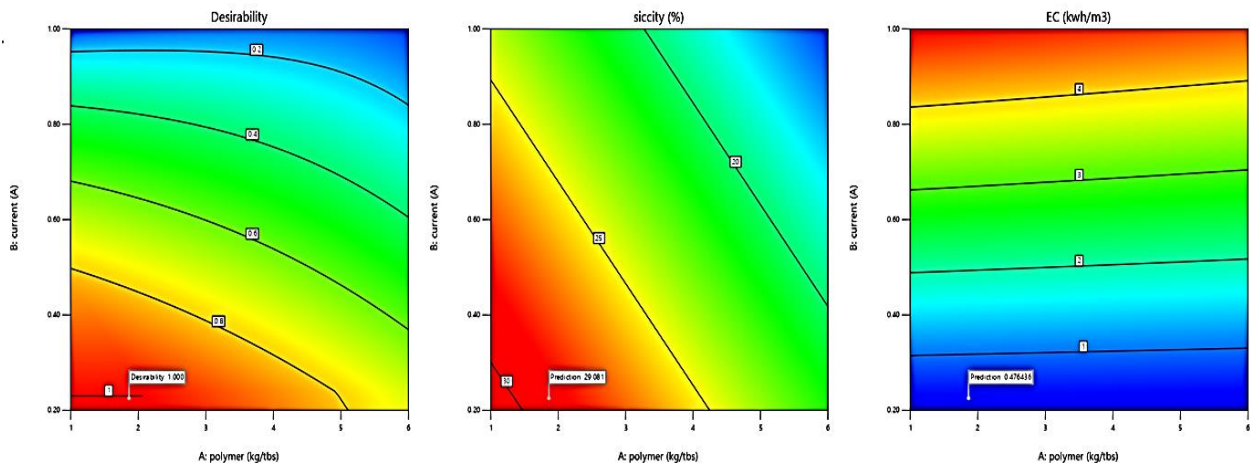
$$\text{Consommation énergétique} = 2.5 + 1.3X_1X_2 + 2.19 X_2 + 1.5X_1 \quad (19)$$

- **Optimisation des conditions expérimentales**

Pour déterminer les conditions optimales de traitement et de conditionnement en termes de coût et d'efficacité, la consommation d'énergie électrique pendant le processus d'électrolyse doit être prise en compte. Pour cela en utilisant le logiciel (Design-Expert 13, 2021, Stat-Ease Inc., Minneapolis), deux critères ont été imposés : i) maximiser la siccité; ii) minimiser la consommation énergétique.

Les conditions optimales obtenue sont :

- ✓ Temps de traitement : 25 minutes
- ✓ Intensité de courant : 0.22 A
- ✓ Quantité de polymère : 2 kg/tbs



**Figure 4-9 Conditions optimales du processus de traitement des BFS**

Les prédictions de la siccité et de la consommation énergétique à partir des conditions optimales sont :

- ✓ Siccité : 29.1 %
- ✓ Consommation énergétique : 0.47 KWh/m<sup>3</sup>

La figure 4-9 donne une idée sur la localisation des conditions optimales de traitement, ainsi que les prédictions sur la siccité et consommation énergétique.

- **Validation des prédictions des conditions optimales**

Pour valider les prédictions des tests en triplicata en été testé, le résultat de la siccité est de 27.13% ±0.23. Tandis que la consommation énergétique est 0.54 kWh/m<sup>3</sup> ±0.02, ce qui est proche de la prédiction. Parmi les paramètres pouvant influencer la siccité, il y a la concentration des solides totaux dans les boues de fosses septiques. Le modèle a été élaboré à partir des boues de fosses septiques ayant une concentration de solides totaux de 10.98 g/L environ de solides totaux. En testant sur d'autres boues septiques qui ont une concentration de solides totaux plus élevée, la siccité a varié un petit peu comme le montre le tableau suivant.

**Tableau 4-9 Résultats de la siccité en fonction du changement de la concentration des solides totaux**

Concentration en solides totaux g/L	Siccité % (p/p)
13.6±0.71	30.55±4.74
18.5±0.85	27.67±0.75
19.9±0.14	26.93±1.08



### 4.3. Application des conditions optimales sur les boues de Rouyn Noranda et comparaison avec les boues de Portneuf

#### 4.3.1. Consommation et coûts des réactifs

Les conditions optimales déterminées lors du conditionnement électrolytique des boues de Portneuf ont été appliquées sur les boues de fosse septique issues de Rouyn Noranda. Le tableau 4-10 compare les conditions opératoires ainsi que les principaux résultats de déshydratation des boues traitées et non traitées, les coûts de consommation de réactif (polymère) et d'énergie électrique (électrolyse).

**Tableau 4-10 Essais de conditionnement et électrolytique des boues de fosses septiques de Rouyn Noranda Boue 2 et comparaison avec les boues de Portneuf Boue 1**

Paramètres	Boues 1		Boues 2	
	Non traitées	Traitées	Non traitées	Traitées
Solides totaux (g/L)	10.98	10.98	13.6± 0.71	13.6± 0.71
pH final	6.19	4	7.15	4
Intensité de courant (A)	-	0.22	-	0.22
Temps d'électrolyse (min)	-	25	-	25
Conductivité initial (mS/cm <sup>2</sup> )	2.53	2.53	1.83	1.83
Unité de filtration	SV	SV	SV	SV
Temps de filtration (min)	5	5	5	5
<b>Consommation (kg/tbs)</b>				
Énergie (KWh/m <sup>3</sup> )	-	0.5	-	0.5
Polymère (Kg/tbs)	5	1	4	2
Réactif (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) (kg/tbs)	-	90	-	87.85
<b>Déshydratation</b>				
Siccité finale (%)	4.96	27.13	9.12	30.5
Réduction de la masse (%)	-	81.72	-	70.09
<b>Coûts réactifs (\$/tbs)</b>				
Réactifs (\$/tbs)	35	23	28	22.78
Énergie (\$/tbs)	-	4.09	-	3.31
Coût total (\$/tbs)	35	27.09	28	26.09

SV : unité de filtration sous vide ayant une surface filtrante de 176 cm<sup>2</sup>

Le tableau 4-10 résume la caractérisation physico-chimique, les paramètres de traitements appliqués, les résultats obtenues et l'estimation des coûts du traitement. Pour chaque échantillon deux types de tests ont été faits. Une première série de tests consiste à effectuer des tests contrôles au cours desquels les boues sont uniquement floculées. Une deuxième série de tests consiste à

effectuer des traitements électro-oxydatifs des boues en appliquant les conditions optimales obtenues suivi du conditionnement. Dans la dernière section les coûts des réactifs (acide et polymère) sont estimés selon les coûts prédéfinis dans la section "Matériels et méthodes", ainsi que le coût total de chaque type de tests.

En commençant par les paramètres initiaux les boues 2 sont plus concentré en solide totaux que les boues 1. Pour le test contrôle du premier échantillon, les boues 1 ont été flocculées avec 1 et 5 kg/tbs de polymère ce qui a donné une siccité moyenne de 4.96%. La siccité est passée 27.13% suite à l'application du traitement électro-oxydatif dans les conditions optimales. Le coût du conditionnement seulement des boues non traitées en présence de 5 kg polymère/tbs revient à 35 \$CAN/tbs. En comparaison, le traitement électro-oxydatif suivi du conditionnement avec 2 kg polymère/tbs revient à environ 27 \$CAN/tbs (incluant seulement les coûts en polymère et en énergie). En outre, le procédé électro-oxydatif a permis une réduction de masse d'environ 81% de la masse des boues à gérer (Boue -1 issue du site de Rouyn Noranda).

Les boues 2 non traitées (issues du site de Portneuf), ont été conditionnées avec 2 et 4 kg/tbs de polymère. Une siccité moyenne de 9.12% a été enregistrée pour les boues non traitées. En comparaison, les boues-2 soumises au traitement électro-oxydatif suivi du conditionnement (par ajout de 2 kg/tbs de polymères) permet d'obtenir 30.5% de siccité. Cette hausse de la siccité permet de réduire de 70% la masse de boues à gérer.

À ces coûts d'opération (ci-dessus présentés), il faudrait ajouter les coûts relatifs à la disposition finale des boues (transport, enfouissement ou épandage). Si on considère que le site de Rouyn Noranda (Boue-1) produit par exemple 1 tonne de boue sèche (tbs) par jour et en considérant la siccité moyenne des boues traitées de 27.1% (p/p), une quantité de 3.69 tonnes de boues humides serait produite par jour. En comparaison, une quantité de 20.2 tonnes de boues humides serait produite dans le cas des boues non traitées ayant une siccité moyenne de 4.96% (p/p). En considérant un coût de transport et de disposition de 75 \$CAN/t.m. (prix moyen régulièrement fixé sur le marché pour disposer des déchets valorisables) la disposition des boues non traitées entraînerait des coûts de 1515 \$ par jour, comparés à 277 \$ requis pour la disposition des boues traitées. Finalement, pour une tonne de boues sèches produite par jour par le site de Rouyn Noranda (Boue-1), un coût total de 1550 \$ (incluant conditionnement, transport et disposition) serait requis

pour la gestion des boues non traitées, alors qu'un coût de 304\$ serait nécessaire pour la gestion des boues traitées par le procédé électrolytique.

En ce qui concerne le site de Portneuf (Boue-2), une quantité de 3.33 tonnes de boues humides serait produite par jour si on suppose que ce site produit 1 tonne de boue sèche par jour et en considérant une siccité de 30% (p/p) des boues traitées. Par comparaison, une quantité de 10.96 tonnes de boues humides serait produite dans le cas des boues non traitées ayant une siccité moyenne de 9.12% (p/p). En considérant un coût de transport et de disposition de 75 \$CAN/t.m. (prix moyen régulièrement fixé sur le marché) la disposition des boues non traitées entraînerait des coûts de 822 \$ par jour, comparés à 250 \$ requis pour la disposition des boues traitées. Finalement comme le montre le tableau 4-11, pour une tonne de boues sèches produite par jour par le site de Portneuf (Boue-2), un coût total de 850 \$ (incluant conditionnement, transport et disposition) serait requis pour la gestion des boues non traitées, alors qu'un coût de 276 \$ serait nécessaire pour la gestion des boues traitées par voie électrolytique.

**Tableau 4-11 Calcul du coût total du processus de traitement et disposition des Boue-2 (Site de Portneuf)**

Paramètres	Boues non traitées	Boues traitées
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> \$CAN/tbs	0.00	8.78
Électricité \$ CAN/tbs	0.00	3.31
Polymère \$ CAN/tbs	28	14
Disposition \$ CAN/tbs	822	250
Coûts total \$ CAN/tbs	850	276

#### 4.3.2. Métaux et éléments nutritif

Le tableau 4-11 représente une analyse de métaux dans les boues déshydratées traitées et non traitées de deux échantillons de Rouyn Noranda (Boue 2 et Boue 3), ainsi que le critère de conformité des contaminants chimiques C (C1 et C2) du guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes. Il y a deux catégories dans les critères en lien avec les contaminants chimique. Pour être de la catégorie C1, tous les paramètres doivent respecter les teneurs limites C1. Pour être C2, tous les paramètres doivent respecter les teneurs limites C2 et doit excéder la limite C1. L'application du traitement électro-oxydatif a augmenté la concentration de certains

éléments dans la fraction solide. Cette augmentation est dû à l'électro-oxydation des BFS où les composant soluble se trouve s'échappe dans le filtrat des boue (Kocbek, Garcia et al. 2022).

Comme on peut le voir dans le tableau 4-11, les concentrations résiduelles du calcium, magnésium et sodium après électro-oxydation leur concentration a baissé dans les boues sèche mais elle a augmenté dans la fraction liquide, comme le montre le tableau. Prenant exemple de Boue 3 non traitée puis traitée, le calcium est passé respectivement de 18 200 mg/kg à 3940 mg/kg dans la fraction solide (tableau 4-12). Alors que dans la fraction liquide sa concentration a augmenté respectivement de 98.5 à 284 mg/L (tableau 4-13).

**Tableau 4-12 Concentrations (mg/kg) de métaux dans la fraction solide des boues de fosses septiques (Rouyn Noranda) traitées et non traitées en appliquant les conditions optimales**

Éléments	Boue 2		Boue 3		Critères MRF	
	Non traitée	Traitée	Non traitée	Traitée	C1	C2
Cd (mg/kg)	1.3	1.6	2.7	2.9	<b>3</b>	<b>10</b>
Ca (mg/kg)	23 700	4 220	18 200	3 940	-	-
Cr (mg/kg)	20	21	24	26	<b>210</b>	<b>1 000</b>
Cu (mg/kg)	310	395	157	223	<b>400</b>	<b>1 000</b>
Mg (mg/kg)	1 590	1 110	2 150	1 060	-	-
Ni (mg/kg)	16	17	17	19	<b>62</b>	<b>180</b>
Pb (mg/kg)	176	212	13	15	<b>120</b>	<b>300</b>
K (mg/kg)	712	556	530	366	-	-
Na (mg/kg)	1 160	860	300	217	-	-
Zn (mg/kg)	977	1 260	1070	1 170	<b>700</b>	<b>1 850</b>

**Tableau 4-13 Concentrations (mg/L) des éléments nutritifs métaux dans la fraction liquide des BFS traitées et non traitées en appliquant les conditions optimales (Boue 3, Rouyn Noranda)**

Éléments	Filtrat de boue non traité	Filtrat de boue traité
Cd (mg/L)	0.0003	<0.0001
Ca (mg/L)	98.5	284
Cr (mg/L)	0.0021	0.0044
Cu (mg/L)	0.0513	0.0276
Mg (mg/L)	21.9	26.9
Hg (mg/L)	0.0002	0.0005
Ni (mg/L)	0.011	0.151
Pb (mg/L)	0.020	79.6
K (mg/L)	76.3	0.004
Na (mg/L)	247	255
Zn (mg/L)	0.233	0.260
Azote total Kjeldahl (mg/L)	311	307
Cl (mg/L)	364	359
DCO (mg/L)	1 580	1 280
Pt (mg/L)	49.8	68.5
SO4 (mg/L)	<5	1970

L'augmentation de la concentration des composants non solubles comme le plomb et le cuivre dans la fraction solide est dû à l'électro-oxydation qui a aidé leurs précipitation (Kocbek, Garcia et al. 2022).

En prenant exemple du cuivre et du plomb, dans les boues 3 niveau de la fraction solide leurs concentrations a augmenté de 157 à 223 mg/kg et de 13 à 15 mg/kg respectivement. Alors que dans la partie liquide dans le tableau 24, leurs concentrations ont baissés de 0.0513 à 0.0276 mg/L et 76.3 à 0.004 mg/L.

D'autre composant comme les sulfates ont augmenté dans le tableau 4-13 dû à l'ajout de l'acide sulfurique pour atteindre le pH 4. La DCO n'a baissé que de 18 % passant de 1580 à 1280 mg/L.

Les boues sèches traitées respectent le critère C1 sauf le zinc qui C2 pour les Boues 3. Mais pour les Boues 2, le zinc et le plomb ne respectent pas le critère C1 mais entre dans le C2. Ce qui fait que les deux échantillons respectent le critère C2 et donc peuvent être utilisées comme matière résiduelle fertilisante.

### 4.3.3. Microorganismes indicateurs de pathogènes

Le tableau 4-14 ci-dessous montre les résultats de l'analyse microbiologique dans la fraction solide des boues 2 et 3. En appliquant une intensité de courant de 0.22 A et après 25 minutes de traitement par le processus d'électro-oxydation 98 et 99.81% de l'E. Coli ont été éliminés au niveau des boues 2 et 3 respectivement en comparant les résultats des boues sèches non traitées avec les boues sèches traitées.

**Tableau 4-14 Dénombrement des coliformes fécaux et totaux dans les boues non- traitées et traitées de deux échantillons dans la fraction solide des BFS ainsi que le pourcentage de désinfection (boues déshydratées)**

Microorganismes	Boues 2		Boues 3		Critère MRF	
	Non traitées	Traitées	Non traitées	Traitées	P1	P2
<b>Concentrations (UFC/g s.)</b>						
E. coli	19 000	<380	210 000	410	-	<2000000
Coliformes totaux	100 000	<380	1 900 000	1 600	<1000	-
<b>Abattement (%)</b>						
E coli	-	98	-	99.81	-	-
Coliformes totaux	-	99.62	-	99.92	-	-

Le critère des pathogènes dans le guide de gestion des MRF se compose de deux catégories P1 et P2. La catégorie P1 représente la catégorie où il y a moins de 1000 UFC/g sec de coliformes totaux, cependant la catégorie P2 limite les E. Coli à 2 000 000 UFC/g sec.

**Tableau 4-15 Dénombrement des coliformes fécaux et totaux dans la fraction liquide (obtenues après déshydratation) des Boues 3 non- traitées et traitées ainsi que le pourcentage de désinfection**

Microorganismes	Filtrat de boues non traitées	Filtrat de boues traitées
<b>Concentrations (UFC/100 mL)</b>		
E. coli	>80 000	91
Coliformes totaux	>800 000	14 000
Colif. thermotolérants	>60 000	610
<b>Abattement (%)</b>		
E coli	-	99.89
Coliformes totaux	-	98.25
Colif. thermotolérants	-	98.98

Dans le tableau 4-15, en comparant la fraction liquide des Boues 3 non traitées et traitées, le processus de traitement a permis une désinfection 98.2% au niveau de l'E. Coli. Ce procédé de traitement par électro-oxydation a permis la désinfection de plus 98% des E. Coli, coliformes totaux et thermotolérants.

Il est à noter que les odeurs, lorsque l'acide a été ajouté une nette amélioration de l'odeur a été remarqué. L'odeur du filtrat traité est peu odorante comme les boues traitées déshydratées et pouvant être classées dans la catégorie O1. Le filtrat non traité et les boues non déshydratées sont de catégorie O2.

Les boues de fosses septiques traitées et déshydratées respectent les normes de recyclage des matières résiduelles fertilisantes, et peuvent donc être utilisées dans différents contextes comme le montre le tableau 1-9, dans les colonnes P2 et E2.

## 5. Conclusion et recommandations

Cette recherche a contribué à l'élaboration d'un procédé électrochimique destiné au traitement de stabilisation et conditionnement des boues de fosses septiques.

L'utilisation de l'électro-oxydation dans le traitement des boues de fosses septiques s'est avérée efficace pour éliminer les indicateurs de pathogènes, réduisant de plus de 2 à 4 unités logarithmiques les coliformes fécaux (comparaison entre les boues brutes flocculées et les boues traitées flocculées) ainsi que les odeurs désagréables. À partir des conditions optimales de traitement qui sont : une intensité de courant appliquée de 0.22 A, un temps de traitement de 25 minutes et une floculation avec 2 kg/tbs de polymère, cette approche a conduit à une augmentation de la siccité (passant de 5% et 9% respectivement à 27% et 30.5% de pourcentage de solides par rapport aux boues non traitées), réduisant ainsi la production de boues déshydratées (avec une réduction allant jusqu'à 81% du poids des boues). En comparant les coûts d'opération (incluant seulement les coûts en énergie et réactifs) du processus électrolytique avec celui de la déshydratation traditionnelle, les coûts sont passés de 35 \$CAN/tbs à 27 \$CAN/tbs, soit une réduction d'environ 23% pour les boues de Portneuf.

Les boues traitées et déshydratées entrent dans les catégories C2, O1, E1 et P2 du guide de recyclage des MRF. Ces boues peuvent être utilisées dans divers domaines tels que les prairies, la culture de maïs et de céréales pour l'alimentation humaine, la sylviculture, et la végétalisation des zones dégradées. Grâce à ce procédé qui permet de préserver les nutriments, ces boues ont un potentiel en tant que ressource précieuse dans l'agriculture, notamment comme matière fertilisante, compost et pour la réhabilitation des sols.

L'étude spécifique sur les boues de fosses septiques a révélé les points suivants :

- Le traitement électrochimique permet d'assurer une désinfection de plus de 99% des E. coli et des coliformes fécaux.
- L'augmentation de la siccité grâce à l'électro-oxydation a permis de réduire la quantité de polymère ajouté, ainsi que la diminution de la masse des boues générées.
- L'acidification et l'électro-oxydation ont contribué à réduire l'odeur des boues de malodorante (catégorie O2) à peu odorante (catégorie O1) à travers le test olfactif effectué.



- Le procédé électrochimique contribue à préserver la valeur fertilisante des boues.
- Les coûts de traitement sont d'environ  $26.59 \pm 0.5$  \$CAN/tbs en faisant la moyenne des coûts de Portneuf et Rouyn Noranda.

Cependant, des limites ont été identifiées, notamment l'efficacité du traitement liée à la concentration totale de solides dans les boues. Bien que la mousse ait été réduite, elle n'a pas été totalement dissoute, et les boues n'ont pas été testées s'il y a présence des composés organiques toxiques tels que le chloroforme, le chlorophénol et le dichlorométhane, ainsi que les PFAS.

Cette étude représente une première étape, soulignant la nécessité de poursuivre les travaux expérimentaux pour :

- Neutraliser le pH des boues sèches, actuellement acide autour de 4, par un traitement alcalin, visant à atteindre la catégorie P1.
- Étudier les composants organiques toxiques et les contaminants émergents dans les boues, et améliorer le processus si nécessaire.
- Tester le procédé à l'échelle préindustrielle pour élargir son domaine d'application.

En réflexion, ce projet met en lumière l'importance de considérer les défis comme des opportunités cachées. Les boues septiques, souvent perçues comme de simples déchets, ont le potentiel d'être un catalyseur de ressources pour les régions isolées, les orientant vers une croissance durable et l'autosuffisance.

## 6. Références

- 1) Abitibi-Témiscamingue, S. d. l. e. s. (2010). Gouvernance des eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue État de situation 2010.
- 2) Abdelhay, A., et al. (2019). "Dairy wastewater remediation using electrochemical oxidation on boron doped diamond anode (BDD)." *Desalination and Water Treatment* 171: 177-182.
- 3) Andreoli, C. V., et al. (2015). *SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL*. UK, IWA Publishing.
- 4) Benkaraache, A. (2017). Étude d'une filière technologique d'épuration des eaux usées domestiques pour les collectivités en milieu nordique (Cas du village de Salluit).
- 5) Brandes, M. (1978). "Accumulation Rate and Characteristics of Septic Tank Sludge and Septage." *Water Pollution Control Federation* 50(5): 936-943.
- 6) Chakchouk, I., et al. (2017). "A Combined Electrocoagulation-Electrooxidation Treatment for Dairy Wastewater." *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 34(1): 109-117.
- 7) Cheng, W., et al. (2012). "Optimal experimental conditions for hydrogen production using low voltage electrooxidation of organic wastewater feedstock." *International journal of hydrogen energy* 37(18): 13304-13313
- 8) Corbeil, C. (2010). "ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES DE RÉSIDENCES ISOLÉES APPROCHE DE MISE AUX NORMES." *Vecteur environnement* 43(2): 32.
- 9) Daghbir, R., et al. (2014). "Electrochemical treatment of domestic wastewater using boron-doped diamond and nanostructured amorphous carbon electrodes." *Environmental Science and Pollution Research* 21: 6578-6589

- 10) Direction des eaux municipales (2015). TRAITEMENT DES EAUX USÉES DES RÉSIDENCES ISOLÉES. Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- 11) Drogui et al. 2014, Electrochemical stabilization and preconditioning process for municipal and industrial sludge, Canadian Patent No. CA 2,511,091
- 12) Environnement Canada and Technologies Saint-Laurent (2003). TECHNOLOGIE JUGGLER MC UNITÉ MOBILE ÉCO-EFFICACE POUR LA VIDANGE DES FOSSES SEPTIQUES. Saint-Laurent Vision 2000.
- 13) Ernest, T. M. and W. C. John (1978). Treatment of septic tank effluent New Mexico State University 92.
- 14) Fowler, J., R. M. Bagby and E. Trainer (1996). Dewatering sewage sludge with geotextile tubes. Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference, Canadian Geotechnical Society, St. John's, NL, Canada.
- 15) GRAY, N. F. (1995). "The Influence of Sludge Accumulation Rate on Septic Tank Design." Environmental Technology 16: 795-800.
- 16) Gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement et ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 1991, Valorisation agricole des boues de station d'épuration des eaux usées municipales, Guide de bonnes pratiques, 91 pages.
- 17) Hedström, A. and J. Hanaeus (1999). "Natural freezing, drying, and composting for treatment of septic sludge." JOURNAL OF COLD REGIONS ENGINEERING 13(4): 167-179.
- 18) Hyrycz, M., et al. (2022). "A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives." Sci Total Environ 820: 153328.

- 19) Kruthika, N. L., et al. (2013). "Efficacy of electrocoagulation and electrooxidation for the purification of wastewater generated from gelatin production plant." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 1(3): 183-188
- 20) Kinsley, C., et al. (2006). *Impact of Water Softeners on Septic Tanks Field Evaluation Study*. C. M. a. H. Corporation, Ontario Rural Wastewater Centre – University of Guelph.
- 21) Kocbek, E., et al. (2022). "Novel semi-decentralised mobile system for the sanitization and dehydration of septic sludge: a pilot-scale evaluation in the Jordan Valley." *Environ Sci Pollut Res Int* 29(28): 42016-42036.
- 22) Lim, J. W., J. A. Chiam and J. Y. Wang (2014). "Microbial community structure reveals how microaeration improves fermentation during anaerobic co-digestion of brown water and food waste." *Bioresour Technol* 171: 132-138.
- 23) Liu, F. (2020). *Remediation of soil contaminated by organic pollutants using Tween 80 and electrochemical advanced oxidation processes*, University of Paris-Est; University of de Wuhan PhD.
- 24) Lossing, H., P. Champagne and P. J. McLellan (2010). "Examination of sludge accumulation rates and sludge characteristics for a decentralized community wastewater treatment systems with individual primary clarifier tanks located in Wardsville (Ontario, Canada)." *Water Sci Technol* 62(12): 2944-2952.
- 25) Lu, Y., et al. (2017). "Significances of deflocculated sludge flocs as well as extracellular polymeric substances in influencing the compression dewatering of chemically acidified sludge." *Separation and Purification Technology* 176: 243-251.
- 26) Ma, J., et al. (2017). "Flocculation properties and kinetic investigation of polyacrylamide with different cationic monomer content for high turbid water purification." *Separation and Purification Technology* 182: 134-143.

- 27) Marc Hébert (2015). Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes : Critères de référence et normes réglementaires: 216.
- 28) Mathioudakis, V. L., et al. (2013). "Sewage sludge solar drying: experiences from the first pilot-scale application in Greece." *Drying Technology* 31(5): 519-526.
- 29) Mendez, J. M., B. E. Jimenez and J. A. Barrios (2002). "Improved alkaline stabilization of municipal wastewater sludge." *Water Science and Technology* 46(10): 139-146.
- 30) Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (2014). Vers une gestion optimale des fosses septiques au Québec État de situation sur la gestion des boues de fosses septiques. Québec.
- 31) MRC d'Abitibi (2016-2020). Plan de gestion des matières résiduelles: p.49.
- 32) MRC de la Vallée de l'Or (2015). Projet de plan de gestion des matières résiduelles 2016-2020.
- 33) Organisme de bassin versant Abitibi-Jamésie (2020). rapport sur l'état des eaux en Abitibi.
- 34) Patrick Drogui, et al. (2005). Procédé électrochimique de conditionnement et de stabilisation des boues d'épuration municipales et industrielles. Office de la propriété intellectuelle du Canada. Ca. 2511091C.
- 35) Patrick Drogui, Jean-Francois Blais et Guy Mercier. 2007. « Review of Electrochemical Technologies for Environmental Applications. » *Recent Patents on Engineering*, 1(3), 257-272.
- 36) Régie Intermunicipale Argenteuil Deux-Montagnes (2003). Plan de gestion des matières résiduelles, MRC D'ARGENTEUIL.
- 37) Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (2018). Loi sur la qualité de l'environnement. Q-2,r.22, RLRQ.

- 38) RMC de La-Vallée-de-l'Or (2015). *Projet de Plan de gestion des matières résiduelle*.
- 39) Rodriguez-Canche, L. G., et al. (2010). "Pathogen reduction in septic tank sludge through vermicomposting using *Eisenia fetida*." *Bioresour Technol* 101(10): 3548-3553.
- 40) Shukla, A., et al. (2022). "A review on generation, characterization, containment, transport and treatment of fecal sludge and septage with resource recovery-oriented sanitation." *Environ Res* 216(Pt 1): 114389.
- 41) Singh, S., et al. (2017). "Technology options for faecal sludge management in developing countries: Benefits and revenue from reuse." *Environmental Technology & Innovation* 7: 203-218.
- 42) Ted Mulhern and Marc Bacon (2006). "FULL SCALE DEMONSTRATION OF PLASMA ASSISTED SLUDGE OXIDATION." *Water Environment Federation* 2(2006): 988-1001.
- 43) Trelu, C., et al. (2016). "Combination of anodic oxidation and biological treatment for the removal of phenanthrene and Tween 80 from soil washing solution." *Chemical Engineering Journal* 306: 588-596.
- 44) Un projet pour lutter contre les GES des fosses septiques, Journal « le citoyen » Rouyn-Noranda Abitibi-Ouest, 25/06/2021
- 45) Wu., C. C., C. Huang. and D. J. Lee (1997). "Effects of polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties " *Colloids and Surfaces* 122: 89-96.
- 46) Un projet pour lutter contre les GES des fosses septiques, Journal « le citoyen » Rouyn-Noranda Abitibi-Ouest, consulté le 25/06/2021
- 47) Dépliant informatif sur les fosses septiques de la MRC de Charlevoix-Est, mars 2014
- 48) <https://www.ricbs.qc.ca/les-tarifs/> (consulté le 18/12/2023)

