

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

**OPTIMISATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRES POUR LA DÉSHYDRATATION
DES BOUES D'ÉPURATION PAR LA TECHNIQUE DE GEL/DÉGEL EN RÉGIONS
NORDIQUES (CAS DU VILLAGE DE SALLUIT)**

Par
Oumaima TAZI

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Science, M. Sc. en Sciences de l'Eau

Jury d'évaluation

Examinatrice interne	Madame Satinder Kaur Brar INRS-ETE, Université du Québec
Examineur externe	Monsieur Mustapha Mahi ONÉE - Rabat
Directeur de recherche	Monsieur Jean-François Blais INRS-ETE, Université du Québec
Co-directeur de recherche	Monsieur Guy Mercier INRS-ETE, Université du Québec
	Madame Lucie Coudert IRME-UQAT

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de recherche, le professeur Jean-François Blais, pour sa disponibilité et de m'avoir guidée tout au long de cette année.

Je souhaite adresser mes profonds sentiments de reconnaissance et de respect, et remercier sincèrement Lucie Coudert, ma co-directrice de recherche, pour ses orientations, encouragements, et directives qui ont contribué à la réussite de ce travail. Je remercie également le professeur Guy Mercier, mon co-directeur de recherche, d'avoir accepté de m'encadrer durant mes études.

Je remercie aussi Nassima Kemache pour l'aide et les conseils qu'elle m'a apportée durant mes études, et Justine Dionne pour sa précieuse aide à la relecture et à la correction de mon mémoire, ainsi que toute l'équipe pour leur disponibilité à tout moment.

Tous mes remerciements à Monsieur Kamal El Haji, directeur de l'ISHÉDD, de m'avoir orientée et soutenue tout au long de mes études.

Ces remerciements vont également au corps professoral et administratif de l'INRS, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et les grands efforts qu'ils déploient pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je remercie vivement mes parents et ma famille pour leur soutien et leurs encouragements ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de mon travail.

RÉSUMÉ

Au Canada, de nombreuses communautés nordiques sont aux prises avec une problématique environnementale liée à la gestion des eaux usées. Les systèmes primaires et secondaires de traitement des eaux usées produisent des quantités importantes de boues d'épuration. Ces boues contiennent de la matière organique pouvant être utilisée comme fertilisant, et des éléments indésirables, tels que des agents pathogènes et des contaminants chimiques qui sont potentiellement dangereux pour l'homme, la faune et la flore. Afin de gérer ces boues produites lors du traitement des eaux usées, une étape de déshydratation des boues d'épuration par la technique de gel/dégel a été proposée à cause du climat froid, la présence du gel durant une bonne partie de l'année et l'insuffisance de moyens d'assainissement que rencontrent ces communautés.

Cette technique permet, en premier lieu, la séparation solide/liquide qui s'effectue par la cristallisation de l'eau contenue dans les boues. Les cristaux repoussent les impuretés concentrées, ce qui favorise leur agglomération. En second lieu, les floccs produits sont déshydratés, puis compactés sous l'effet de la progression de la glace vers eux. Après le dégel, le drainage de l'eau à travers les granules laisse un résidu final ayant une siccité plus élevée, permettant ainsi son transport et sa valorisation.

Ce projet de recherche avait comme objectif principal de développer un procédé de déshydratation des boues primaires et/ou secondaires par la technique de gel/dégel en régions nordiques et d'optimiser les critères opératoires, tels que les effets du type de boues, de la teneur initiale en solides totaux, de la température, de la durée de congélation et de la hauteur de boues, de l'ajout de boues successives et des cycles de congélation/décongélation. Un suivi des solides totaux des boues initiales et finales, des matières en suspension présentes dans le lixiviat, de la teneur en carbone organique dissous et des éléments métalliques a été réalisé afin de comparer les performances des différentes conditions testées.

Les résultats obtenus après le traitement par gel/dégel indiquent que le type de boues affecte les teneurs en solides des boues déshydratées et leur contenu en Ca, en K, en Mg et en Na par rapport aux boues initiales. De même, l'épaisseur de la couche de boues congelés et le temps de congélation ont un impact sur les solides totaux des boues déshydratées. En ce qui concerne l'influence de la siccité initiale des boues, plus cette dernière est élevée, plus la siccité finale des boues déshydratées est élevée.

Mots clés : Eaux usées, boues d'épuration, déshydratation des boues, gel/dégel, régions nordiques, solides totaux.

ABSTRACT

In Canada, many northern communities are dealing with environmental issues related to wastewater management. Primary and secondary wastewater treatment systems produce significant amounts of sewage sludge. This sludge contains organic material that can be used as a fertilizer, and undesirable elements, such as pathogens and chemical contaminants, that are potentially harmful to humans, wildlife and plants. In order to manage the sludge produced during wastewater treatment, a sludge dewatering process by the freeze/thaw technique was proposed because of the cold climate, the presence of frost during a good part of the year and the inadequate sanitation facilities that these communities encounter.

This technique allows, in the first place, the solid/liquid separation, which is carried out by the crystallization of the water contained in the sludge. The crystals repel concentrated impurities, which favors their agglomeration. Secondly, the floc produced is dehydrated and then compacted by the progression of the ice towards them. After the thaw, the drainage of the water through the granules leaves a final residue with a higher total solids content, allowing its transport and recovery.

The main objective of this research project is to develop a dewatering method applicable to primary and/or secondary sludge by the freeze/thaw technique in northern regions and to optimize operating criteria such as the effect of the initial total solids content. The effects of the type of sludge, temperature, duration of freezing and height of sludge added, successive addition of sludge, and various cycles of freezing/thawing have been studied. Monitoring of total initial and final sludge solids content as well as suspended solids, dissolved organic carbon content and metallic elements contents in the leachate was completed to compare the performances of the different operating conditions studied.

The results obtained after the freeze/thaw treatment indicate that the sludge type affects the final solids content and the Ca, K, Mg and Na levels compared to the initial sludge. Sludge height and freezing time have also an impact on the resulting total solids content of the dewatered sludge. With regard to the influence of the initial dryness of sludge, the higher the latter, the greater the final dryness becomes important.

Keywords: Sewage, sewage sludge, sludge dewatering, freeze/thaw, northern regions, total solids.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES ÉQUATIONS.....	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVII
INTRODUCTION.....	1
1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES DANS LE NORD.....	3
1.1.1 Aperçu général sur la région étudiée (village de Salluit).....	3
1.1.2 Traitement des eaux usées dans le nord.....	4
1.2 GESTION DES BOUES D'ÉPURATION DANS LE NORD.....	9
1.2.1 Traitement des boues dans le nord	9
1.2.2 Types et caractéristiques des boues d'épuration	10
1.3 RÉGLEMENTATION ET POLITIQUE	15
1.4 TECHNIQUES CONVENTIONNELLES POUR LA DÉSHYDRATATION DES BOUES D'ÉPURATION	19
1.4.1 Centrifugation.....	19
1.4.2 Filtres sous vide	20
1.4.3 Filtres à bandes presseuses.....	21
1.4.4 Filtres à plateaux.....	21
1.4.5 Filtres à membranes.....	23
1.4.6 Pressoirs rotatifs	24
1.4.7 Presses à vis	25
1.4.8 Lits de séchage.....	26
1.4.9 Micro-ondes.....	27
1.4.10 Lits de congélation (gel/dégel)	27
1.4.11 Comparaison des techniques de déshydratation des boues	32
2 HYPOTHÈSES, OBJECTIFS ET ORIGINALITÉ DE RECHERCHE	35
2.1 CONTEXTE	35
2.2 HYPOTHÈSES.....	35
2.3 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	36
2.4 ORIGINALITÉ	37
3 MÉTHODOLOGIE	39
3.1. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE	39
3.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	40
3.2.1. Échantillonnage, préparation et caractérisation des boues	40
3.2.2. Déshydratation des boues d'épuration par gel/dégel.....	41
3.2.3. Méthodes analytiques.....	44
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	47
4.1. CARACTÉRISATION DES BOUES INITIALES	47
4.2. DÉSHYDRATATION DES BOUES PAR GEL/DÉGEL	49
4.2.1. INFLUENCE DU TYPE DE BOUES.....	49
4.2.1.1. SOLIDES TOTAUX DES BOUES INITIALES ET DES BOUES FINALES	49
4.2.1.2. MATIÈRES EN SUSPENSION ET CARBONE ORGANIQUE DISSOUS DU LIXIVIAT	50
4.2.1.3. MÉTAUX ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS DES BOUES INITIALES, FINALES ET DU LIXIVIAT	51
4.2.2. INFLUENCE DE LA HAUTEUR DES BOUES ET DU TEMPS DE CONGÉLATION	54
4.2.2.1. SOLIDES TOTAUX DES BOUES FINALES	54

4.2.2.2.	<i>MATIÈRES EN SUSPENSION ET CARBONE ORGANIQUE DISSOUS DU LIXIVIAT</i>	55
4.2.2.3.	<i>MÉTAUX ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS DES BOUES INITIALES, FINALES ET DU LIXIVIAT</i>	56
4.2.3.	INFLUENCE DE CYCLES DE GEL/DÉGEL	60
4.2.3.1.	<i>SOLIDES TOTAUX DES BOUES INITIALES ET FINALES</i>	60
4.2.3.2.	<i>MATIÈRES EN SUSPENSION ET CARBONE ORGANIQUE DISSOUS DU LIXIVIAT</i>	61
4.2.3.3.	<i>MÉTAUX ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES BOUES INITIALES, FINALES ET LE LIXIVIAT</i>	62
4.2.4.	INFLUENCE DE LA SICCITÉ INITIALE DE BOUES	66
4.2.4.1.	<i>SOLIDES TOTAUX DES BOUES INITIALES ET DES BOUES FINALES</i>	66
4.2.4.2.	<i>MATIÈRES EN SUSPENSION ET CARBONE ORGANIQUE DISSOUS DU LIXIVIAT</i>	67
4.2.4.3.	<i>MÉTAUX ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS DES BOUES INITIALES, FINALES ET DU LIXIVIAT</i>	68
4.2.5.	INFLUENCE DE L'AJOUT SUCCESSIF DE COUCHES DE BOUES	69
4.2.5.1.	<i>SOLIDES TOTAUX DES BOUES INITIALES ET DES BOUES FINALES</i>	69
4.2.5.2.	<i>MATIÈRES EN SUSPENSION ET CARBONE ORGANIQUE DISSOUS DU LIXIVIAT</i>	70
4.2.5.3.	<i>COLIFORMES FÉCAUX DES BOUES INITIALES, FINALES ET DU LIXIVIAT</i>	71
4.2.5.4.	<i>MÉTAUX ET ÉLÉMENTS NUTRITIFS DES BOUES INITIALES, FINALES ET DU LIXIVIAT</i>	74
5.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	77
6.	RÉFÉRENCES	79
ANNEXES	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Performances des marécages pour le traitement des eaux usées domestiques	8
Tableau 1.2	Différents types de boues de station d'épuration des eaux usées (Amorce, 2012).....	11
Tableau 1.3	Teneurs moyennes (% , p p ⁻¹) en éléments nutritifs présents dans les boues d'épuration	12
Tableau 1.4	Principaux agents pathogènes dans les EUM et les fumiers (USEPA, 2000)	13
Tableau 1.5	Teneurs médianes (µg.kg ⁻¹ boues sèches) en composés organiques toxiques présents dans les boues d'épuration américaines (USEPA 1982; AMSA 1987; Blais et Sasseville 1996)	15
Tableau 1.6	Concentrations en métaux (mg.kg ⁻¹ boues sèches) dans les boues d'épuration municipales prescrites dans divers pays	18
Tableau 1.7	Différents paramètres de performances de la déshydratation sur un filtre-pressé à plateaux (Blais, 2016).....	23
Tableau 1.8	Influence du type de boues sur le procédé de gel/dégel (Benkaraache, 2017)	28
Tableau 1.9	Comparaison des différentes techniques de déshydratation (Blais, 2016)	33
Tableau 4.1	Caractéristiques des boues municipales de la station d'épuration de la ville de Québec.....	48
Tableau 4.2	Teneurs en Al et Fe et en éléments nutritifs (%) présents dans les BM en fonction des siccités initiales fixées aux valeurs désirées	48
Tableau 4.3	Teneurs en ST des boues finales (%) obtenues après traitement par gel/dégel en fonction du type de boues.....	50
Tableau 4.4	Teneurs en métaux et éléments nutritifs des boues initiales et des boues finales sèches (%).....	52
Tableau 4.5	Teneurs en métaux et éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et finales en fonction de la hauteur de boues et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation : -10°C , hauteur de congélation = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C).....	59
Tableau 4.6	Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et finales lors de l'application des cycles de gel/dégel	64
Tableau 4.7	Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et les boues finales.....	68
Tableau 4.8	Teneurs en ST (%) mesurées dans les boues initiales et les boues finales en fonction de l'ajout successif de couches de boues	70
Tableau 4.9	Teneurs en CF (UFC/g sec) présents dans les boues mixtes (70/30) initiales, les boues finales ainsi que les lixiviats de déshydratation	73

Tableau 4.10	Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et les boues finales.....	75
---------------------	---	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Localisation géographique du village de Salluit (MERN, 2012)	4
Figure 1.2	Étapes de traitement d'une station d'épuration des eaux usées.....	5
Figure 1.3	Schéma de principe d'une décanteuse centrifugeuse (Blais et Sasseville, 1996)	19
Figure 1.4	Schéma de fonctionnement d'un filtre-presse à plateaux (Blais et Sasseville, 1996)	22
Figure 1.5	Schéma de fonctionnement du procédé du presseur rotatif (Fournier Industries Inc., 2017).....	25
Figure 1.6	Presses à vis. Presse inclinée (a.) ou Presse horizontale (b.) (Turovskiy et Mathai, 2006)	26
Figure 1.7	Coupe type du lit de séchage (Degrémont, 1989)	27
Figure 3.1	Approche expérimentale utilisée au cours du projet	40
Figure 3.2	Photographie montrant la procédure de dégel et d'égouttement des boues d'épuration	42
Figure 3.3	Photographie montrant les colonnes de percolation utilisées lors de la congélation de couches successives de boues et de leur décongélation	44
Figure 4.1	Influence du type de boues (BP - BS - BM 50/50 - BM 70/30 - BM 50/50) sur les performances de déshydratation (siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C, hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C).....	51
Figure 4.2	Influence du type de boues (BP - BS - BM 50/50 - BM 70/30 - BM 50/50) sur les teneurs résiduelles en métaux et en éléments nutritifs dans le lixiviat (siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)	53
Figure 4.3	Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)	55
Figure 4.4	Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation = -10°C , hauteur de congélation = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)	56
Figure 4.5	Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de	

	congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 57	57
Figure 4.6	Influence de cycles de gel/dégel (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation = -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 61	61
Figure 4.7	Effet de cycles de gel/dégel sur les teneurs en MES et COD mesurées dans les lixiviats (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation = -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)..... 62	62
Figure 4.8	Influence de cycles de gel/dégel sur les éléments relargués en solution lors de la déshydratation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 65	65
Figure 4.9	Influence de la siccité initiale de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1 : 0,8% – 2 : 1,5% – 3 : 3% – 4 : 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 66	66
Figure 4.10	Influence de la siccité initiale des boues sur les teneurs en MES et COD présents dans les lixiviats de déshydratation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 0,8 – 1,5 – 3 – 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, hauteur des boues = 10 cm, température de congélation = -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 67	67
Figure 4.11	Influence de la siccité initiale des boues sur les teneurs en métaux et éléments nutritifs (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 0,8 – 1,5 – 3 – 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, hauteur des boues = 10 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)..... 69	69
Figure 4.12	Influence de l'ajout successif des couches de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 4, 6 jours, hauteur des boues = 10, 20, 30, 40 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C) 71	71
Figure 4.13	Influence de l'ajout successif des couches de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 4, 6 jours, hauteur des boues = 40 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)..... 74	74

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1.1	Détermination de la profondeur de gel/dégel d'une couche de boues.....	30
Équation 3.1	Détermination de la siccité des boues.....	45
Équation 3.2	Détermination des matières en suspension	45

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AADNC	Affaires autochtones et développement du Nord Canada
AINC	Affaires autochtones et du Nord Canada
AMSA	<i>Association of Municipal Sewerage Agencies</i>
ARK	Administration régionale Kativik
BP	Boues primaires
BS	Boues secondaires
BM	Boues mixtes
CaO	Oxyde de calcium
CF	Coliformes fécaux
COD	Carbone organique dissous
COT	Carbone organique total
CRREL	<i>Cold regions engineering and research laboratory</i>
<i>E.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EPDM	Éthylène, propylène, diène et monomère
EUM	Eaux usées municipales
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HDPE	Polyéthylène à haute densité
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique - Centre Eau Terre Environnement
K ₂ O	Oxyde de potassium
MAMM	Ministère des affaires municipales et de la métropole
MENV	Ministère de l'environnement
MEO	Ministère de l'éducation de l'Ontario
MERN	Ministère de l'énergie et des ressources naturelles
MES	Matières en suspension
MgO	Oxyde de magnésium
MRF	Matières résiduelles fertilisantes
NT	Territoires du Nord-Ouest
NTK	Azote total Kjeldahl
OMS	Organisation mondiale de la santé
OTV	Omnium de traitement et de valorisation
PCB	Polychlorobiphényle
P ₂ O ₅	Pentoxyde de phosphore
ST	Solides totaux
STEP	Station d'épuration des eaux usées
T°	Température
UFC	Unité formant une colonie (de bactéries)
USEPA	Agence américaine de la protection de l'environnement
WEF	Fédération de l'environnement de l'eau
YK	Yukon

INTRODUCTION

La croissance rapide de la population mondiale contribue de façon de plus en plus alarmante à la dégradation de l'environnement et à l'épuisement des ressources. Cela nécessitera dans le futur des réglementations plus strictes concernant le traitement et l'élimination des déchets afin de prévenir la pollution de l'environnement. Par ailleurs, la dépollution de l'eau avant sa réutilisation et, par conséquent, le traitement des eaux usées et l'élimination des boues résiduelles, ont été parmi les enjeux les plus complexes et les plus en développement dans le domaine de l'environnement (Sabri, 2017). Le traitement des eaux usées consiste à éliminer les contaminants des eaux afin de produire des effluents traités plus sécuritaires pour l'environnement avant qu'ils soient rejetés dans le milieu naturel. Ce traitement permet d'obtenir non seulement des eaux traitées, mais aussi des sous-produits qui peuvent être toxiques. Ces déchets sont appelés les biosolides (boues d'épuration) et sont principalement composés d'eau, de bactéries, de champignons et de virus, de particules organiques et inorganiques, de métaux lourds et de micropolluants (comme les produits pharmaceutiques et les perturbateurs endocriniens). L'objectif principal du traitement des biosolides est de réduire les concentrations en matière organique et en pathogènes afin d'avoir un produit final sécuritaire pour l'élimination. Le terme « biosolide » est utilisé par la Water Environment Federation (WEF, 1998) pour réorienter l'utilisation bénéfique des solides et des produits organiques obtenus après traitement des eaux usées (épandage, compostage, production d'énergie, etc.) (Sabri, 2017). De fait, les boues d'épuration sont considérées comme une source précieuse de nutriments et d'énergie.

Les pratiques actuelles d'assainissement des boues d'épuration dans les territoires nordiques du Canada sont défectueuses, ce qui entraîne l'apparition de sérieux problèmes sur l'environnement dans son ensemble. Ces communautés sont connues pour leur climat très froid et le gel qui dure pendant une bonne partie de l'année. C'est le cas notamment pour la région de Salluit, qui est située dans le Nord-du-Québec et qui est caractérisée par un hiver froid et l'absence de systèmes d'assainissement (Lévesque, 2009). Ainsi, il apparaît impératif de trouver une technique efficace et plus bénéfique pour traiter ces boues.

Le traitement par congélation/décongélation s'avère être une méthode efficace de déshydratation pour la gestion des boues d'épuration dans les collectivités situées dans des conditions climatiques froides (Vesilind et Martel, 1990). La congélation/décongélation naturelle est une méthode de séparation solide/liquide simple, pratique et peu coûteuse qui permet de déshydrater efficacement les boues (Taylor et Francis Group, 2006). Cette méthode est particulièrement efficace lorsqu'elle est utilisée dans de petites stations d'épuration situées dans des régions froides et éloignées, car les méthodes de déshydratation habituelles exigent un équipement complexe et coûteux, des opérateurs qualifiés et un entretien régulier.

Le présent projet de maîtrise a donc été réalisé afin d'optimiser les conditions opératoires de déshydratation des boues d'épuration par gel/dégel pour les territoires nordiques du Canada, en particulier pour le village de Salluit. La première partie de ce travail détaille les travaux effectués jusqu'à présent concernant la gestion des boues d'épuration dans le Nord, tandis que le deuxième chapitre s'intéresse au contexte, aux hypothèses, aux objectifs et à l'originalité de la recherche. La troisième partie de ce mémoire traite de la démarche méthodologique de recherche employée. Finalement, la dernière section de cet ouvrage présente et discute les résultats obtenus lors de l'étude ainsi que les principales conclusions et recommandations.

1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Assainissement des eaux usées dans le nord

1.1.1 Aperçu général sur la région étudiée (village de Salluit)

La région en question est la communauté de Salluit qui est située dans le Nord-du-Québec (Figure 1.1). Cette région fait partie du monde circumpolaire, connue par la présence de pergélisol et caractérisée par des températures hivernales extrêmement froides durant une bonne partie de l'année (environ 8 mois) avec une température moyenne de $-23,4^{\circ}\text{C}$ et des vents majoritairement violents (Hayward *et al.*, 2014).

Salluit est situé sur la rive sud du fjord de Sugluk et le littoral sud du détroit d'Hudson et localisé dans une vallée repérée approximativement Nord-Sud d'une longueur d'environ 2,5 km et d'une largeur entre 600 m et 1,5 km (Lévesque, 2009). La communauté a connu une croissance démographique importante de 33,5% depuis 1996, soit 1 240 personnes en 2006 (Lévesque, 2009) et environ 1 483 habitants en 2016 (Statistique Canada, 2017).

Ce village nordique se trouve en zone de pergélisol continu, ce qui limite fortement les moyens d'assainissement (transport des biens et réseau routier), donc le transport doit être effectué par voie maritime ou aérienne. La vidange des eaux usées et la réserve d'eau potable se font par des camions citernes à la place d'un réseau d'aqueduc et d'égout. De plus, le village de Salluit est relié à une centrale d'énergie électrique avec des génératrices à moteur diesel puissantes et non pas au réseau hydro-électrique.

Parmi les contraintes que rencontre Salluit dans l'accroissement démographique, notons 1) l'instabilité du sol qui rend la construction résidentielle peu recommandée, 2) l'isolement topographique qui limite l'espace pour la construction, et 3) l'exposition aux vents violents qui menace la sécurité publique.



Figure 1.1 Localisation géographique du village de Salluit (MERN, 2012)

1.1.2 Traitement des eaux usées dans le nord

D'une façon générale, les eaux usées après leur acheminement vers la station d'épuration subissent habituellement divers traitements, lesquels sont résumés de manière simplifiée à la [Figure 1.2](#). À la fin de ce traitement, les eaux traitées peuvent être rejetées dans le milieu naturel. Le traitement des eaux usées génère également des déchets organiques concentrés. Ces déchets sont appelés les boues d'épuration qui sont soit des boues primaires obtenues à partir de la décantation primaire des eaux usées, soit des boues secondaires provenant d'un traitement secondaire, appelé encore traitement biologique. Ces boues doivent être traitées et gérées de manière convenable, soit par valorisation pour la production d'énergie, l'épandage agricole ou sylvicole, la production de compost, etc., ou à tout le moins disposées de manière sécuritaire par enfouissement sanitaire.

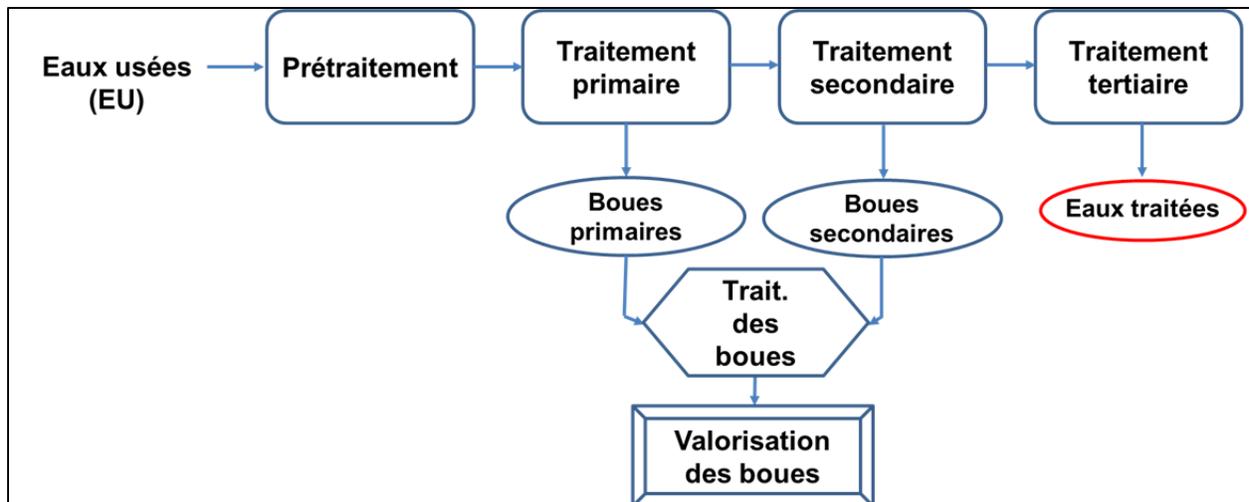


Figure 1.2 Étapes de traitement d’une station d’épuration des eaux usées

Dans les régions nordiques du Canada, la gestion des eaux usées devient de plus en plus une problématique. En juin 1999, une entente Isurruutinik financée par le Ministère des affaires municipales et de la métropole (MAMM) et dirigée par l’administration régionale Kativik (ARK) a été signée dans le but de mettre en place plusieurs installations de traitement des eaux usées et de protéger l’environnement et la santé publique (Administration régionale Kativik et Société Makivik, 1999). Au cours des dernières années, environ 81 procédés de traitement ont été installés dans les communautés nordiques pour le traitement des eaux usées municipales afin d’avoir un environnement propre et sain (Langstaff, 2011). Le [Tableau 1.1](#) illustre les différentes méthodes de traitement des eaux usées domestiques en application dans les régions nordiques du Canada.

En Europe, les eaux usées générées dans les régions nordiques sont rejetées dans le milieu naturel après leur traitement, un mètre cube d’eau usée traité produit environ 350 à 400 grammes de boues. Le traitement de ces boues a pour objectif de réduire leur volume et de diminuer leur pouvoir de fermentation (Aussel et Galtier, 2004).

D'une façon générale, la plupart des territoires nordiques utilisent le traitement par lagunage pour traiter les eaux usées municipales avec l'absence de gel variant entre 2 à 6 mois, et plus de la moitié utilise des marais naturels (Langstaff, 2011).

Parmi les techniques les plus utilisées, les bassins de stabilisation ont été exploités dans l'Arctique Canadien (Dawson et Grainge, 1969). Cette technique est reconnue pour son faible coût d'exploitation (Smith, 1996). Ces bassins sont généralement divisés en deux groupes : 1) les bassins de stockage et d'infiltration ne présentant aucun rejet, l'eau à traiter se répartie dans les bassins et s'infiltré par la suite dans le sol; 2) les lagunes à écoulement qui sont principalement divisées en trois types : étangs aérobies à algues (présence d'O₂), étangs facultatifs (O₂ uniquement dans la zone supérieure) et étangs anaérobies (pas d'O₂) (Blais, 2016). En ce qui concerne les marécages artificiels/naturels, ces deux derniers sont totalement différents. Les marécages artificiels sont des écosystèmes créés par l'Homme pour traiter des eaux usées municipales, des eaux usées industrielles, des effluents agricoles, des lixiviats, des eaux d'orages, et les eaux de bassins de pisciculture, alors que les marécages naturels ont été construits d'une façon naturelle (MDDEP, 2010). Plusieurs collectivités nordiques, telles que les communautés du Nunavik, du Schefferville et du Golfe-du-Saint-Laurent, utilisent ces marécages artificiels comme procédé de traitement des eaux usées parce qu'ils constituent une méthode économique et simple d'utilisation (Wootton *et al.*, 2008; Yates *et al.*, 2010). Le relargage des nutriments et de la matière organique retrouvés dans les bassins de stabilisation résultent, dans plusieurs cas, de la création des marais naturels, ce qui favorise par la suite la croissance et la constitution d'une végétation (Doku et Heinke, 1995; Yates, 2012). Différentes études effectuées dans le Nord montrent que de nombreux systèmes de traitement par marécage sont adaptés à des lagunes afin d'avoir une bonne qualité en terme d'effluent (Tableau 1.1). Des études montrent que les rendements d'élimination de l'azote total et du phosphore total sont souvent plus faibles avec les marais naturels qu'avec les marais artificiels, soit d'environ 18-30% N_{tot} et 25-30% P_{tot} (Kadlec *et al.*, 2008; Hayward *et al.*, 2015).

Une étude réalisée sur six marais naturels opérés en milieu nordique a montré un enlèvement de l'azote total de 84-99% et du phosphore total de 80-90% (Yates *et al.*, 2012). En comparaison, une autre étude réalisée sur un marais artificiel à écoulement horizontal a

indiqué un enlèvement de 89,9% pour l'azote total et de 91,3% pour le phosphore total (Hong *et al.*, 1995).

Finalement, une troisième technique plus moderne est la biofiltration qui est un procédé de contrôle de la pollution utilisant un bioréacteur contenant du matériel vivant, fixé sur un support solide pour capturer et dégrader biologiquement les polluants. Il s'agit essentiellement d'un lit de particules dans lequel les microorganismes sont immobilisés sur différents types de supports naturels ou synthétiques. En particulier, la biofiltration est devenue une technique acceptée et mature pour le contrôle de la pollution de l'air et de l'eau. Ceci est démontré par le nombre exponentiel de biofiltres opérés dans le monde (Webster *et al.*, 1999). La biofiltration est utilisée avec succès en Amérique du Nord, notamment dans les usines de traitement des eaux usées, les usines de transformation des aliments, les installations de compostage et de traitement des matières organiques, les usines d'engrais et les usines de pâtes et papiers (Webster *et al.*, 1999).

Tableau 1.1 Performances des marécages pour le traitement des eaux usées domestiques

Région	Type	Rendement d'élimination (%)							Commentaires	Références
		cDBO ₅	DCO	MES	C _{tot}	<i>E. coli</i>	N _{tot}	P _{tot}		
<i>Chesterfield inlet</i>	Naturel	95	-	96	-	-	-	93	Eaux usées brutes	Chouinard <i>et al.</i> (2014)
<i>Tianjin (Chine)</i> <i>(flux vertical)</i>	Artificiel	54	39	44	-	-	30	44	70% d'eaux industrielles et 30% d'eaux municipales (traitement primaire)	Hong et Weiran (1995)
		97	83	87	-	-	90	91		
<i>Coral Harbor</i>	Naturel	74	-	-	-	88	34	25	Système hybride (en aval d'une lagune)	Hayward et Jamieson (2015)
Village d'Alfred (Ontario)	Naturel	34	-	93	-	-	-	90	Système hybride (en aval d'une lagune)	Cameron <i>et al.</i> (2003)

1.2 Gestion des boues d'épuration dans le Nord

1.2.1 Traitement des boues dans le nord

La gestion des boues d'épuration dans les milieux nordiques est particulièrement difficile compte tenu des conditions climatiques rencontrées dans ces régions. Ces conditions ont des impacts négatifs sur les diverses méthodes existantes pour gérer les boues, telles que leur stabilisation (ex. digestion), leur déshydratation, ainsi que leur élimination ou leur valorisation. Parmi les collectivités nordiques du Québec, le village de Salluit a été choisi pour faire l'objet du projet de recherche pour deux raisons principales : les conditions climatiques rencontrées et l'absence de moyens d'assainissement. La communauté de Salluit, quant-à-elle, rencontre notamment trois contraintes concernant la mise en place de système de traitement des boues d'épuration :

- en premier lieu, l'accroissement de la population qui va entraîner une augmentation de la production des eaux usées et, par conséquent, des boues d'épuration générées;
- en second lieu, la fonte du pergélisol causée par les changements climatiques pourrait entraîner la propagation de maladies ou menacer la capacité de cette collectivité à maintenir son économie (Warren *et al.*, 2005);
- en troisième lieu, l'environnement et l'éloignement socio-économique de la plupart des communautés situées dans le Grand Nord du Canada réduisent la capacité des communautés à être complètement autonomes (Yates, 2012).

En raison de ces difficultés, quelques pratiques actuelles de gestion des boues peuvent avoir des dangers pour la santé humaine et l'environnement. Les performances des procédés de traitement des boues d'épuration peuvent être influencées par plusieurs facteurs, tels que les conditions opératoires ou le type de boues devant être traitées.

1.2.2 Types et caractéristiques des boues d'épuration

1.2.2.1 Types de boues

Lors du traitement des eaux usées, plusieurs types de boues peuvent être générés incluant les boues primaires et les boues secondaires. Le Tableau 1.2 montre les différents types de boues, leur origine, leur composition et leur teneur en matières solides (siccité).

Boues primaires

Les boues primaires proviennent de la décantation primaire des eaux usées et sont composées de matières minérales et organiques. Ce type de boues est caractérisé par une bonne disposition à la décantation, permettant d'obtenir des concentrations importantes par simple épaissement en raison de la présence de matières particulaires présentes. Les boues primaires se caractérisent également par une déshydratation et un épaissement favorables, ainsi qu'une teneur élevée en matières organiques (Canler et Perret, 2013).

Boues secondaires

Les boues secondaires, aussi appelées boues biologiques, proviennent de la biomasse en excès issue du traitement biologique secondaire (Amorce, 2012). Elles contiennent également des particules inorganiques non biodégradables qui n'ont pas été éliminées lors de la décantation primaire ou le traitement biologique.

Boues mixtes

Les boues mixtes sont un mélange de boues primaires et de boues secondaires. Elles proviennent de la totalité de la station (Amorce, 2012).

Tableau 1.2 Différents types de boues de station d'épuration des eaux usées (Amorce, 2012)

Types de boues	Origine	Composition	Siccité (%)	Observations
Boues primaires	Décantation primaire	Matières inorganiques et organiques	5	Couleur grise
Boues secondaires	Décantation secondaire	Composés organiques avec une bonne partie de composés inorganiques	1-2	Boues granulaires, de couleur brun-jaunâtre, pulvérulente et de décantation difficile
Boues mixtes	Décantation primaire et secondaire	Mélange de boues primaires et secondaires	5	-

1.2.2.2 Caractéristiques des boues

Les boues d'épuration municipales sont principalement composées d'éléments nutritifs notamment l'azote et le phosphore, de composés organiques et inorganiques, de pathogènes, etc. Les principales caractéristiques pouvant influencer la gestion ou la valorisation des boues d'épuration sont leur siccité, leurs propriétés fertilisantes, leurs teneurs en pathogènes, en composés organiques toxiques et en métaux.

Siccité

La concentration en solides totaux est un paramètre physique essentiel qui permet d'évaluer la consistance des boues d'épuration domestiques et de déterminer si ces dernières sont transportables/valorisables ou non. Plus la siccité est élevée, plus elle permet de réduire le volume de boues à acheminer vers des sites, ce qui n'est pas le cas pour les boues liquides (Perron et Hébert, 2007). Les boues liquides se situant entre 1 à 5% de solides totaux (ST) sont normalement déshydratées mécaniquement à des teneurs en solides totaux variant de 15 à 40% et ce, à des coûts acceptables. Parfois, elles peuvent être séchées afin d'obtenir des teneurs en solides supérieures à 85% (Blais et Sasseville, 1996).

Propriétés fertilisantes (N, P, Ca, Mg, etc.)

Les boues d'épuration municipales possèdent également des éléments nutritifs favorables pour leur valorisation dans le domaine agricole, tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, etc. D'une manière générale, les teneurs en azote et en phosphore présentes dans les boues d'épuration municipales sont assez élevées par rapport aux autres éléments. En effet, les teneurs moyennes en azote et en phosphore varient entre 3,0 et 7,5% N-NTK et entre 2,7 et 4,6% équivalent P_2O_5 , alors que la teneur en potassium est généralement faible (entre 0,3 et 0,4% équivalent K_2O) (Blais et Sasseville, 1996). Le [Tableau 1.3](#) présente les teneurs moyennes en éléments nutritifs se trouvant dans les boues d'épuration.

Tableau 1.3 Teneurs moyennes (% p p⁻¹) en éléments nutritifs présents dans les boues d'épuration

Références	Type de boues	N-NTK	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO
Spinosa et Vesilind (2001)	Biosolides	3,84	3,65	0,42	0,97	7,37
Charbonneau <i>et al.</i> (2001)	MRF	3,00	2,68	0,38	0,58	8,46
OTV (1997)	Boues domestiques	6,00	4,58	0,38	1,00	14,0
St-Yves et Beaulieu (1988)	Boues domestiques	5,17	2,75	0,60	0,66	17,6
Sommers <i>et al.</i> (1976)	Biosolides	2,98	5,18	0,71	1,97	10,6

Agents pathogènes (Bactéries, virus, protozoaires, parasites)

Les microorganismes tels que les virus, les bactéries, les protozoaires, les parasites et les champignons sont souvent retrouvés dans les substances fécales présentes dans les eaux usées municipales (EUM) et les boues brutes (Amorce, 2012). Le [Tableau 1.4](#) présente les principaux éléments pathogènes se trouvant dans les eaux usées municipales et les fumiers. Les microorganismes les plus problématiques pour la santé humaine et animale suite à l'épandage agricole sont les salmonelles, à cause de leur prédominance et de leur caractère pathogène. De

plus, nous pouvons citer les vers *Taenia* puisque leur hôte intermédiaire est le bétail, les parasites *Ascaris* à cause de l'endurance de leurs œufs, ainsi que les virus qui résistent à la désactivation et qui sont difficiles à contrôler (Environnement Canada, 1985).

Tableau 1.4 Principaux agents pathogènes dans les EUM et les fumiers (USEPA, 2000)

Microorganismes	Maladies ou symptômes provoqués
Bactéries	
<i>Salmonella</i> spp.	Salmonellose (empoisonnement alimentaire, typhoïde)
<i>Shigella</i> spp.	Dysenterie bacillaire
<i>Yersinia</i> spp.	Gastro-entérite aiguë (diarrhée, douleur abdominale)
<i>Vibrio cholerae</i>	Choléra
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastro-entérite
<i>Escherichia coli</i> (enteropathogènes)	Gastro-entérite
Virus	
Poliovirus	Poliomyélie
Coxsachievirus	Méningite, pneumonie, hépatite, fièvre, etc.
Echovirus	Méningite, pneumonie, hépatite, fièvre, etc.
Hepatitis A virus	Hépatite infectieuse
Rotavirus	Gastro-entérite aiguë avec diarrhée sévère
Norwalk Agents	Gastro-entérite épidémique avec diarrhée sévère
Reovirus	Infections respiratoires, gastro-entérite
Protozoaires	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastro-entérite
<i>Entamoeba histolytica</i>	Entérite aiguë
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (diarrhée et crampes abdominales)
<i>Balantidium coli</i>	Dysenterie et diarrhée
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
Vers parasites (et œufs)	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Problèmes digestifs, douleurs abdominales
<i>Ascaris suum</i>	Toux, douleurs à la poitrine
<i>Trichurius trichiura</i>	Douleurs abdominales, diarrhée, anémie, perte de poids
<i>Toxocara canis</i>	Fièvre, inconfort au niveau de l'abdomen, douleurs aux muscles
<i>Taenia saginata</i>	Stress, insomnie, anorexie
<i>Taenia solium</i>	Stress, insomnie, anorexie
<i>Necator americanus</i>	« Hookworm disease »
<i>Hymenolepis nana</i>	Taeniasis

Composés organiques toxiques (Benzène, PCB, chloroforme, etc.)

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), plus de 1 000 agents organiques peuvent être rencontrés dans les eaux usées, ce qui rend leur étude plus difficile et coûteuse. La présence de ces composés tel que le benzène, les polychlorobiphényles (PCB), le chloroforme, les pesticides et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dépend de plusieurs paramètres et procédés (site de drainage des stations d'épuration, adsorption aux matières organiques, dégradation et volatilisation), et change en fonction du temps et du lieu (Schowanek *et al.*, 2004).

Le [Tableau 1.5](#) présente les concentrations de différents polluants toxiques qui se trouvent dans des boues américaines prélevées dans 40 stations d'épuration lors de l'étude « 40-City Survey » (USEPA, 1982) et de 58 stations lors de l'étude de « Association of Municipal Sewerage Agencies (AMSA) » (AMSA, 1987).

Éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques sont des éléments métalliques ou des métalloïdes dont la concentration ne dépasse pas 1 000 mg/kg soit dans un échantillon ou dans un milieu donné (Basta *et al.*, 2005). Les sept contaminants les plus fréquemment retrouvés dans les boues d'épuration sont le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn). Certains de ces éléments sont des oligo-éléments indispensables aux êtres vivants. Cependant, ils deviennent toxiques quand ils dépassent une certaine concentration (Vecteur, 2007). Le [Tableau 1.6](#) présente les teneurs limites en métaux pour l'épandage des boues d'épuration prescrites par différentes autorités gouvernementales.

Tableau 1.5 Teneurs médianes ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ boues sèches) en composés organiques toxiques présents dans les boues d'épuration américaines (USEPA 1982; AMSA 1987; Blais et Sasseville 1996)

Polluants toxiques	40-City	AMSA
Benzidène	281	1 770
Benzo(a)pyrène	1	500
Bis(2-éthyl)phthalate	105 000	5 400
Diméthylnitrosamine	281	1 160
Hexachlorobenzène	155	400
Hexechlorobutadiène	23	370
Benzène	336	100
Tétrachlorométhane	0,006	100
Chloroforme	26	100
Tétrachloroéthylène	150	-
Trichloroéthylène	529	100
Chlorure de vinyle	0,076	90
PCB	34	410

1.3 Réglementation et politique

Au Québec, une classification environnementale des boues d'épuration est exigée afin de les valoriser. Pour ce faire, quatre critères (C-P-O-E) ont été établis pour déterminer les restrictions d'épandage et de stockage des matières résiduelles fertilisantes (MRF) (Tableau 1-6). Ces catégories sont les suivantes : la teneur en contaminants chimiques (C), le décompte en agents pathogènes (P), une évaluation des odeurs (O) et la quantité des corps étrangers présents (E). Des indices s'appliquent aussi aux critères pour le recyclage en agriculture. Des indices 1 et 2 sont appliqués aux critères C-P-E et 1, 2 et 3 pour le critère O (MDDELCC, 2012).

Contaminants chimiques C

La concentration des éléments traces présents dans les boues d'épuration dépend de la quantité se trouvant dans les eaux usées et l'origine des eaux usées. Lors de l'épandage, la plupart des contaminants chimiques présents dans les boues d'épuration et les fumiers sont insolubles et sont associés à la matière organique ou présents sous différentes formes inorganiques (oxydes, sulfures, etc.) insolubles, ce qui restreint leur migration vers les cours d'eau (Antoniadis *et al.*, 2006).

Agents pathogènes P

Les agents pathogènes (bactéries, virus, parasites et champignons) se trouvant dans les résidus d'épuration présentent un risque pour la santé humaine et animale. L'élimination ou la réduction des concentrations de ces agents se fait par des procédés biologiques de stabilisation (digestion aérobie ou anaérobie) ou par chaulage (Brooks *et al.*, 2004).

Odeurs O

Il existe trois classes pour les odeurs afin de faciliter l'application et le suivi des matières résiduelles : compost (O1), fumier solide (O2) et fumier liquide (O3). Les engrais de ferme ont été choisis comme barème des catégories O vu leur pertinence pour les odeurs (MDDEFP, 2014).

- Catégorie O1 : MRF contiennent moins d'odeurs que le fumier solide de bovins laitiers ;
- Catégorie O2 : MRF sont presque similaires au fumier solide de bovins laitiers ;
- Catégorie O3 : MRF ont une cote d'odeur inférieure ou égale au lisier de porc.

Corps étrangers E

Les corps étrangers existant dans les boues d'épuration, tels que le plastique, le verre, etc., peuvent varier en fonction du traitement des eaux usées. Au cours du traitement, certains de ces corps peuvent briser l'équipement et endommager le fonctionnement. En conséquence, des limites de taille et de qualité ont été imposées par les règlements provinciaux et territoriaux du Canada (CCME, 2012).

Afin d'augmenter l'épandage des matières organiques telles que les boues municipales, une gestion adéquate de ces matières résiduelles est obligatoire. Au Québec, les boues municipales représentent 0,75 M tonnes par an (base humide), soit environ 100 kg/habitant/an. Près de 30% des boues municipales sont utilisées pour les sols comme des matières fertilisantes, 22% sont enfouies avec une production partielle de biogaz, et 48% sont incinérées dans les grandes villes comme Québec, Montréal et Longueuil, ou dans des cimenteries (Laval). À titre comparatif, plus de 70% des boues produites en France sont valorisées pour l'épandage avec ou sans compostage ou digestion anaérobie préalable (Hébert, 2011).

Tableau 1.6 Concentrations en métaux (mg.kg⁻¹ boues sèches) dans les boues d'épuration municipales prescrites dans divers pays

Pays	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Allemagne ⁽¹⁾	-	5-10	-	900	800	8	-	200	900	-	2 000-2 500
Australie ⁽¹⁾	20-75	3-85	-	400-3 000	200-4 300	1-57	4-75	60-420	200-840	3-100	250-7 500
Autriche ⁽¹⁾	10-20	2-10	100	50-500	300-500	2-10	20	25-100	100-500	-	1 500-2 000
Belgique ⁽¹⁾	-	6-10	-	250-500	375-600	5-10	-	50-100	300-500	-	900-2 000
Canada (Québec - C1) ⁽²⁾	13	3,0	34	210	400	0,8	5,0	62	150	2,0	700
Canada (Québec -C2) ⁽²⁾	40	10	150	1 060	1 000	5	20	180	300	14	1 850
Danemark ⁽¹⁾	4 000	0,8	-	100	1 000	0,8	25	30	120	-	-
États-Unis (Classe A) ⁽³⁾	41	39	-	1 200	1 500	17	75	420	300	36	2 800
États-Unis (Classe B) ⁽³⁾	75	89	-	3 000	4 300	57	75	420	840	100	7 500
Finlande ⁽¹⁾	-	1,5	-	300	600	1	-	100	100	-	1 500
France ⁽¹⁾	-	10-20	-	1 000	1 000	10	-	200	800	-	3 000
Irlande ⁽¹⁾	-	20	-	-	1 000	16	-	300	750	-	2 500
Italie ⁽¹⁾	-	20	-	-	1 000	10	-	300	750	-	2 500
Pays-Bas ⁽¹⁾	15	1,25	-	75	75	0,75	-	30	100	-	300
Suède ⁽¹⁾	-	1,75	60	100	600	50	-	50	100	-	800
Suisse ⁽¹⁾	-	5	60	500	600	5	20	80	500	-	2000
CEE (Dir. 86/278) ⁽¹⁾	-	20-40	-	1 000-1 750	1 000-1 750	16-25	-	300-400	750-1 200	-	2 500-4 000
CEE (An 2015) ⁽¹⁾	-	5	-	800	800	5	-	200	500	-	2 000
CEE (An 2025) ⁽¹⁾	-	2	-	600	600	2	-	100	200	-	1 500

⁽¹⁾ Duvaud et al. (1999), ⁽²⁾ Environnement Québec (2004), ⁽³⁾ Spinosa et Vesilind (2001).

1.4 Techniques conventionnelles pour la déshydratation des boues d'épuration

Les méthodes de déshydratation des boues permettent de donner une consistance physique plus solide aux boues, facilitant ainsi leur transport et leur valorisation. La déshydratation se fait essentiellement par centrifugation, filtration sur presses à plateaux, filtration sur bandes presseuses, séchage sur lit de sable et par congélation/décongélation.

1.4.1 Centrifugation

La centrifugation est un procédé de séparation qui permet de déshydrater et d'épaissir les boues résiduaires (Blais et Sasseville, 1996). Il existe deux catégories de centrifugeuses de base utilisées pour la déshydratation des boues d'épuration des eaux usées : le panier non perforé et le bol plein. Un troisième type, la centrifugeuse à buse de disque, a été utilisé pour épaissir les boues, mais a rarement été utilisé pour la déshydratation. En raison de l'amélioration de la conception et de l'efficacité des centrifugeuses à cuve pleine au cours des dernières années, les centrifugeuses à panier non perforées sont devenues moins fréquentes sur le marché municipal et sont remplacées par des machines à cuve pleine (Turovskiy et Mathai, 2006). D'après Halcrow Gilbert Associates Ltd (1993), les rendements typiques de cette technique se situent entre 18 et 31% en ST. La [Figure 1.3](#) montre un schéma de fonctionnement d'une décanteuse centrifuge.

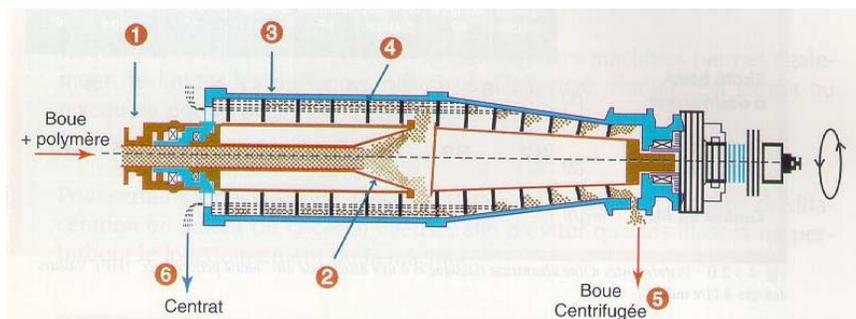


Figure 1.3 Schéma de principe d'une décanteuse centrifugeuse (Blais et Sasseville, 1996)

Différentes études ont été réalisées pour évaluer les performances de la centrifugation sur la déshydratation des boues d'épuration. Parmi ces études, une amélioration de la performance de la centrifugation par injection de vapeur ou de dioxyde de carbone a été testée (Nichols, 2012). Cette méthode a permis d'augmenter les ST des boues d'épuration de 4 à 5% (injection de vapeur) et de 2 à 3% (injection de CO₂) comparativement à la centrifugation conventionnelle. De plus, cette injection de vapeur ou de CO₂ entraîne une réduction de la consommation énergétique totale lors de la déshydratation des boues. Une autre étude réalisée sur le développement de centrifugeuses à forte capacité « High-Speed Centrifuges » a permis d'obtenir des siccités finales se situant entre 25 et 38%, et des réductions importantes en termes de quantités d'électricité (Metcalf et Eddy Inc., 1992).

1.4.2 Filtres sous vide

La déshydratation des boues d'épuration par la filtration sous vide est une ancienne technique dont l'utilisation devient de plus en plus limitée de nos jours (Degrémont, 1989). Les filtres sous vide possèdent l'avantage d'être très basiques dans leur conception, leur application et leur fonctionnement. Il s'agit également d'un dispositif de séparation solide/liquide extrêmement efficace en raison de ses méthodes uniques de manipulation (décharge) de solides de gâteau formés, de ses exigences de travail opérationnelles relativement faibles et de sa capacité à filtrer des flux de processus continus ou discontinus.

L'installation de filtres à vide rotatif se fait par un filtre qui est composé du mécanisme de décharge des tambours, des cuves, des agitateurs et des solides ainsi que d'un ensemble auxiliaire qui est constitué d'une source de vide, un moyen de séparer l'air et la sortie de liquide du filtre (habituellement un récepteur à vide) et une pompe de filtrat pour transporter le liquide du récepteur sous vide vers la prochaine étape du processus (Fluid/Particle Separation Journal, 2000).

Pendant de nombreuses années, les filtres sous vide ont été la norme utilisée dans toute l'industrie pour la déshydratation des boues. Alors que durant ces dernières années, de nombreux problèmes opérationnels antérieurs tels que la mauvaise collecte, la libération des

gâteaux et les exigences élevées d'entretien ont été quelque peu améliorés par la méthodologie de conditionnement chimique et les innovations mécaniques.

Deux contraintes ont toutefois empêché son utilisation à grande échelle soient les coûts élevés d'énergie et de maintenance associés à l'utilisation d'un système de vide, et l'incapacité de produire un gâteau aussi sec que certaines des technologies les plus avancées actuellement disponibles. Cette technique permet d'obtenir une siccité supérieure à 30% en ST (Zhang *et al.*, 2015).

1.4.3 Filtres à bandes presseuses

Dans les filtres à bandes presseuses, la compression des boues se fait entre deux bandes de toile. La toile, après avoir été débarrassée de la boue, est assujettie au lavage afin de conserver sa porosité. La déshydratation sur filtres à bandes possède plusieurs avantages tels que son lavage facile et régulier réduisant les risques de colmatage et les pertes d'efficacité et sa productivité élevée. Son fonctionnement est continu, elle a un faible coût d'exploitation et d'investissement, et elle permet aussi de produire des boues pelletables, soit une siccité de 15 à 18%. Malgré tous ces avantages, cette technique est de moins en moins utilisée parce qu'elle nécessite une consommation importante d'eau de lavage (Blais et Sasseville, 1996). Ce traitement est souvent utilisé dans les petites et moyennes stations lorsque les boues sont principalement assujetties à une valorisation en agriculture.

1.4.4 Filtres à plateaux

Cette technique de pressage est très répandue malgré son fonctionnement intermittent et son coût d'investissement élevé (moins élevé que la centrifugeuse). Le filtre-presse à plateaux comprend un ensemble de plaques encastrées verticales et juxtaposées, pressées l'une contre l'autre par des vérins hydrauliques à une extrémité de l'ensemble. La pression appliquée à la face d'articulation de chaque plaque filtrante doit résister à la pression interne de la chambre développée par le système de pompage des boues. Cette disposition de la plaque verticale forme des chambres de filtration étanches permettant une mécanisation facile pour la décharge des gâteaux. Les membranes finement ou étroitement maillées sont appliquées sur les deux surfaces enroulées dans ces plaques. Les orifices alimentent les boues à filtrer sous

pression dans la chambre de filtration. Ils sont généralement placés au centre des plaques, ce qui permet une bonne répartition du débit, une bonne pression et un meilleur drainage des boues dans la chambre. La boue de solides s'accumule progressivement dans la chambre de filtration jusqu'à ce que le gâteau compact soit formé. Le filtrat est recueilli à l'arrière du support de filtration et emporté par des conduits internes (Cheremisinoff, 1992). La déshydratation des boues par filtres à plateaux peut atteindre jusqu'à 35% en ST. Une étude réalisée a permis d'obtenir des gâteaux de boues avec une siccité qui est comprise entre 19 et 30% avec une capacité de filtration se situant entre 1,5 et 4,0 kg.m⁻².h⁻¹ (Benmoussa *et al.*, 1997).

La [Figure 1.4](#) présente le schéma de fonctionnement d'un filtre-presse à plateaux et le [Tableau 1.7](#) montre les performances de déshydratation typiques sur un filtre-presse à plaques (Blais, 2016).

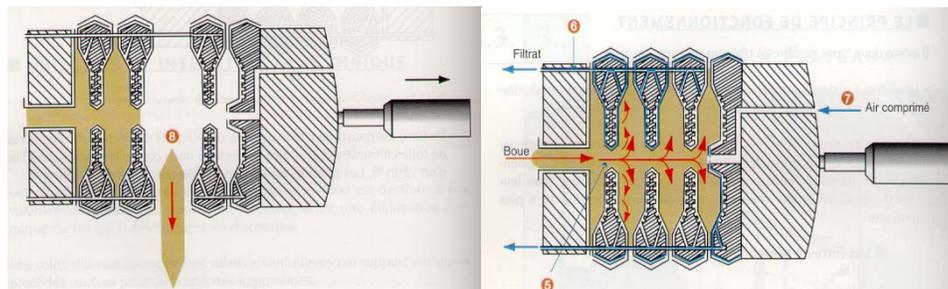


Figure 1.4 Schéma de fonctionnement d'un filtre-presse à plateaux (Blais et Sasseville, 1996)

**Tableau 1.7 Différents paramètres de performances de la déshydratation sur un filtre-
presse à plateaux (Blais, 2016)**

Paramètres	Type de filtres	Boues de classe A	Boues de classe B1	Boues de classe C	Boues de classe D
Siccité des boues à déshydrater (%)		8	4	5	3
Siccité des boues déshydratées (%)	Classique	35	28	31	31
	Membrane	41	32	36	36
Filtrat en MES (mg L ⁻¹)		300	300	300	300

1.4.5 Filtres à membranes

Les filtres-presses à membranes ont une chambre située sous la surface de drainage qui peut être gonflée. La méthode courante utilisée est la pression de l'eau, qui est générée par pompage dans la cavité de serrage pour gonfler la face de la plaque contre le gâteau de filtration. L'air peut également être utilisé.

Ce type de filtres fonctionne habituellement à une pression d'alimentation allant jusqu'à 7 bars et une pression de compression allant jusqu'à 15 bars selon *Micronics Engineered Filtration Group*. Les plaques spéciales peuvent être conçues pour accepter des pressions plus élevées et des pressions de compression.

Il existe deux types de membranes :

- Membranes fixes : ces membranes sont souvent constituées de polypropylène à 100%, mais le thermoplastique est également disponible. La plaque est fabriquée en moulant une membrane de face et une plaque de noyau séparément. Les membranes faciales sont ensuite reliées au noyau par soudage à chaud pour former une plaque homogène. Bien que ce type de membrane soit adapté à de nombreuses conceptions, il présente

des avantages particuliers dans les applications alimentaires, où le manque de joints empêchera la contamination.

- Membranes remplaçables : ces systèmes utilisent un noyau de polypropylène, qui est usiné pour accepter la connexion et le joint d'étanchéité d'une membrane en caoutchouc. Ces faces sont facilement modifiées. Les thermoplastiques EPDM et d'autres composés sont utilisés pour diverses applications spécifiques. Les économies d'opération peuvent être réalisées dans des environnements difficiles (Micronics Engineered Filtration Group, 2017).

1.4.6 Pressoirs rotatifs

Le presseur rotatif, en raison de sa fiabilité et de sa grande simplicité, nécessite une supervision minimale. C'est la seule technologie de déshydratation qui est sûre pour un fonctionnement automatique autonome et peut être surveillée et exploitée par télécommande. La technique, quant-à-elle, a comme avantage un coût d'exploitation plus faible grâce à ses performances élevées, son fonctionnement facile, son utilisation réduite de polymères, sa faible consommation d'énergie et son faible entretien (Fournier Industries Inc., 2017). Son principe est simple. L'alimentation des boues se fait à basse pression dans le canal et tourne entre deux éléments de filtrage chromés en acier inoxydable. La [Figure 1.5](#) illustre le schéma de fonctionnement du presseur rotatif.

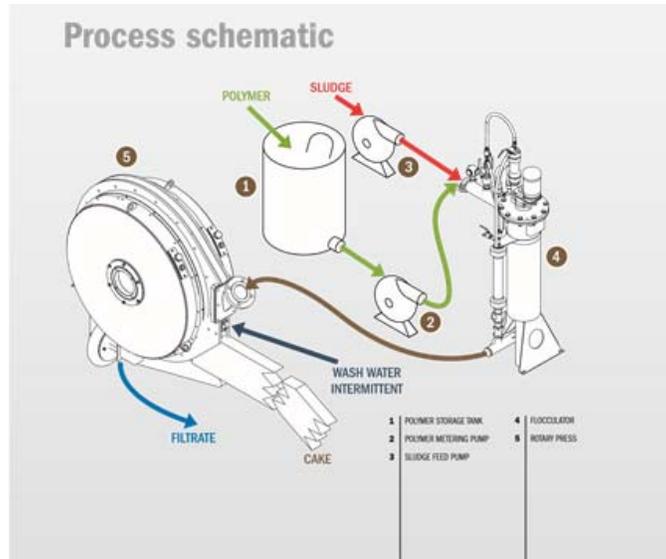


Figure 1.5 Schéma de fonctionnement du procédé du presseur rotatif (Fournier Industries Inc., 2017)

1.4.7 Presses à vis

Une presse à vis est un dispositif de déshydratation qui emploie une vis de déshydratation et de transport à l'intérieur d'un écran. Ce type d'appareil ne permet de sécher d'une manière convenable que des boues très fibreuses (Dégremont, 1989). La [Figure 1.6](#) montre deux types de presses à vis, l'une avec un agencement à vis incliné, l'autre avec une installation horizontale avec la capacité ajoutée d'alimentation de vapeur pour un séchage supplémentaire du gâteau (Turovskiy et Mathai, 2006).

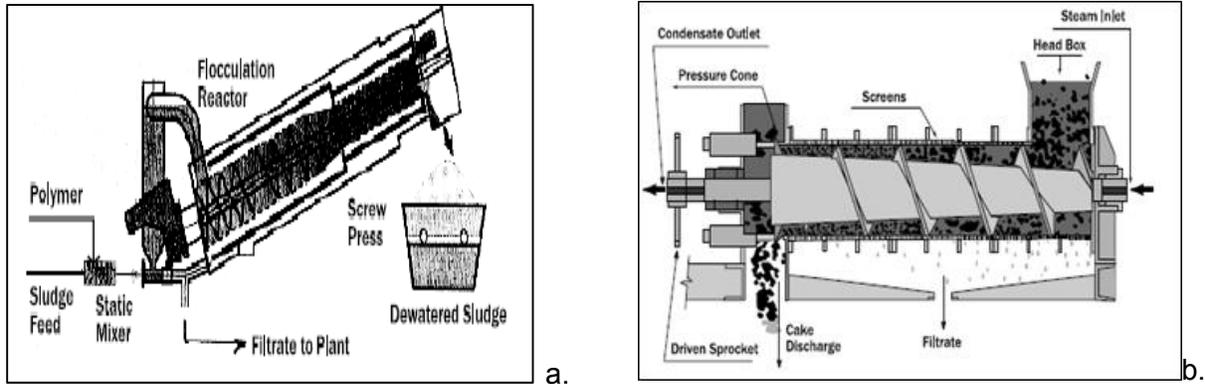
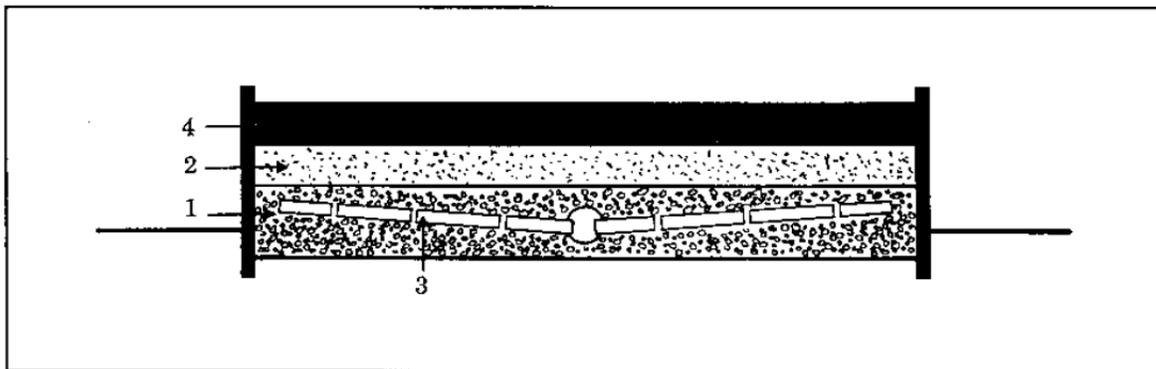


Figure 1.6 Presses à vis. Presse inclinée (a.) ou Presse horizontale (b.) (Turovskiy et Mathai, 2006)

1.4.8 Lits de séchage

Les lits de séchage des boues sont utilisés pour la déshydratation des boues. Ces systèmes sont basés à la fois sur le principe de drainage des boues à travers le lit et sur l'évaporation de l'eau des boues présente à la surface qui est exposée à l'air. Leur utilisation a comme avantage une faible consommation d'énergie et de produits chimiques, une teneur élevée en ST et un faible coût d'exploitation. Cependant, ces systèmes nécessitent de très grandes surfaces de terrain (Wang *et al.*, 2007).

Dans les régions tempérées, le séchage naturel sur lits se fait sur une période d'une centaine de jours. Le temps nécessaire pour le séchage de boues liquides d'une épaisseur de 30 à 40 cm change de trois à six semaines selon les conditions climatiques. Les lits de séchage comportent généralement deux phases : 1) la phase de drainage et 2) le séchage atmosphérique. En cas de climat ensoleillé, la teneur en ST peut varier de 40 à 60% (Degrémont, 1989). La [Figure 1.7](#) illustre le principe d'un lit de séchage.



1 - Gravier. 3 - Drains.
2 - Sable. 4 - Boue.

Figure 1.7 Coupe type du lit de séchage (Degrémont, 1989)

1.4.9 Micro-ondes

La technique de la déshydratation des boues par le chauffage aux micro-ondes a été développée par Collins *et al.* (1991). L'étude montre que l'utilisation de cette méthode exige une consommation importante d'énergie électrique pour déshydrater les boues d'approximativement 5 à 30% de ST. En revanche, une amélioration de la siccité qui pourrait aller jusqu'à environ 50% a été observée (Blais et Sasseville, 1996).

1.4.10 Lits de congélation (gel/dégel)

La déshydratation des boues par gel/dégel ou lits de congélation a été développée, après plusieurs années de recherche, par le *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory* (CRREL) (Martel, 1991, 1993). Cette méthode consiste en la séparation solide/liquide par cristallisation de l'eau présente dans les boues. Durant le gel, les cristaux repoussent les impuretés, ce qui favorise leur agglomération. Ensuite, les floccs produits sont compactés et déshydratés sous l'effet de la progression de la glace vers eux. Après le dégel, le drainage de l'eau à travers les granules laisse un résidu final ayant une siccité plus élevée permettant son transport et sa valorisation (Vesilind et Martel, 1990; Vesilind *et al.*, 1991). Selon diverses études, la température et le temps de congélation sont les deux principaux

facteurs influençant la performance du procédé de gel/dégel. Wang *et al.* (2001) ont constaté que l'amélioration de la déshydratation des boues et le degré d'élution de l'eau intracellulaire étaient plus efficaces dans les essais à congélation lente (-20°C) que dans les essais à congélation rapide (-80°C). Des études de gel/dégel ont été réalisées sur des boues d'étangs aérés avec une teneur finale en ST de 44% après la déshydratation (Goyette *et al.* 1994) ainsi que sur des boues digérées ayant une siccité finale se situant entre 24 et 40% (Martel, 1993; Martel et Diener, 1991) et des boues de fosses septiques avec des siccités supérieures à 20% (Desjardins et Bergeron, 2002). D'après Hu *et al.* (2011), le traitement par gel/dégel est efficace pour améliorer la déshydratation des boues d'épuration. De fait, lorsque les boues en vrac sont gelées, de minuscules régimes non gelés dans la matrice de glace sont continuellement déshydratés par les fronts de glace environnants, nommés «stade de durcissement». Le [Tableau 1.8](#) présente des exemples de teneurs en ST des boues avant et après traitement par le procédé de gel/dégel.

Tableau 1.8 Influence du type de boues sur le procédé de gel/dégel (Benkaraache, 2017)

Région	Type de boues	Solides totaux (%)	
		Avant gel/dégel	Après gel/dégel
Cincinnati, Ohio	Eaux usées, ajout d'alun	0,7	18
	Traitement de l'eau, fer et sel	7,6	36
	Traitement de l'eau, alun	3,3	27
Ontario, Canada	Rejets de boues activées	0,6	17
	Digestion anaérobie	5,1	26
	Digestion aérobie	2,2	21
Hanover, New Hampshire	Digestion, alun	2 - 7	25 - 35
	Digestion primaire	3 - 8	30 - 35

1.4.10.1 Effets de congélation

Le gel/dégel est une technique qui affecte tous les types de boues, mais elle est davantage efficace pour les boues contenant de l'alun, qui sont habituellement difficile à séparer de manière naturelle (Taylor et Francis Group, 2006). Les coûts d'énergie pour la congélation/décongélation artificielle sont prohibitifs, de sorte que le concept doit dépendre de la congélation naturelle afin qu'il soit rentable.

1.4.10.2 Exigences du processus

Le concept du système de déshydratation des boues par congélation doit être basé sur les conditions les plus défavorables pour assurer une performance réussie en tout temps. Le facteur critique est l'épaisseur de la couche de boue qui gèlera dans un délai raisonnable si les cycles de gel/dégel sont normaux pendant l'hiver (Crites *et al.*, 2014). Dans de nombreux endroits, une grande couche unique peut ne jamais se figer complètement sur le sol, donc seule la partie supérieure passe par des cycles de congélation et de décongélation alternés. Il est absolument essentiel que la masse entière de boues soit complètement congelée pour que la déshydratation soit efficace (Taylor et Francis Group, 2006).

Ces paramètres indiquent que la hauteur du lit de boues a une influence très importante sur les performances de déshydratation par gel/dégel. Des recherches menées au CRREL indiquent qu'une couche de boues ayant une épaisseur de 3 po (7-8 cm) est utile pour la plupart des endroits dans les climats modérément froids (Reed *et al.*, 1984a). Une couche plus épaisse est possible dans les climats plus froids. Par exemple, une épaisseur de 9 po (23 cm) de boues de traitement d'eau gèle avec succès à Duluth, au Minnesota, (Schleppenback, 1983). Une augmentation du nombre de couches peut alors être justifiée par une évaluation détaillée lors de la conception finale. La congélation ou la décongélation d'une couche de boue peut être décrite par l'[Équation 1.1](#) (Taylor et Francis Group, 2006).

Équation 1.1 Détermination de la profondeur de gel/dégel d'une couche de boues

$$Y = m (\Delta T \cdot t)^{1/2}$$

Y = Profondeur de congélation ou de décongélation (cm) ;

m = coefficient de proportionnalité (cm (°C·j)^{-1/2}) = 2,04 cm (°C·j)^{-1/2} ;

ΔT = différence de température entre 0°C (32°F) et la température moyenne de l'air ambiant pendant la période d'intérêt (°C; °F) ;

t = période de préoccupation (jour) ;

ΔT × t = indice de congélation ou de décongélation (°C·j; °F·j).

Depuis de nombreuses années, la profondeur de la formation de glace sur les étangs et les cours d'eau a été évaluée en se basant sur l'Équation 1.1. Le coefficient de proportionnalité « m » est lié à la conductivité thermique, à la densité et à la chaleur de fusion latente pour le matériau congelé ou décongelé (Taylor et Francis Group, 2006). Une valeur médiane de 2,04 a été déterminée expérimentalement pour les boues d'eaux usées dont la siccité se situe dans la gamme de 0 à 7% de ST (Reed *et al.*, 1984). La même valeur s'applique au traitement de l'eau et aux boues industrielles dans la même plage de concentration (Crites *et al.*, 2014). L'indice de congélation ou de décongélation « ΔT × t » utilisé dans l'Équation 1.1 est une caractéristique environnementale définie pour un emplacement particulier. Il peut être calculé à partir des enregistrements météorologiques et peut également être trouvé directement dans d'autres sources (Whiting, 1975). Le facteur ΔT dans l'Équation 1.1 est la différence entre la température moyenne de l'air pendant la période de préoccupation et 32°F (0°C). Un exemple de détermination de l'indice de congélation selon la procédure de calcul de base est donné ci-dessous.

1.4.10.3 Exemple de détermination de l'indice de congélation

La température moyenne de l'air pour une période de 5 jours est indiquée ci-dessous. L'indice de congélation se calcule comme suit :

Jours	Température moyenne (°C)
1	0
2	-6
3	-9
4	+3
5	-8

La température moyenne de l'air pendant 5 jours est de -4°C et l'indice de congélation pour la même période est :

$$\Delta T * t = [0 - (-4)] * (5) = 20^{\circ}\text{C.j}$$

Selon Taylor et Francis Group, le taux de congélation diminue avec le temps sous des températures stables, car le matériau congelé agit comme une barrière isolante entre l'air ambiant froid et la boue restante non glacée. En conséquence, il est possible de geler une profondeur totale plus grande de boues dans un temps donné si la boue est appliquée en couches minces.

Dans les climats les plus froids, l'épaisseur de la couche de boue n'est pas critique. Cependant, dans les régions plus tempérées, en particulier celles qui vivent alternativement des périodes de gel/dégel, l'épaisseur de la couche pourra influencer de manière très importante les performances de déshydratation. Les calculs réalisés selon l'Équation 1.1 ont tendance à converger vers une profondeur de 8 cm comme valeur pratique pour presque tous les endroits où des conditions de congélation se produisent. À 23 °F (-5 °C), une hauteur de 3 po (7-8 cm) devrait congeler en environ 3 jours, et à 30 °F (-1 °C), il faudrait environ deux semaines (Crites

et al., 2014). Il est suggéré qu'une épaisseur de 8 cm peut être utilisée pour l'évaluation de la faisabilité et les conceptions préliminaires (Taylor et Francis Group, 2006).

1.4.11 Comparaison des techniques de déshydratation des boues

Le [Tableau 1.9](#) résume les différents avantages et inconvénients de chaque technique de déshydratation des boues d'épuration. Afin de faire face à tous les problèmes rencontrés en contexte nordique (absence de moyens d'assainissement, accroissement de la population, présence de pergélisol), l'utilisation de procédés de déshydratation des boues d'épuration par gel/dégel s'avère être une technique prometteuse. En effet, le temps froid et les températures de congélation pendant une période longue de l'année (8 mois) seront bénéfiques en termes d'efficacité de traitement et de coûts d'investissement et d'opération, de fait que le concept doit dépendre de la congélation naturelle (Vesilind *et al.*, 1991). La congélation puis la décongélation d'une boue permettent de transformer un matériau ayant une consistance gélatineuse en un matériau granulaire qui se draine facilement. Les boues, en général, peuvent être déshydratées par gel/dégel quelle que soit la boue initiale, leur concentration ou le degré de stabilisation, mais la rentabilité de l'opération peut être affectée si la boue est très diluée (moins de 1% de solides). De ce fait, cela exigerait plus d'espace pour les lits de congélation, ce qui augmenterait nécessairement les coûts du procédé. Par conséquent, des boues épaissies dans la gamme de 2 à 7% de solides sont recommandées (Reed *et al.*, 1985).

Tableau 1.9 Comparaison des différentes techniques de déshydratation (Blais, 2016)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Centrifugeuses	Rapidité de démarrage/arrêt Bon maintien des odeurs	Consommation énergétique élevée Bruit
Filtres presses à plateaux	Siccité finale supérieure à 30% Très bon rendement de capture Bonne texture des boues	Coût d'investissement élevé Nécessité d'une surveillance Productivité faible
Lits de séchage	Siccité finale élevée (entre 40 et 60%) Amélioration du rendement Augmentation de la vitesse de drainage	Utilisation limitée
Lits de congélation	Siccité finale importante (entre 20 et 45%) Technique efficace pour tous les types de boues d'épuration Production d'un résidu peu odorant	Coûts élevés dans les régions tempérées

2 HYPOTHÈSES, OBJECTIFS ET ORIGINALITÉ DE RECHERCHE

2.1 Contexte

Dans le cas du village de Salluit, la gestion des boues d'épuration peut présenter un risque pour la santé humaine et animale en raison du climat, de l'état du sol, de la taille et de la répartition de la population, des facteurs socio-économiques et de l'accès aux services et aux installations. La présente étude vise à trouver un traitement durable, pratique et rentable de la gestion des boues d'épuration dans les collectivités du Nord. Selon le protocole d'Affaires autochtones et du Nord Canada (AINC) (2010) pour les systèmes centralisés d'épuration des eaux usées dans les collectivités nordiques, tous les territoires financés par les Affaires autochtones et Développement du Nord Canada (AADNC) doivent améliorer leurs systèmes de traitement des boues. Ils devraient également être limités par les règlements fédéraux ou provinciaux, les codes de pratique ou les lignes directrices applicables à la gestion et à l'élimination finale des boues et des autres résidus de traitement (Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 2010). La plupart de ces régions ont des hivers extrêmement froids et des étés courts. Les boues produites dans ces communautés sont généralement déversées dans des lagunes de boues, expédiées à la décharge locale ou transportées à l'usine de traitement équipée la plus proche pour traitement ultérieur.

L'objectif global de ce projet est d'évaluer le potentiel du procédé de gel/dégel comme méthode de déshydratation des boues d'épuration produites dans des villages nordiques, tel que celui de Salluit au nord du Québec.

2.2 Hypothèses

L'hypothèse de ce projet est qu'il est possible de développer une filière de gestion des boues d'épuration issues du traitement des eaux usées municipales des communautés nordiques qui soit efficace et économiquement viable, tout en répondant aux besoins spécifiques du milieu nordique. Les sous-hypothèses de ce travail de recherche sont les suivantes :

- **Hypothèse 1** : Il est possible d'adapter le design de la technique de gel/dégel pour la rendre efficace dans les conditions climatiques présentes dans le nord et bénéfique en termes de coûts étant donné que la congélation des boues sera naturelle (aucun apport d'énergie requis pour la congélation) ;
- **Hypothèse 2** : Il est possible d'identifier les paramètres opératoires (type de boues, hauteur de boues, temps de congélation, etc.) pouvant influencer la performance du procédé ;
- **Hypothèse 3** : Il est possible d'identifier si la variabilité des températures aura un effet sur la dégradation de la matière organique et si des cycles successifs de gel/dégel pourront améliorer la déshydratation des boues.

2.3 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude consiste à appliquer un procédé de déshydratation des boues d'épuration dans les régions nordiques du Canada et, plus spécifiquement, dans la région du village de Salluit pour le rendre efficace et économiquement viable et ce, malgré les défis imposés par les milieux nordiques.

Pour réaliser cet objectif, des objectifs plus spécifiques ont été fixés comme suit :

- Caractériser les différents types de boues pouvant être générés lors du traitement des eaux usées ;
- Évaluer l'influence des paramètres opératoires (type de boues, épaisseur de la couche de boues, teneur initiale en ST, durée de congélation, etc.) sur les performances du procédé ;
- Étudier l'effet de l'ajout successif de couches de boues sur les performances de déshydratation des boues ;
- Évaluer l'effet des cycles de congélation/décongélation sur les performances de déshydratation des boues.

2.4 Originalité

La présente étude vise à trouver un traitement durable, pratique et rentable pour la gestion des boues d'épuration dans les collectivités nordiques. Différents procédés ont été développés pour traiter ces boues, mais il existe peu d'études sur les performances de la déshydratation des boues par gel/dégel dans le Nord du Canada. L'originalité de ce projet est donc de développer un procédé de déshydratation des boues d'épuration par la technique de gel/dégel qui s'adapte aisément au Nord du Canada, tout en bénéficiant du climat qui se trouve dans ces régions pour que la congélation soit naturelle. Comme mentionné précédemment, le traitement de congélation/décongélation est une méthode simple, pratique et peu coûteuse pour la déshydratation des boues et est applicable pour les petites usines de traitement dans les régions froides et reculées. En outre, le processus de déshydratation présente des avantages en termes de potentiel de récupération des ressources, dont les boues déshydratées qui peuvent être valorisées en tant qu'engrais organique.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1. Démarche méthodologique

Afin d'atteindre l'objectif général de cette étude, une démarche méthodologique a été élaborée et comporte les étapes principales suivantes :

- Réaliser une revue bibliographique portant sur les différentes caractéristiques des régions nordiques au Canada et, plus précisément, sur la région de Salluit, ainsi que sur la gestion des boues d'épuration dans ces régions éloignées ;
- Échantillonner, préparer et caractériser les échantillons de boues d'épuration initiales ;
- Effectuer des essais de déshydratation des boues d'épuration par gel/dégel afin d'améliorer la séparation solide/liquide ;
- Évaluer l'influence de divers paramètres opératoires (type de boues, hauteur des boues, durée de congélation, siccité des boues, etc.) sur les performances de déshydratation des boues. Les domaines opératoires étudiés ont été sélectionnés en se basant sur les conditions climatiques de la région de Salluit ;
- Évaluer l'influence de couches successives et des cycles de gel/dégel sur les performances de déshydratation des boues.

3.2. Matériels et méthodes

Cette section décrit l'ensemble des méthodes d'échantillonnage, de caractérisation et de déshydratation des boues utilisées au cours de ce projet de recherche pour optimiser la déshydratation des boues d'épuration domestiques par la technique de gel/dégel en milieu nordique.

3.2.1. Échantillonnage, préparation et caractérisation des boues

Au cours de ce projet, les boues d'épuration utilisées ont été échantillonnées pour chaque série d'essais à la station Est de la ville de Québec (Québec, QC, Canada) dans des chaudières en polyéthylène à haute densité (HDPE) ayant une capacité de 20 L. Lors de chaque série d'échantillonnage, des échantillons de boues primaires ont été collectés à la sortie des bassins de décantation primaire et des échantillons de boues secondaires ont été pris à la sortie des bassins de décantation secondaire.

La [Figure 3.1](#) représente un schéma de traitement des eaux usées et les différents essais de gel/dégel réalisés durant le projet.

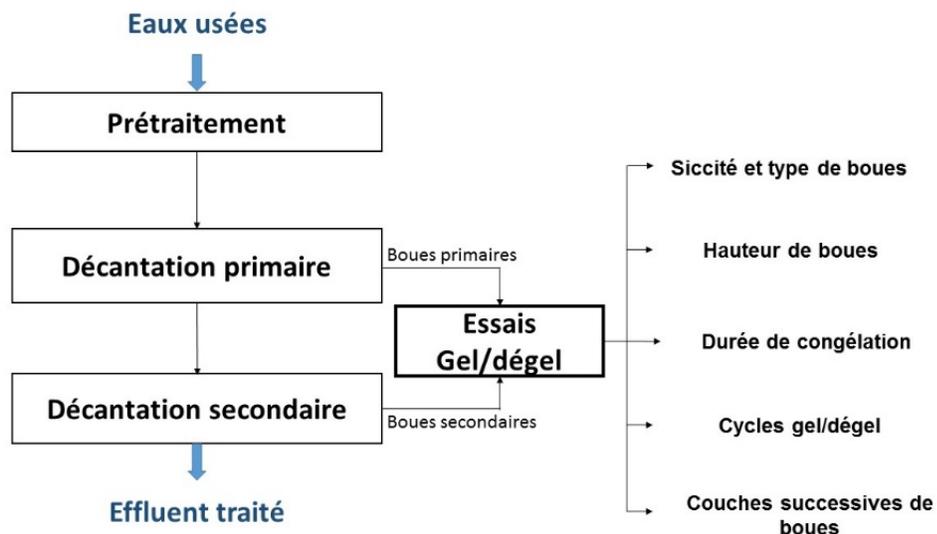


Figure 3.1 Approche expérimentale utilisée au cours du projet

Les chaudières de boues ont ensuite été conservées dans une chambre froide à une température de 4°C. Au début de chaque série d'essais, un prélèvement a été réalisé sur chaque échantillon de boues collectées afin de mesurer leur siccité initiale et les teneurs en métaux et nutriments selon les méthodes décrites à la [Section 3.2.3](#). Pour les essais nécessitant de fixer la siccité des boues initiales à une valeur souhaitée, les boues primaires et secondaires ont été centrifugées pendant 10 minutes à une vitesse de 7 000 rpm. La siccité des boues centrifugées a été mesurée et ces boues ont ensuite été diluées avec une quantité d'eau prédéfinie pour atteindre la siccité souhaitée. La siccité du mélange obtenu a été mesurée afin de vérifier que la valeur désirée a bien été obtenue avant de débiter les essais de déshydratation par gel/dégel.

3.2.2. Déshydratation des boues d'épuration par gel/dégel

3.2.2.1. Description du design expérimental et du protocole de gel/dégel

Le procédé de gel/dégel a été réalisé en congelant des boues primaires (BP) produites lors de la décantation primaire, des boues secondaires (BS) provenant de la décantation secondaire, et différents mélanges de ces deux types de boues (Mélange 1 : 50% BP et 50% BS ; Mélange 2 : 70% BP et 30% BS et Mélange 3 : 90% BP et 10% BS) pendant un temps précis. Ensuite, les bouteilles en plastique d'un volume total de 1 L contenant les boues gelées de différents volumes (200 mL, 460 mL, 580 mL, 760 mL) ont été mises à décongeler en les plaçant à l'envers sur des plaques en bois trouées pour que le liquide contenu dans les boues passe à travers un tamis afin de le récupérer dans des béciers, comme le montre la [Figure 3.2](#). Les boues déshydratées s'accumulent soit dans les bouteilles ou soit sur les filtres.

Au cours de cette étude, des essais de déshydratation des boues par gel/dégel ont été réalisés en faisant varier plusieurs paramètres (type de boues, siccité initiale des boues, hauteur des boues, durée de congélation, température de congélation, cycles de gel/dégel, etc.) afin d'évaluer leur influence sur les performances du procédé de déshydratation sélectionné.



Figure 3.2 Photographie montrant la procédure de dégel et d'égouttement des boues d'épuration

3.2.2.2. Influence du type de boues

Pour cet essai, les conditions opératoires ont été fixées comme suit : une hauteur de boues de 10 cm ($V = 580 \text{ mL}$), une teneur initiale en solides totaux de 1,5% (p.p^{-1}), une durée de congélation de 7 jours à une température de -10°C et une période de décongélation de 24 h à température ambiante (24°C). Le procédé de gel/dégel décrit à la [Section 3.2.2.1](#) a été appliqué pour cet essai avec tous les types de boues (BP, BS, Mélange 1, Mélange 2 et Mélange 3).

3.2.2.3. Influence de la hauteur des boues et de la durée de congélation

En ce qui concerne cette expérience, les boues mixtes (70% BP, 30% BS) ont subi une congélation à une température de -10°C durant différentes périodes (2, 8 et 14 jours), à une siccité initiale fixée à 1,5%. Des essais ont également été réalisés avec différentes hauteurs de boues soient 4, 8 et 12 cm. Après le gel, les boues ont été décongelées pendant 24 h à une température de 24°C .

3.2.2.4. Influence de la siccité initiale des boues

Lors de cette étude, le type de boues utilisé est le Mélange 2 composé de 70% de BP et de 30% de BS. Les teneurs initiales en ST ont été fixées à 0,8 - 1,5 - 3,0 et 4,5% afin de déterminer l'effet de la siccité initiale sur la performance du procédé. Les autres conditions expérimentales (temps et températures de congélation/décongélation) étaient les mêmes que celles fixées pour mesurer l'influence du type de boues.

3.2.2.5. Influence des cycles de gel/dégel

L'influence des cycles de gel/dégel a été déterminée en utilisant les boues mixtes (70% BP, 30% BS) à une hauteur de 10 cm et une teneur initiale en ST fixée à 1,5%. Dans cette étude, les boues ont été congelées pendant deux jours à une température de -10°C avant d'être décongelées pendant 24 h à 24°C. Quatre cycles de gel/dégel ont été réalisés avant de récupérer séparément les boues déshydratées et les lixiviats.

3.2.2.6. Influence de la congélation de couches successives de boues

L'essai de l'influence de la congélation de couches successives de boues a été réalisé dans trois colonnes en acrylique d'une hauteur totale de 48 cm et d'un diamètre de 20 cm. La congélation a été faite à -10°C en ajoutant une couche de boues mixtes (70% BP, 30% BS) d'une siccité de 1,5% et d'une hauteur de 10 cm dans chaque colonne. Tous les 2 jours pendant une période de 6 jours, 10 cm du mélange de boues ont été ajoutés dans chaque colonne. Ensuite, les colonnes contenant les boues gelées ont été décongelées pendant 24 h à une température ambiante en ouvrant la vanne à la sortie de chaque colonne pour que le lixiviat passe à travers les granules de boues et s'écoule de la colonne. Comme le montre la [Figure 3.3](#), le lixiviat a été collecté en sortie des colonnes dans des béchers, alors que les boues décongelées sont restées dans les colonnes.

Les colonnes 1, 2, 3 sont d'ailleurs des triplicatas.



Figure 3.3 Photographie montrant les colonnes de percolation utilisées lors de la congélation de couches successives de boues et de leur décongélation

3.2.3. Méthodes analytiques

3.2.3.1. Détermination des solides totaux (ST) et des matières en suspension (MES)

Les ST ont été analysés en triplicata suivant la méthode 2540 B de l'APHA (APHA, 1999). Une masse précise de boues d'épuration humides ($m_{\text{boues humides}}$) a été pesée dans une coupelle en aluminium préalablement pesée (m_{capsule}) et identifiée. Les échantillons de boues humides ont ensuite été mis à sécher au four à 105°C. Après séchage pendant 24 h, les échantillons de boues séchées ont été pesés ($m_{\text{capsule+boues sèches}}$). La siccité des boues a ensuite été déterminée en se basant sur l'Équation 3.1.

Équation 3.1 Détermination de la siccité des boues

$$\text{Siccité (\%)} = ((m_{\text{boues humides}} - (m_{\text{capsule+boues sèches}} - m_{\text{capsule}})) / m_{\text{boues humides}}) * 100$$

Les matières en suspension (MES) ont été mesurées en se basant sur la méthode d'analyse MA. 115 – S.S. 1.2 (CEAEQ, 2015). Après chaque étape de décongélation, des volumes de 10 mL de chaque échantillon ($V_{\text{filtré}}$) ont été filtrés sur des membranes Whatman 934-AH ayant une porosité de 1,5 μm , et ayant préalablement été séchées pendant au moins 2 h à 105°C et pesées ($m_{\text{capsule+filtre}}$) (APHA *et al.*, 2005). Les filtres ont ensuite été récupérés et laissés à sécher à 105°C pendant toute la nuit avant de les peser ($m_{\text{capsule+filtre+échantillon sec}}$). Les teneurs en MES ont ensuite été déterminées en se basant sur l'Équation 3.2.

Équation 3.2 Détermination de MES

$$\text{MES (mg/L)} = (m_{\text{capsule+filtre+échantillon sec}} - m_{\text{capsule+filtre}}) / V_{\text{filtré}} * 1000 * 1000$$

Où $m_{\text{capsule+filtre+échantillon sec}}$ est exprimée en g, $m_{\text{capsule+filtre}}$ est exprimée en g et $V_{\text{filtré}}$ est exprimée en mL.

3.2.3.2. Détermination des teneurs en carbone et en nutriments (azote et phosphore)

Une analyse CHNS (carbone, hydrogène, azote et soufre) a été réalisée sur les échantillons solides de boues d'épuration avant et après traitement par gel/dégel pour les essais effectués pour déterminer l'influence du type de boues à l'aide d'un analyseur élémentaire CHNS Flash 2000 (Thermo Fisher Scientific, France) pour déterminer la teneur en carbone total (CT).

La teneur en carbone organique dissous (COD) a également été mesurée dans les échantillons liquides (filtrat) à l'aide d'un appareil Shimadzu VCPH suivant la méthode NPOC. La courbe de calibration s'étend de 0 à 5 mg.L⁻¹. La limite de détection de l'appareil est estimée à 0,05 mg.L⁻¹. Ces analyses ont été effectuées par un technicien de laboratoire au sein de l'INRS-EET.

Les teneurs en azote total et en phosphore total (N_{dissous} , P_{dissous} , $N_{\text{particulaire}}$ et $P_{\text{particulaire}}$) ont été déterminées selon la méthode colorimétrique à l'acide ascorbique (Standard Methods 4500-PE) et la méthode colorimétrique à sulfanilamide après réduction à l'hydrazine (QuikChem® Method 12-107-04-1-E).

3.2.3.3. Détermination des teneurs en métaux et en éléments nutritifs

Les teneurs en métaux et en éléments (Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sn, Zn) présents dans les boues d'épuration ont été déterminées par spectrométrie à émission de plasma induit (ICP-AES) à l'aide d'un appareil Varian (modèle Vista AX CCO Simultaneous ICP-AES, Palo Alto, CA, États-Unis). Pour les échantillons liquides (filtrats de décongélation), des volumes d'échantillons ont été filtrés sur des filtres G6 (Glass fiber, Fisher Scientific, Canada, porosité de 1,5 µm) et acidifiés à 5% HNO₃ pour déterminer les teneurs en éléments présents en solution. Les échantillons solides et certains échantillons liquides (détermination des éléments totaux) ont subi une digestion totale (HNO₃ + H₂O₂) selon le protocole de la terminologie recommandée pour l'analyse des métaux (CEAEQ, 2012) avant d'être analysés par ICP-AES. En ce qui concerne la calibration de l'ICP-AES, différentes solutions contrôles ont été préparées à partir d'échantillons certifiés (SCP Science, Montréal, QC, Canada) pour vérifier la calibration de l'appareil lors de chaque série d'analyses et identifier toute dérive éventuelle de l'appareil au cours des analyses.

3.2.3.4. Détermination des teneurs en coliformes fécaux

En ce qui concerne les coliformes fécaux (CF), des échantillons ont été envoyés dans les 24 h suivant l'échantillonnage au laboratoire AGAT pour analyse. Les teneurs en CF ont été déterminées selon la méthode MA. 705 – Ec-BCIG 1.0 pour les échantillons issus des essais de gel/dégel en colonnes (influence des couches successives de boues).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Caractérisation des boues initiales

Tout au long de ce projet, la caractérisation des boues d'épuration a été réalisée en se basant principalement sur les ST et les teneurs en métaux et en éléments nutritifs, afin de pouvoir comparer les boues initiales et les boues finales obtenues après le traitement. Le [Tableau 4.1](#) présente quelques teneurs en métaux et en éléments nutritifs présentes dans les boues primaires (BP), les boues secondaires (BS) et les boues mixtes (BM). D'après les résultats obtenus, les BS ont des teneurs en métaux et en éléments nutritifs plus élevées par rapport aux BP sauf pour l'aluminium. Ceci s'explique par l'ajout de différents éléments lors du traitement secondaire des boues tels que le phosphore et autres afin d'assurer un bon fonctionnement des activités microbiennes (Bellamy et al., 1995; Zibliske, 1987). L'accumulation de l'aluminium dans les BP s'explique par l'ajout d'alun (sulfate d'aluminium) afin d'améliorer la décantation des BP (MENV, 2001). Dans les boues mixtes, l'ajout d'une plus grande quantité de BS peut diminuer ou augmenter les teneurs en métaux et en éléments nutritifs. Par exemple, les BM composées de 90% de BP et de 10% de BS ont une teneur initiale en Al de 4 450 mg/kg alors que les BM composées de 50% de BP et de 50% de BS ont une teneur moyenne en aluminium de 6 710 mg/kg. Ainsi, le type de boue et leur proportion jouera un rôle dans la variabilité des teneurs en métaux et en éléments nutritifs dans les boues déshydratées. Les BS possèdent également une siccité plus faible, soit de 1,2%, comparativement à 1,5% pour les BP et les BM.

Le [Tableau 4.2](#) présente les teneurs en métaux et en éléments nutritifs présents dans les BM en fonction des siccités initiales. Cette fois-ci, l'objectif est de comparer ces teneurs avec des BM fixes mais avec des ST variables. Les résultats ne permettent pas vraiment de dégager une tendance, sauf pour le sodium, où une siccité plus élevée diminue sa teneur.

Tableau 4.1 Caractéristiques des boues municipales de la station d'épuration de la ville de Québec

Paramètres	ST (%)	Métaux et éléments nutritifs (%)					
		Al	Ca	P	S	Fe	Na
Boues primaires	1,5 ± 0,4 (CV = 25%)	0,3 - 1,6	1,8 - 2,7	0,7 - 1,2	0,4 - 0,5	0,6 - 1,0	0,8 - 2,4
Boues secondaires	1,2 ± 0,1 (CV = 11%)	0,6 - 1,0	1,5 - 2,8	1,9 - 2,7	0,6 - 0,9	0,4 - 1,6	0,3 - 2,8
Mélange de boues							
Boues mixtes (50/50)	1,5	0,7	1,7	0,5	0,5	0,7	0,6
Boues mixtes (70/30)	1,5 ± 0,03 (CV = 2,3%)	0,6 - 1,6	1,7 - 2,4	1,2 - 1,3	0,4 - 0,5	0,7 - 1,2	0,6 - 0,7
Boues mixtes (90/10)	1,5	0,5	1,9	0,9	0,4	0,7	0,8

Tableau 4.2 Teneurs en Al et Fe et en éléments nutritifs (%) présents dans les BM en fonction des siccités initiales fixées aux valeurs désirées

Paramètres	ST (%)	Métaux et éléments nutritifs (%)					
		Al	Ca	P	S	Fe	Na
Mélange de boues							
Boues mixtes (70/30)	0,8	0,5	0,2	1,3	0,5	0,9	1,8
Boues mixtes (70/30)	1,5	0,6	0,2	1,5	0,5	1,1	1,6
Boues mixtes (70/30)	3,0	0,6	0,2	1,6	0,5	1,1	0,4
Boues mixtes (70/30)	4,5	0,6	0,2	1,2	0,4	0,9	0,3

4.2. Déshydratation des boues par gel/dégel

Au cours de ce projet, le traitement proposé consiste en une déshydratation des boues par gel/dégel. Plusieurs paramètres ont été étudiés, à savoir l'influence du type de boues, de la hauteur des boues, du temps de congélation, de l'application de plusieurs cycles gel/dégel, de la siccité initiale des boues, ainsi que de l'ajout successif des couches de boues.

4.2.1. Influence du type de boues

4.2.1.1. Solides totaux des boues initiales et des boues finales

Le [Tableau 4.3](#) présente les teneurs en ST mesurées pour les boues municipales après le traitement de déshydratation par gel/dégel en fonction du type de boues. Le procédé permet d'augmenter largement les ST, soit de 1,2 à 21,1% pour les BS et de 1,5 à 11,8% pour les BP (voir [Tableau 4.1](#)). Les plus hautes teneurs en ST ont été obtenues pour les BS, soit avec une moyenne de $21 \pm 1\%$. Lors de la congélation, la lyse cellulaire présente dans les BS entraînent un relargage du contenu des cellules dans les boues pendant le dégel. En ce qui concerne les mélanges de boues, plus la quantité en BS est élevée, plus la teneur en ST des boues déshydratées correspondantes est importante, variant de 14,3 à 11,8% pour les mélanges 1 (50% BP – 50% BS) et 3 (90% BP – 10% BS), respectivement.

Ainsi, d'après les deux tests de Student, les valeurs p calculées pour chacun des types de boues ($< 0,0001$) sont inférieures au niveau de signification $\alpha = 0,05$. Il existe donc des différences significatives pour la moyenne des ST d'un même type de boue avant et après traitement (pour BP et BS individuellement), et pour la moyenne des ST de chacun des types de boues (pour avant et après traitement individuellement). Ces résultats montrent que le traitement par gel/dégel permet d'augmenter de manière significative les ST.

De plus, la taille des particules joue un rôle essentiel sur l'efficacité des traitements de congélation/décongélation, puisque les plus petites particules sont plus facilement rejetées des cristaux de glace en croissance, alors que les plus grosses particules sont plus susceptibles de rester piégées (Corte, 1962). Cela signifie que les BS contenant de fines particules peuvent être gelées plus rapidement que les BP contenant des particules plus grossières (Sabri, 2017).

Comme mentionné précédemment, dans les territoires nordiques, il n'est pas possible d'utiliser tous les procédés traditionnels pour traiter les boues comme la digestion biologique et la déshydratation mécanique en raison du froid rencontré dans ces régions. Toutefois, ce climat peut être employé de manière bénéfique pour le procédé de gel/dégel tout en ayant des avantages en termes de coûts (Hedström et Hanaeus, 1999; Vesilind *et al.*, 1991).

Tableau 4.3 Teneurs en ST des boues finales (%) obtenues après traitement par gel/dégel en fonction du type de boues

Échantillons	ST des boues finales (%)
BP	11,8 ± 0,2 (CV = 2,1%)
BS	21,1 ± 0,9 (CV = 4,1%)
BM (50/50)	14,3 ± 0,2 (CV = 1,6%)
BM (70/30)	13,2 ± 1,1 (CV = 8,5%)
BM (90/10)	11,8 ± 0,4 (CV = 3,8%)

4.2.1.2. Matières en suspension et carbone organique dissous du lixiviat

Les analyses réalisées sur le liquide obtenu après le traitement par gel/dégel montrent que les lixiviats issus des essais réalisés sur les BS ont des concentrations plus élevées en termes de MES et de COD par rapport aux BP comme le présente la [Figure 4.1](#). Ceci s'explique par la présence de la biomasse morte et lysée dans les BS. La même observation est retrouvée pour les BM. En effet, plus les BM contiennent de BS, plus les teneurs en MES et en COD mesurées dans les lixiviats obtenus après gel/dégel deviennent importantes. Par ailleurs, les résultats du test de Student (indice de confiance de 95%) avec des valeurs inférieures à 0,0013 montrent que les différences entre les teneurs en MES et en COD dans les lixiviats provenant des différents types de boues sont significatives.

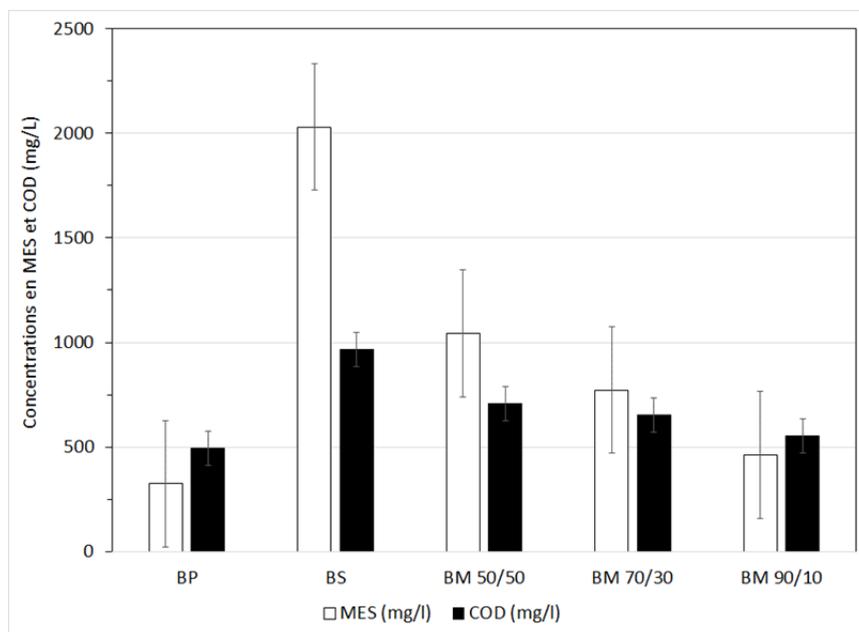


Figure 4.1 Influence du type de boues (BP - BS - BM 50/50 - BM 70/30 - BM 50/50) sur les performances de déshydratation (siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C, hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.1.3. Métaux et éléments nutritifs des boues initiales, finales et du lixiviat

Le [Tableau 4.4](#) présente les teneurs en métaux et en éléments nutritifs présents dans les boues initiales et les boues finales. Après le procédé de déshydratation par gel/dégel, les teneurs en Ca, K, Mg et en Na connaissent une certaine diminution et les teneurs en Al, Fe, P et en S restent plus ou moins stables. Les résultats obtenus par le test statistique de t-Student avec des valeurs inférieures à 0,05 (valeurs $p = 0,002 - 0,0001 - 0,023 - 0,002$) pour les teneurs en Ca, K, Mg et en Na, montrent que la différence entre les moyennes des teneurs dans les boues finales pour les différents types de boues est significative. Les teneurs en Al, Fe, P et en S ne diffèrent pas significativement (valeurs $p = 0,664 - 0,800 - 0,526 - 0,544$).

Tableau 4.4 Teneurs en métaux et éléments nutritifs des boues initiales et des boues finales sèches (%)

Type de boues	Al	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Na
Boues initiales								
BP	0,35 ± 0,01	1,78 ± 0,02	0,58 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,73 ± 0,01	0,36 ± 0,01	0,78 ± 0,01
BS	1,02 ± 0,02	1,53 ± 0,03	0,89 ± 0,03	0,37 ± 0,01	0,36 ± 0,01	2,33 ± 0,01	0,69 ± 0,01	0,31 ± 0,07
BM (50/50)	0,67 ± 0,02	1,65 ± 0,03	0,71 ± 0,04	0,31 ± 0,02	0,29 ± 0,02	1,45 ± 0,03	0,53 ± 0,01	0,55 ± 0,01
BM (70/30)	0,56 ± 0,02	1,71 ± 0,04	0,67 ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,27 ± 0,01	1,19 ± 0,02	0,47 ± 0,01	0,61 ± 0,01
BM (90/10)	0,44 ± 0,01	1,91 ± 0,03	0,65 ± 0,01	0,37 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,95 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,81 ± 0,05
Boues finales								
BP	0,37 ± 0,04	1,16 ± 0,08	0,53 ± 0,05	0,06 ± 0,03	0,14 ± 0,02	0,62 ± 0,05	0,33 ± 0,02	0,66 ± 0,01
BS	1,36 ± 0,04	1,37 ± 0,02	0,86 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,27 ± 0,01	2,02 ± 0,02	0,67 ± 0,01	0,25 ± 0,01
BM (50/50)	0,75 ± 0,02	1,25 ± 0,01	0,68 ± 0,02	0,08 ± 0,01	0,19 ± 0,05	1,14 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,48 ± 0,01
BM (70/30)	0,58 ± 0,05	1,16 ± 0,02	0,61 ± 0,02	0,07 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,92 ± 0,05	0,39 ± 0,02	0,49 ± 0,01
BM (90/10)	0,44 ± 0,03	1,13 ± 0,05	0,56 ± 0,04	0,07 ± 0,03	0,15 ± 0,02	0,72 ± 0,03	0,35 ± 0,01	0,51 ± 0,01

La [Figure 4.2](#) présente les teneurs en métaux et en éléments nutritifs mesurées dans le lixiviât de décongélation. D'après les résultats, le lixiviât obtenu après le gel/dégel contient de très faibles concentrations en Al pour tous les types de boues et des teneurs importantes au niveau du Ca et du Na. Ceci s'explique par l'utilisation régulière d'un coagulant pendant le traitement des eaux pour améliorer l'enlèvement de la matière organique et du phosphore. Par conséquent, après la déshydratation par gel/dégel, l'Al fait une liaison chimique avec les particules de boues pâteuses (MENV, 2001).

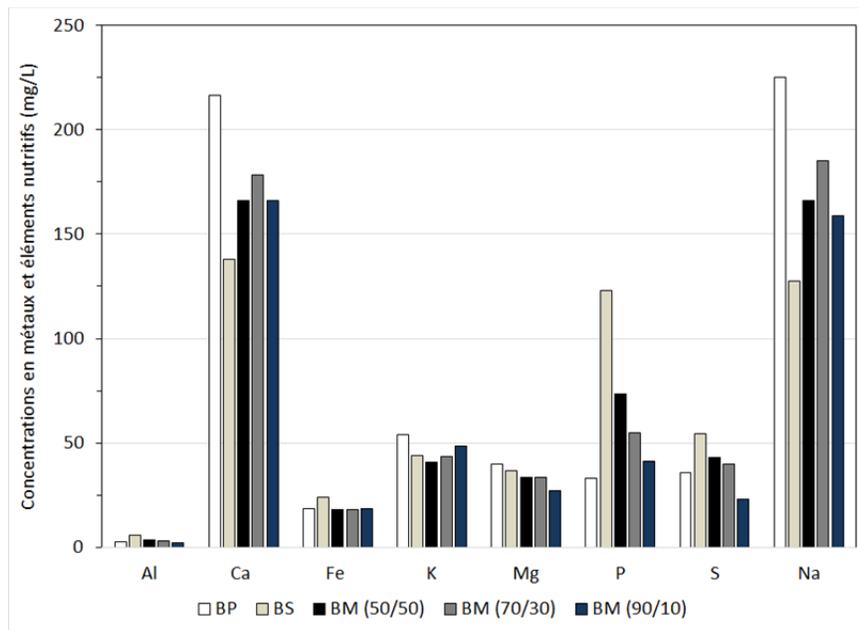


Figure 4.2 Influence du type de boues (BP - BS - BM 50/50 - BM 70/30 - BM 50/50) sur les teneurs résiduelles en métaux et en éléments nutritifs dans le lixiviât (siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

Les résultats du bilan total de gel/dégel et le bilan de masse de matière sèche pour l'influence du type de boues sont présentés en [Annexes 1](#) et [2](#).

4.2.2. Influence de la hauteur des boues et du temps de congélation

Lors de cette série d'essais, plusieurs paramètres ont été mesurés, à savoir les ST des boues initiales (avant congélation) et des boues finales (boues déshydratées), les teneurs en MES et en COD présents dans le lixiviat de déshydratation ainsi que les teneurs en métaux et en éléments nutritifs présents dans les boues initiales, les boues finales et le lixiviat de déshydratation.

4.2.2.1. Solides totaux des boues finales

Les résultats obtenus lors de cet essai montrent qu'il n'y a pas de variation du pourcentage de ST de l'échantillon en fonction de la hauteur des boues ou du temps de congélation comme le montre la [Figure 4.3](#). Les seules exceptions sont pour les ST des BM à la hauteur de 4 cm, qui connaissent une certaine diminution à des temps de congélation de 8 et 14 jours, ce qui explique que les 2 jours de congélation pourront être suffisants en termes de ST pour une hauteur de 4 cm.

De fait, les résultats obtenus lors du test statistique montrent que les différences entre les ST finaux sont significatives (valeur $p < 0,0001$) juste en fonction du temps de congélation à la hauteur de 4 cm. Pour le reste, le test de Student montre qu'il n'y a aucune différence en termes des ST finaux (valeur $p = 0,052$).

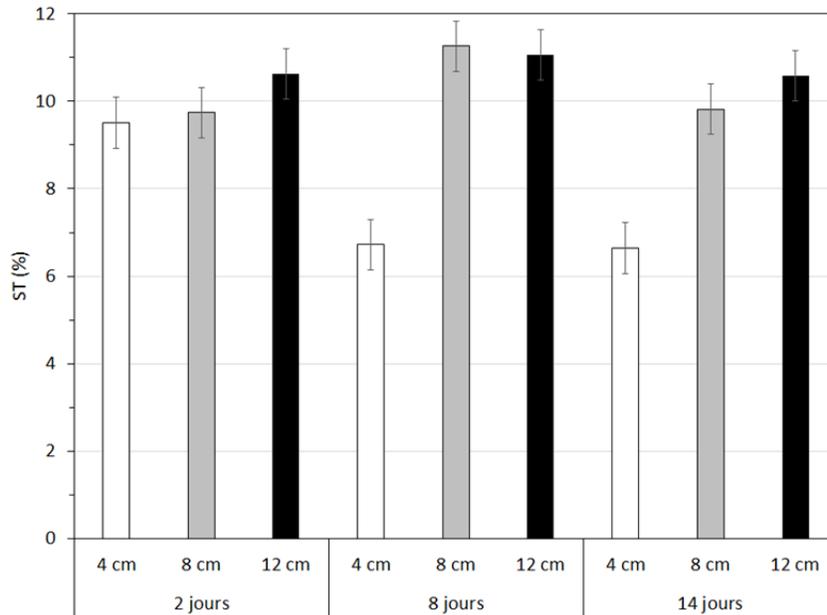


Figure 4.3 Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.2.2. Matières en suspension et carbone organique dissous du lixiviat

Les résultats de la [Figure 4.4](#) montrent que la hauteur et le temps de congélation des boues font varier les teneurs en MES et en COD présents dans le lixiviat, mais ce, sans afficher de tendance particulière. Après 2 jours de congélation, les teneurs en MES et COD semblent avoir une tendance en fonction de la hauteur de boues, ce qui n'est pas observé pour les autres temps de congélation. Il semble que 2 jours de congélation ne soit pas suffisant pour des hauteurs de boues de 8 et 12 cm, ce qui pourrait expliquer pourquoi les résultats ne suivent pas les même tendances que pour 8 et 12 jours de congélation.

Selon le test d'égalité des moyennes de Student, la valeur p obtenue est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$ (valeur $p = 0,257$), ce qui explique que les teneurs de MES et COD

dans le lixiviat ne sont pas significativement différentes entre elles selon le temps de congélation et aussi selon la hauteur des boues.

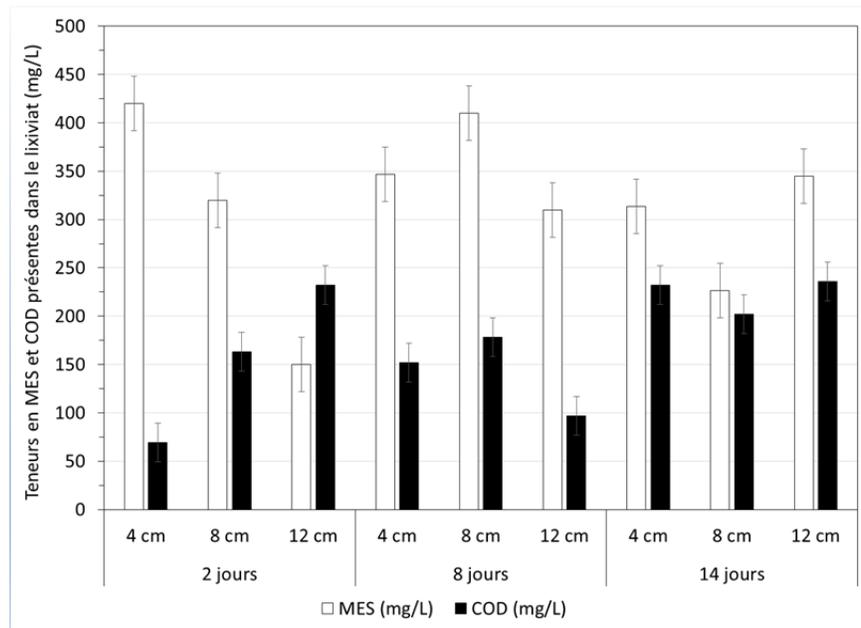


Figure 4.4 Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation = -10°C , hauteur de congélation = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.2.3. Métaux et éléments nutritifs des boues initiales, finales et du lixiviat

Le [Tableau 4.5](#) fait état des teneurs en métaux et en éléments nutritifs présents dans les boues initiales et finales. Les résultats montrent qu'il n'y a pas beaucoup de différences entre les teneurs en métaux et en éléments nutritifs dans les boues finales selon les différents temps de congélation et les différentes hauteurs de boues testés. Les boues solides obtenues après le traitement par gel/dégel ont des teneurs qui ont juste diminué en termes de Ca et de Na. De ce fait, ces deux éléments sont majoritairement retrouvés dans le lixiviat après le traitement par gel/dégel, comme le montre la [Figure 4.5](#). Un niveau élevé de Na peut causer des dommages

graves et irréversibles au sol. Par conséquent, les doses d'application de Na sont limitées entre 200 et 500 kg/ha/an selon le type de sol (MEO, 2014).

Les résultats du test d'égalité des moyennes montrent que les teneurs dans les boues finales ne sont pas significativement différentes selon le temps de congélation et aussi selon la hauteur des boues (valeur $p = 0,177$).

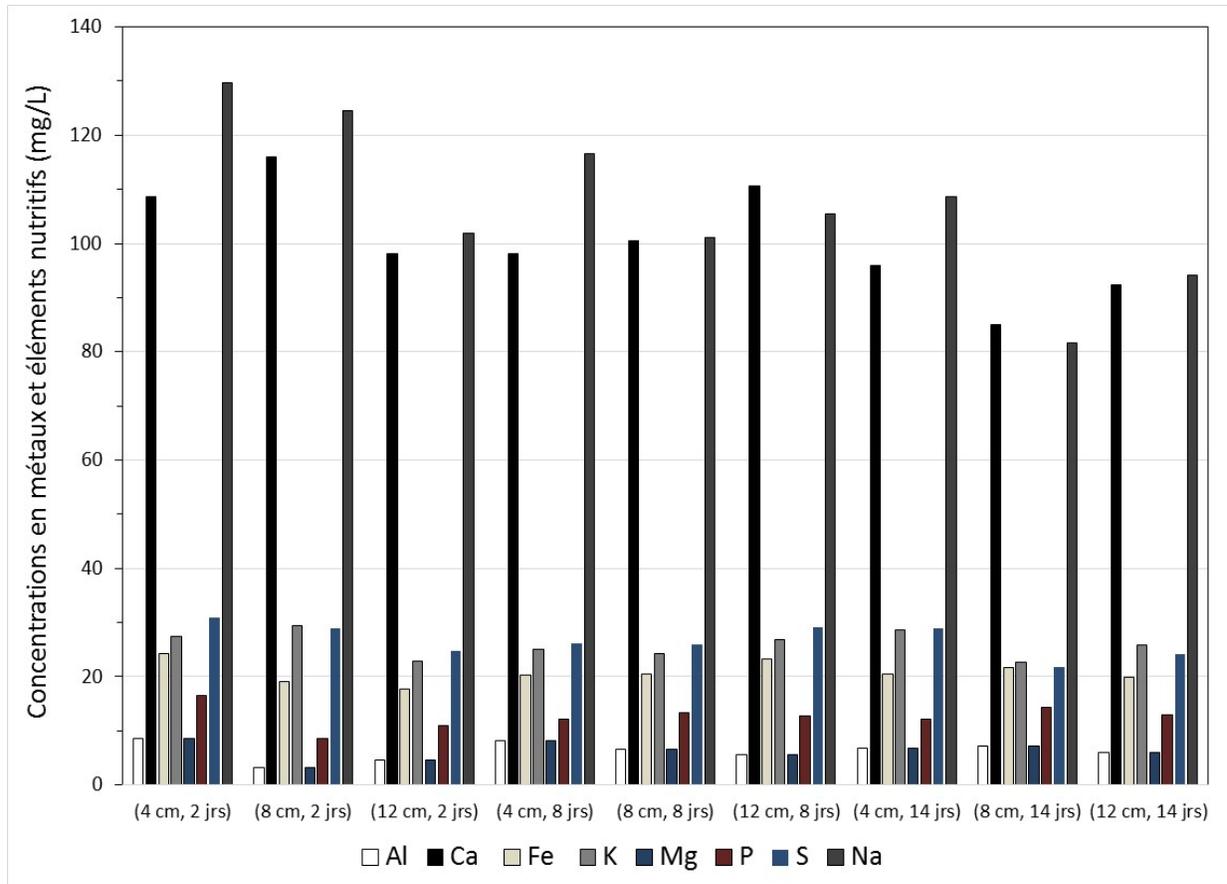


Figure 4.5 Influence de la hauteur et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

Les résultats du bilan total de gel/dégel et le bilan de masse de matière sèche pour l'influence de la hauteur et du temps de congélation des boues sont présentés en [Annexes 3 et 4](#). Ces bilans permettent de vérifier s'il y a eu des pertes ou des contaminations durant le traitement par gel/dégel. Les résultats des entrées/sorties de chaque échantillon sont généralement situés entre 0,72 et 0,99 (soit proche de 1) et valident le procédé de traitement.

Tableau 4.5 Teneurs en métaux et éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et finales en fonction de la hauteur de boues et du temps de congélation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 8, 14 jours, température de congélation : -10°C , hauteur de congélation = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

Type de boues	Al	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Na
Boues initiales								
Boues mixtes (70/30)	1,67 ± 0,06	2,43 ± 0,04	1,21 ± 0,04	0,24 ± 0,01	1,67 ± 0,04	1,30 ± 0,10	0,49 ± 0,01	0,65 ± 0,02
Boues finales								
1 (2 jours, 4 cm)	1,63 ± 0,02	1,95 ± 0,08	1,16 ± 0,05	0,11 ± 0,01	1,63 ± 0,01	1,35 ± 0,02	0,39 ± 0,01	0,06 ± 0,01
2 (2 jours, 8 cm)	1,80 ± 0,10	2,10 ± 0,10	1,20 ± 0,10	0,13 ± 0,01	1,81 ± 0,02	1,45 ± 0,08	0,41 ± 0,03	0,07 ± 0,01
3 (2 jours, 12 cm)	1,74 ± 0,03	2,00 ± 0,10	1,17 ± 0,05	0,14 ± 0,01	1,74 ± 0,01	1,41 ± 0,04	0,39 ± 0,01	0,06 ± 0,01
4 (8 jours, 4 cm)	1,71 ± 0,04	2,00 ± 0,10	1,17 ± 0,02	0,15 ± 0,01	1,71 ± 0,04	1,36 ± 0,03	0,41 ± 0,02	0,12 ± 0,01
5 (8 jours, 8 cm)	1,71 ± 0,09	1,90 ± 0,10	1,13 ± 0,07	0,13 ± 0,01	1,71 ± 0,02	1,36 ± 0,08	0,39 ± 0,01	0,07 ± 0,01
6 (8 jours, 12 cm)	1,59 ± 0,02	1,93 ± 0,02	1,09 ± 0,01	0,11 ± 0,01	1,59 ± 0,02	1,31 ± 0,01	0,41 ± 0,02	0,06 ± 0,01
7 (14 jours, 4 cm)	1,71 ± 0,02	2,05 ± 0,03	1,19 ± 0,05	0,13 ± 0,01	1,71 ± 0,05	1,41 ± 0,02	0,41 ± 0,01	0,10 ± 0,10
8 (14 jours, 8 cm)	1,65 ± 0,08	1,96 ± 0,04	1,14 ± 0,06	0,12 ± 0,01	1,65 ± 0,01	1,35 ± 0,05	0,41 ± 0,02	0,10 ± 0,10
9 (14 jours, 12 cm)	1,65 ± 0,06	2,01 ± 0,08	1,13 ± 0,04	0,12 ± 0,01	1,65 ± 0,04	1,36 ± 0,05	0,42 ± 0,01	0,10 ± 0,10

4.2.3. Influence de cycles de gel/dégel

4.2.3.1. Solides totaux des boues finales

La [Figure 4.6](#) présente les teneurs en solides totaux des boues finales à la suite des quatre cycles de gel/dégel obtenues après le traitement de déshydratation par gel/dégel. Le mélange 2 (70% BP, 30% BS) de boues avec une siccité initiale de 1,5% ([Tableau 4.1](#)) présente après le gel/dégel des teneurs en ST se situant entre 12% et 14%, après 2 ou 8 jours de gel, respectivement.

Comparant aux essais sans cycles répétés de la [Figure 4.3](#), le test statistique de Student montre que la valeur p calculée est de 0,036 au niveau de signification $\alpha = 0,05$. Cela explique que les moyennes de ST des boues finales entre les cycles de gel/dégel et les essais sans cycles répétés sont significativement différentes. L'application de plusieurs cycles de gel/dégel permet donc d'augmenter la déshydratation des boues par rapport aux essais sans cycles répétés.

D'autres études réalisées par Tao et *al.* (2006b) montrent les résultats d'essais de congélation-décongélation cyclique (jusqu'à 6) qui ont été effectués sur deux floccs de boues d'épuration différents provenant d'une industrie agroalimentaire (diamètre de flocc 1 = 2 170 μm et diamètre de flocc 2 = 2 240 μm). Au cours du premier cycle de congélation, les deux floccs ont été brisés par la glace en croissance, et pendant la décongélation, les floccs n'ont été que partiellement restaurés. Les cycles de congélation/décongélation subséquents n'ont généralement pas exercé la même force sur les floccs de boues, ce qui signifie que la déshydratation des boues ne peut pas être améliorée par des cycles répétés de congélation/décongélation.

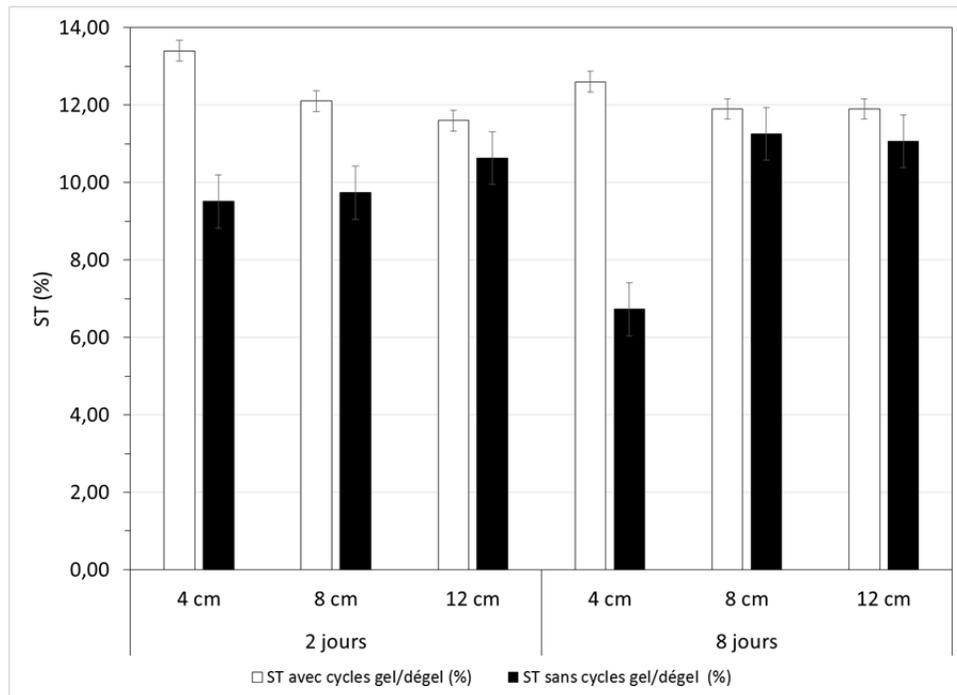


Figure 4.6 Influence de cycles de gel/dégel (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation = -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.3.2. *Matières en suspension et carbone organique dissous du lixiviat*

En ce qui concerne les teneurs en MES et en COD, les résultats expliquent cette fois-ci que le lixiviat contient plus de carbone organique dissous que de matières en suspension comme le montre la [Figure 4.7](#). Comparativement aux autres essais sans cycle de gel/dégel, les résultats du test de Student obtenus montrent que les moyennes de MES entre les essais ne sont pas significativement différentes (valeur $p = 0,496$), par contre, il existe une différence entre la moyenne des teneurs en COD pour les essais avec cycles de gel/dégel et les essais sans cycles répétés (valeur $p < 0,0001$).

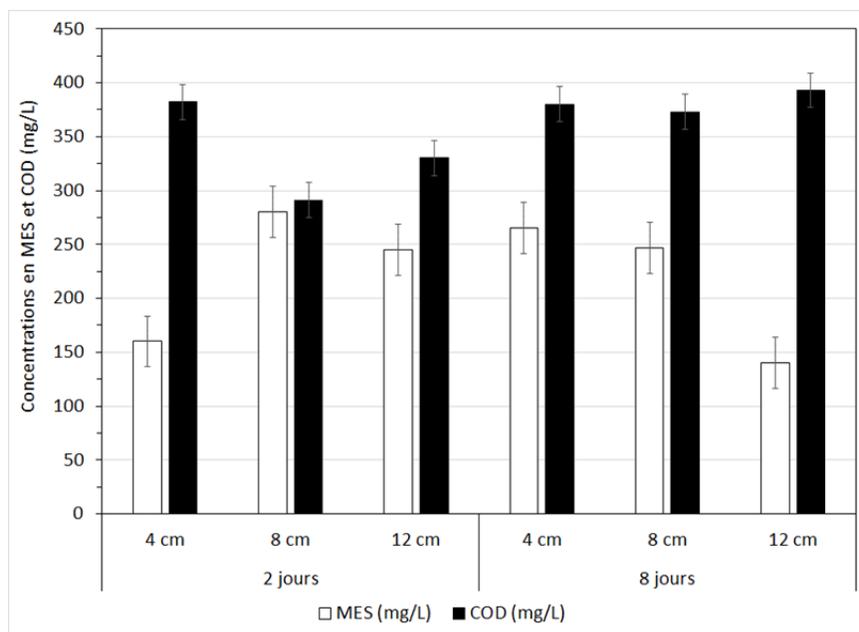


Figure 4.7 Effet de cycles de gel/dégel sur les teneurs en MES et COD mesurées dans les lixiviats (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation = -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.3.3. Métaux et éléments nutritifs dans les boues initiales, finales et le lixiviat

Les résultats présentés au [Tableau 4.6](#) et à la [Figure 4.8](#) montrent que les teneurs en Ca et en Na se retrouvent davantage dans le liquide obtenu après le drainage (lixiviat) que dans les boues finales. Il est prévu que le lixiviat issu de la décongélation des boues soit retourné en tête de la filière d'épuration des eaux usées pour être traité avant son rejet dans le milieu récepteur. Après le traitement par gel/dégel, le lixiviat retient plus de teneurs en calcium et sodium dans tous les essais.

D'après le test statistique d'égalité des moyennes, la valeur-p obtenue est inférieure à 0,0001, ce qui montre qu'il existe une différence significative entre les teneurs en métaux et éléments

des essais avec cycles de gel/dégel et des essais sans cycles répétés du [Tableau 4.5](#). L'ajout de cycles de gel/dégel permet d'augmenter les teneurs en Al, Mg, P et en S, et de diminuer les teneurs en Ca, Fe et en Na. Cette différence n'a pas un impact négativement potentiel sur la valorisation des boues en agriculture puisque les teneurs en ces métaux et éléments nutritifs se situent bien au deçà du critère toxicologique des sols agricoles établi par Environnement Québec (2004).

Tableau 4.6 Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et finales lors de l'application des cycles de gel/dégel

Type de boues	Al	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Na
Boues initiales								
Boues mixtes (70/30)	1,66 ± 0,06	2,40 ± 0,10	1,21 ± 0,04	0,25 ± 0,01	1,66 ± 0,03	1,34 ± 0,04	0,49 ± 0,01	0,65 ± 0,02
Boues finales								
1 (2 jours, 4 cm)	1,83 ± 0,04	1,71 ± 0,04	1,07 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,83 ± 0,03	1,48 ± 0,04	0,44 ± 0,01	0,04 ± 0,01
2 (2 jours, 8 cm)	1,81 ± 0,04	1,67 ± 0,02	1,06 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,81 ± 0,03	1,46 ± 0,03	0,43 ± 0,10	0,04 ± 0,01
3 (2 jours, 12 cm)	1,83 ± 0,04	1,72 ± 0,03	1,11 ± 0,02	0,11 ± 0,01	1,83 ± 0,01	1,50 ± 0,02	0,45 ± 0,01	0,04 ± 0,01
4 (8 jours, 4 cm)	1,77 ± 0,01	1,60 ± 0,10	1,07 ± 0,04	0,11 ± 0,01	1,77 ± 0,02	1,41 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,04 ± 0,01
5 (8 jours, 8 cm)	1,75 ± 0,05	1,70 ± 0,20	1,11 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,77 ± 0,01	1,45 ± 0,04	0,40 ± 0,10	0,04 ± 0,01
6 (8 jours, 12 cm)	1,77 ± 0,02	1,66 ± 0,01	1,02 ± 0,03	0,11 ± 0,01	1,75 ± 0,04	1,41 ± 0,03	0,40 ± 0,10	0,04 ± 0,01

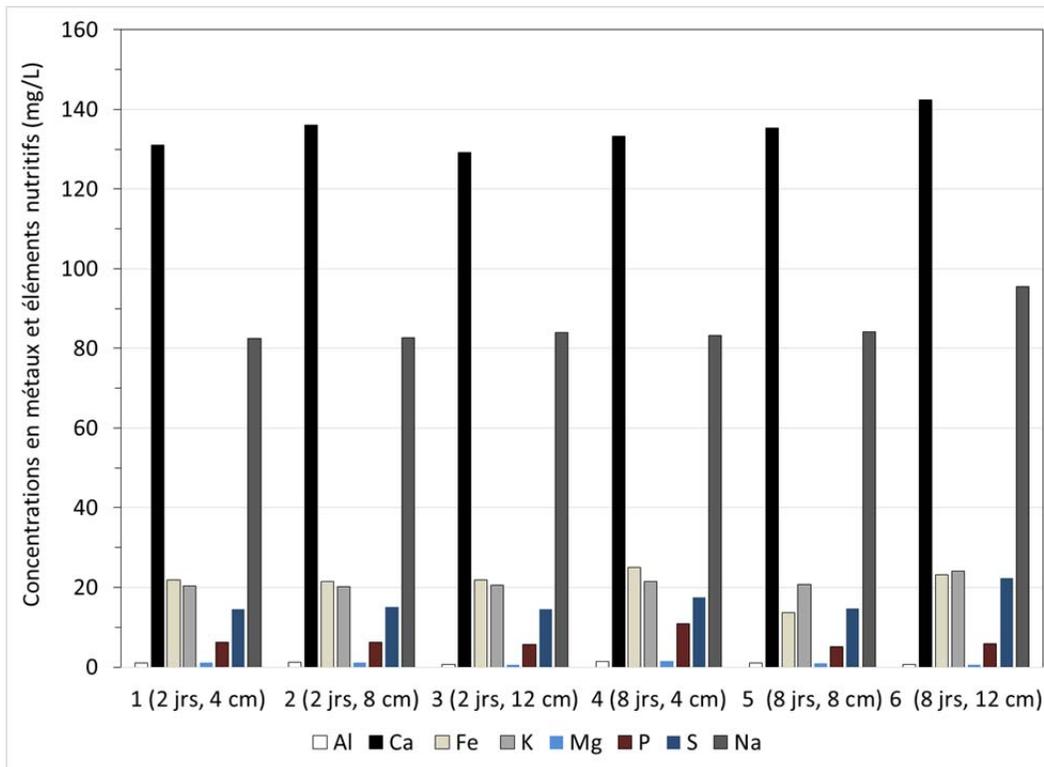


Figure 4.8 Influence de cycles de gel/dégel sur les éléments relargués en solution lors de la déshydratation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2 et 8 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 4, 8, 12 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

Les résultats du bilan total de gel/dégel et le bilan de masse de matière sèche pour l'influence de cycles de gel/dégel sont présentés en Annexes 5 et 6. Ces résultats possèdent un ratio sortie/entrée proche de 1, ce qui permet de conclure que les bilans massiques sont très bons.

4.2.4. Influence de la siccité initiale de boues

4.2.4.1. Solides totaux des boues initiales et des boues finales

La Figure 4.9 montre l'influence de la siccité initiale des boues sur la siccité finale des boues. De fait, plus la siccité initiale des boues augmente, plus la siccité finale devient importante. Après le traitement par gel/dégel, le mélange 2, qui possède une siccité initiale de 1,5%, a des teneurs élevées au niveau des solides totaux (entre 12,4% et 16%). Les résultats du test d'égalité des moyennes obtenus montrent que les valeurs de p calculées sont égales à 0, ce qui explique que la siccité initiale influence d'une manière significative sur le ST final. La technique par gel/dégel apparaît être très performante pour la déshydratation des BP et BS.

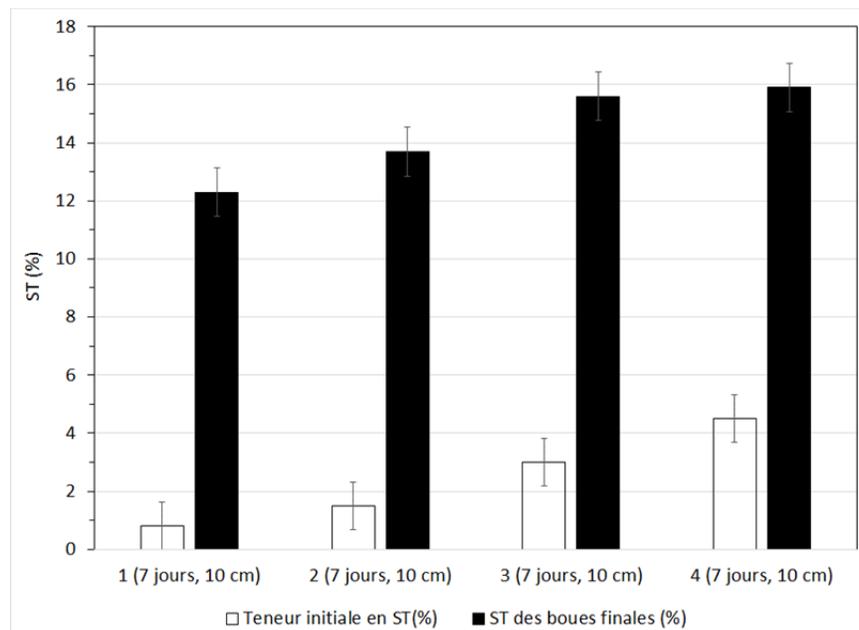


Figure 4.9 Influence de la siccité initiale de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1 : 0,8% – 2 : 1,5% – 3 : 3% – 4 : 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, température de congélation : -10°C , hauteur des boues = 10 cm, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.4.2. Matières en suspension et carbone organique dissous du lixiviat

La Figure 4.10 explique l'influence de la siccité initiale des boues sur les teneurs en MES et en COD présents dans les lixiviats de déshydratation. Le graphique suivant montre que le lixiviat obtenu après le traitement par gel/dégel contient plus de MES que de COD. De plus, plus les boues ont des teneurs initiales de ST élevées, plus les concentrations en MES et COD du lixiviat augmentent, ceci étant dû à la destruction des floccs durant le traitement par gel/dégel. Selon le test de Student, les résultats montrent que les moyennes entre les MES et le COD sont statistiquement significatives pour les différentes siccités initiales des boues (valeur $p = 0,012$).

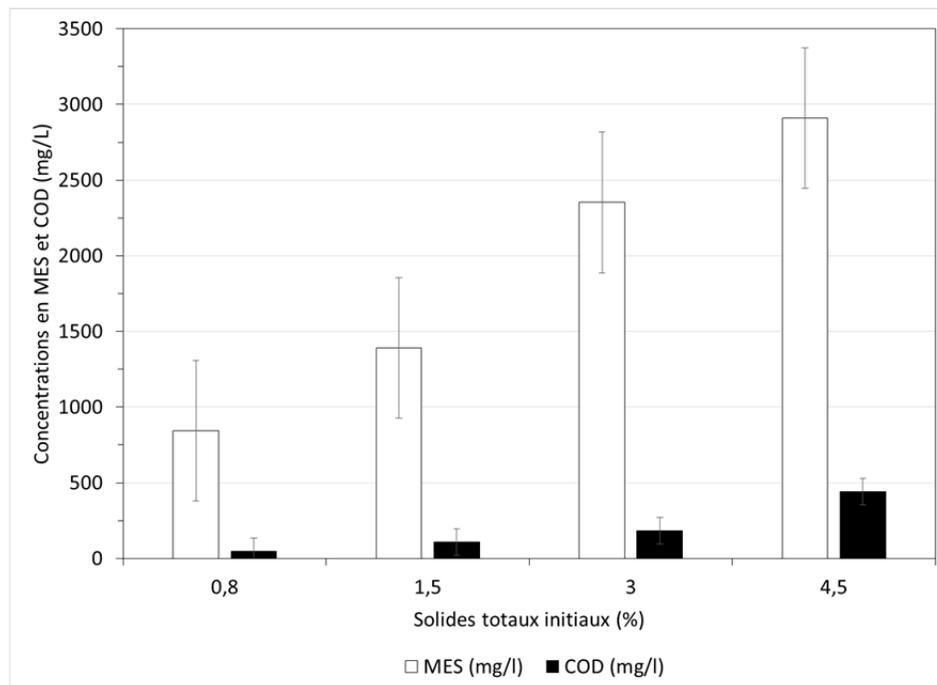


Figure 4.10 Influence de la siccité initiale des boues sur les teneurs en MES et COD présents dans les lixiviats de déshydratation (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 0,8 – 1,5 – 3 – 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, hauteur des boues = 10 cm, température de congélation = -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.4.3. Métaux et éléments nutritifs des boues initiales, finales et du lixiviat

Dans le [Tableau 4.7](#), les résultats du test de Student montrent que les moyennes des teneurs en Al, K, P et Na sont généralement significatives pour les boues initiales et les boues finales (valeur $p < 0,0001$), et les moyennes des teneurs en Ca, Fe et Mg ne diffèrent pas de manière significative pour les boues initiales et les boues finales (valeur $p > 0,001$).

Tableau 4.7 Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et les boues finales

Échantillons	Al	Ca	Fe	K	Mg	P	Na
Boues initiales							
BM 70/30 (0,8%)	0,5 ± 0,1	2,2 ± 0,4	0,9 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,7 ± 0,3
BM 70/30 (1,5%)	0,6 ± 0,1	2,4 ± 0,2	1,1 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,2	1,5 ± 0,1	1,6 ± 0,2
BM 70/30 (3%)	0,6 ± 0,1	2,3 ± 0,3	1,1 ± 0,2	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1
BM 70/30 (4,5%)	0,6 ± 0,1	1,9 ± 0,2	0,9 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,3 ± 0,1	0,3 ± 0,0
Boues finales							
BM 70/30 (0,8%)	0,8 ± 0,1	2,3 ± 0,2	1,2 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,2 ± 0,1	0,1 ± 0,0
BM 70/30 (1,5%)	0,8 ± 0,2	2,5 ± 0,6	1,2 ± 0,2	0,1 ± 0,1	0,3 ± 0,2	1,3 ± 0,3	0,1 ± 0,0
BM 70/30 (3%)	0,6 ± 0,1	1,9 ± 0,2	1,0 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1	0,1 ± 0,0
BM 70/30 (4,5%)	0,6 ± 0,2	2,1 ± 0,5	1,0 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,3 ± 0,1	1,3 ± 0,2	0,1 ± 0,0

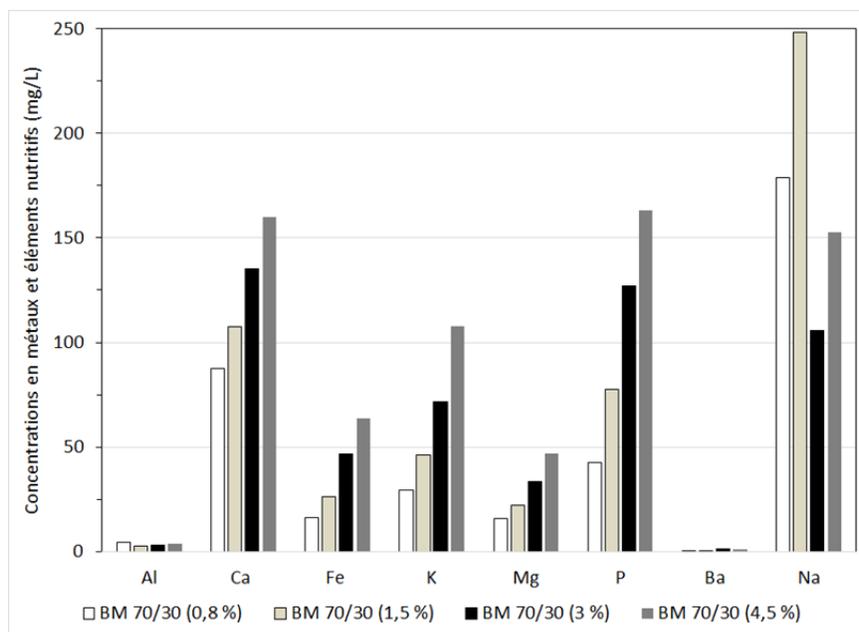


Figure 4.11 Influence de la siccité initiale des boues sur les teneurs en métaux et éléments nutritifs (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 0,8 – 1,5 – 3 – 4,5% (p/p), temps de congélation = 7 jours, hauteur des boues = 10 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.5. Influence de l'ajout successif de couches de boues

4.2.5.1. Solides totaux des boues initiales et des boues finales

Les résultats présentés au [Tableau 4.8](#) montrent qu'il n'y a pas d'influence sur le pourcentage de ST suite à un ajout successif de couches de boues par rapport aux autres essais étudiés précédemment sans ajouts ([Tableau 4.3](#)) dans les conditions opératoires testées. De fait, le mélange 2 ayant une siccité initiale de 1,5% et ayant subi des ajouts successifs de couches de boues conserve une valeur de ST finale (12,6%) semblable à celle mesurée pour les essais sans ajouts successifs (13,2%). Les résultats du test de Student permettent de valider qu'il n'y a pas de différence significative entre ces valeurs de ST (valeur $p = 0,346$).

En général, le traitement par congélation/décongélation a permis dans cette étude d'obtenir des boues qui respectent les normes d'enfouissement et d'épandage. D'après l'USEPA, la réglementation a imposé que les teneurs en ST qui sont supérieures à 3% et 10% sont requises pour l'épandage et pour l'enfouissement, respectivement.

Tableau 4.8 Teneurs en ST (%) mesurées dans les boues initiales et les boues finales en fonction de l'ajout successif de couches de boues

Échantillons	Teneur initiale en ST(%)	ST des boues finales (%)
Colonnes (1, 2, 3)	1,5	12,6 ± 1,2 (CV = 9,5%)

4.2.5.2. *Matières en suspension et carbone organique dissous du lixiviat*

La [Figure 4.12](#) montre que l'ajout successif de couches de boues n'a pas d'effet sur les teneurs en MES présents dans les lixiviats de déshydratation par rapport aux essais sans ajouts successifs présentés dans la [Figure 4.1](#). De fait, le test d'égalité des moyennes de Student montre qu'il existe une différence significative des teneurs de COD (valeur $p = 0,0001$) mais pas de celles de MES (valeur $p > 0,0001$) entre cet essai et les essais sans ajout successif de couches de boues présentés dans la [Figure 4.1](#).

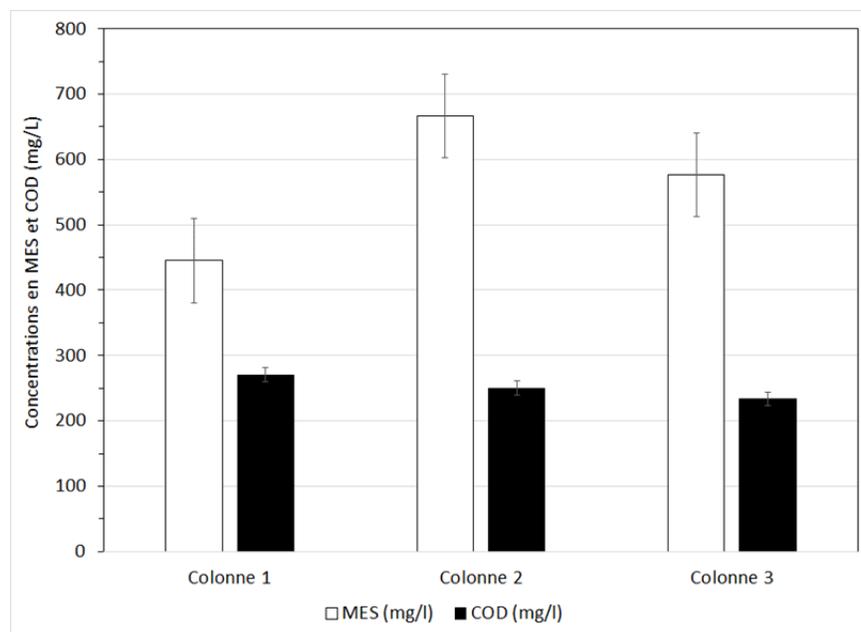


Figure 4.12 Influence de l'ajout successif des couches de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 4, 6 jours, hauteur des boues = 10, 20, 30, 40 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

4.2.5.3. Coliformes fécaux des boues initiales, finales et du lixiviat

Dans ce cas, il a été choisi de mesurer les coliformes fécaux (CF) présents dans les boues initiales, les boues finales et le lixiviat de déshydratation afin de pouvoir vérifier si la congélation des différentes couches de boues a une influence sur ce paramètre ou pas.

Les résultats exposés au [Tableau 4.9](#) montrent que les teneurs en CF, plus précisément la bactérie *E. coli*, passent de 2 500 000 UFC/g sec pour les boues initiales à une moyenne de 26 000 UFC/g sec pour les boues finales et environ 140 000 UFC/g sec pour le lixiviat, ce qui explique qu'après le procédé par gel/dégel, les CF se concentrent significativement davantage dans le lixiviat que dans les boues finales. Le traitement par gel/dégel permet d'obtenir un enlèvement de 96% des coliformes fécaux. Au Québec, Environnement Québec (2004) définit deux critères microbiologiques (P1 et P2) qui s'appliquent aux *Escherichia coli* et non pas aux

coliformes fécaux (Environnement Québec, 2004). Dans ce cas, la teneur en CF obtenue après le traitement correspond au critère P2, ce qui autorise la valorisation des boues à des fins agricoles. La concentration de *E. coli* est exprimée en unités formatrices de colonie (UFC) par gramme en base sèche.

D'une manière générale, les coliformes fécaux sont utilisés pour évaluer la qualité microbiologique de l'échantillon lors de la récréation avec contact complet et intermédiaire, et la collecte de filtres pour un usage alimentaire. Leur présence peut ne pas être directement nocive, et ne signifie pas nécessairement la présence de matières fécales. En outre, les niveaux élevés de coliformes fécaux signalent une défaillance du traitement, une rupture de l'intégrité du système de distribution, une contamination éventuelle par des agents pathogènes. Lorsque les niveaux sont élevés, le risque de gastro-entérite d'origine hydrique peut être élevé.

Tableau 4.9 Teneurs en CF (UFC/g sec) présents dans les boues mixtes (70/30) initiales, les boues finales ainsi que les lixiviats de déshydratation

Paramètres	Unité	Boues initiales	Boues finales			Lixiviat		
		BM 70/30	Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3
<i>E. coli</i> (sol)	UFC/g sec	2 500 000	25 000	29 000	24 000	150 000	110 000	160 000
Matières sèches	%	1,2	1,3	1,4	1,6	0,5	0,4	0,3
T° à la réception	°C	7	7	7	7	7	7	7

NA : non applicable.

4.2.5.4. Métaux et éléments nutritifs des boues initiales, finales et du lixiviat

Le [Tableau 4.10](#) présente les teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et les boues finales obtenues après le traitement par gel/dégel. Les résultats obtenus du test de Student affirment que les moyennes des teneurs en métaux et en éléments nutritifs sont statistiquement significatives pour cet essai et les essais sans ajouts de couches de boues présentés dans le [Tableau 4.4](#). La valeur p calculée est inférieure à 0,0001 pour toutes les teneurs en métaux et en éléments nutritifs. Le lixiviat obtenu après le drainage a une teneur très élevée en Na pour les trois colonnes comparativement aux autres métaux et éléments nutritifs comme le montre la [Figure 4.13](#).

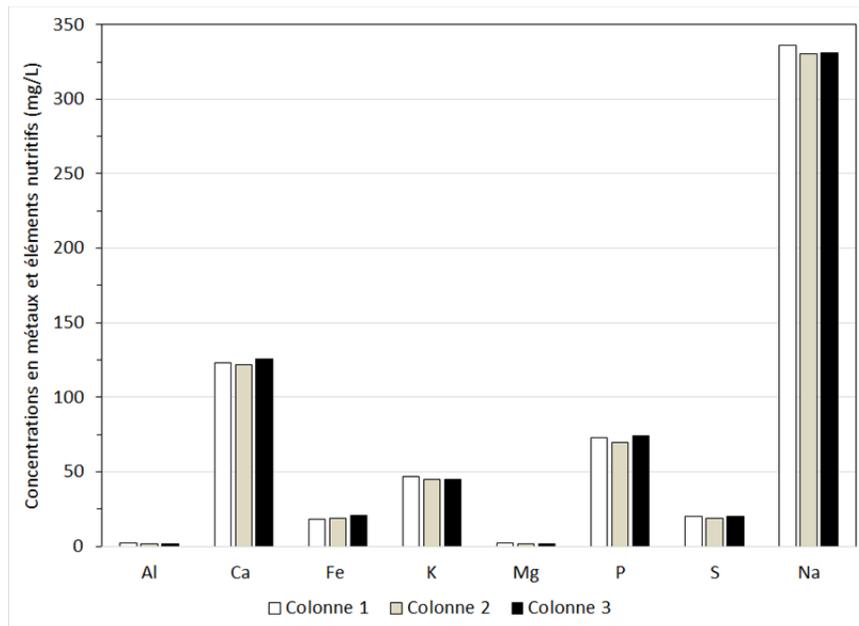


Figure 4.13 Influence de l'ajout successif des couches de boues (Boues mixtes : 70/30, siccité initiale = 1,5% (p/p), temps de congélation = 2, 4, 6 jours, hauteur des boues = 40 cm, température de congélation : -10°C, temps de décongélation = 24 h, température de décongélation = 24°C)

Tableau 4.10 Teneurs en métaux et en éléments nutritifs (%) présents dans les boues initiales et les boues finales

Type de boues	Al	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Na
Boues initiales								
Boues mixtes (70/30)	1,66 ± 0,06	2,43 ± 0,04	1,2 ± 0,1	0,24 ± 0,04	1,66 ± 0,02	1,3 ± 0,1	0,49 ± 0,01	0,65 ± 0,02
Boues finales								
Colonne 1	0,77 ± 0,02	2,22 ± 0,04	1,1 ± 0,1	0,11 ± 0,01	0,77 ± 0,02	1,3 ± 0,1	0,59 ± 0,02	0,09 ± 0,01
Colonne 2	0,81 ± 0,07	2,30 ± 0,10	1,2 ± 0,1	0,12 ± 0,01	0,81 ± 0,04	1,3 ± 0,1	0,61 ± 0,04	0,08 ± 0,01
Colonne 3	0,79 ± 0,01	2,31 ± 0,05	1,2 ± 0,1	0,12 ± 0,01	0,79 ± 0,02	1,3 ± 0,1	0,61 ± 0,01	0,08 ± 0,01

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude avait comme principal objectif de tester et d'optimiser les conditions opératoires d'un procédé de déshydratation des boues d'épuration adapté pour les régions nordiques du Canada et, plus spécifiquement, pour les boues d'épuration du village de Salluit dans le Nord du Québec. La technique proposée consiste en un traitement par gel/dégel des boues. De fait, le procédé permet de déshydrater les boues en utilisant les conditions hivernales naturelles de gel dans les collectivités du Nord. Pour évaluer la performance de cette méthode, plusieurs paramètres ont été pris en considération à savoir la siccité finale des boues et la teneur en matières en suspension, en carbone organique dissous, en coliformes fécaux, en métaux et en éléments nutritifs.

Des expériences de traitement par congélation/décongélation ont montré que la congélation permet de réduire fortement la teneur en eau dans les boues lors de la période de dégel. En outre, la méthode a été efficace pour agglomérer de petites particules et améliorer la déshydratation des boues. La concentration en boues solides a été augmentée d'environ neuf fois et la forme compactée du gâteau de boue restant après déshydratation est facilement manipulable. Les avantages de la réduction du volume de boues comprennent la réduction des coûts de transport et d'élimination et la consommation d'énergie.

L'impact de différents paramètres opératoires sur le procédé de déshydratation a également été étudié. Les résultats ont montré que l'application de l'ajout successif de couches de boues et les cycles de gel/dégel semblent être favorables sur les performances de déshydratation par le traitement gel/dégel. Les cycles répétés de gel/dégel favorisent une augmentation en termes de ST par rapport aux autres essais avec un seul cycle de gel/dégel. Ces cycles répétés permettent d'augmenter les teneurs en Al, Mg, P et S dans les boues finales par rapport aux autres essais sans répétition de cycle. De plus, l'ajout de couches successives semble avoir une augmentation uniquement sur la teneur en métaux et en éléments nutritifs par rapport aux autres essais sans ajouts successifs de couches de boues. Le type de boues (primaire, secondaire et mixte) influence également les ST et les teneurs en Ca, K, Mg et en Na par rapport

aux boues initiales. En ce qui concerne l'influence de la siccité initiale de boues, plus cette dernière est élevée, plus la siccité finale atteinte est augmentée.

De plus, les tests d'égalité des moyennes réalisés sur toutes les conditions opératoires testées (indice de confiance de 95%) indiquent que le type de boues, les cycles de gel/dégel et la siccité initiale ont une influence significativement positive sur les ST finaux présents dans les boues finales déshydratées. Concernant les teneurs en MES, le test ne montre aucune différence significative sur la hauteur de boues, le temps de gel, les cycles de gel/dégel et l'ajout successif de couches de boues. Par contre, les teneurs en COD présents dans les lixiviats diffèrent d'une manière significative sur presque toutes les conditions, sauf sur la hauteur des boues et le temps de gel.

Il faut aussi souligner que les boues ainsi traitées par gel/dégel respectent les critères de qualité du Gouvernement du Québec (Environnement Québec, 2004) en termes de métaux (critères C) et d'indicateurs de pathogènes (critères P) pour l'épandage de matières résiduelles fertilisantes.

En termes de perspectives de recherche, il serait souhaitable de tester cette technique de déshydratation des boues à l'échelle pilote avec des boues provenant directement de communautés du Nord, ceci afin de valider les résultats de cette étude. Il sera ensuite possible d'évaluer la performance de ce procédé directement dans une station d'épuration d'eaux usées d'une communauté nordique, comme Salluit, ou une autre communauté comparable dans le Nord du Canada.

6. RÉFÉRENCES

- AADNC (2010) Affaires autochtones et développement du Nord Canada. Disponible à l'adresse suivante: <https://www.canada.ca/fr/relations-couronne-autochtones-affaires-nord.html>, Consulté en Mars 2018.
- Administration régionale Kativik et Société Makivik (1999) *Nunavik : utilisation et protection de la ressource en eau*. Commission sur la gestion de l'eau au Québec, Montréal, QC, Canada, 23 p.
- Amorce (Édit) (2012) *Boues de station d'épuration : Techniques de traitement, valorisation et élimination*. DT 51, Paris, France, 36 p.
- AMSA (1987) *Sludge analysis survey of 59 member agencies*. Association of Municipal Sewerage Agencies, Washington, DC, États-Unis.
- APHA, AWWA et WPCF (1999) *Standards methods for examination of water and wastewaters*. 20^{ième} Édition. American Public Health Association, American Water Works Association et Water Pollution Control Federation, Washington, DC, États-Unis.
- Bellamy KL, Chong C et Cline RA (1995) Paper sludge utilization in agriculture and container nursery culture. *Journal of Environmental Quality* 24, 1074-1082.
- 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)*. Mémoire de maîtrise, Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 119 p.
- Benmoussa H, Blais JF, Meunier N, Tyagi RD et Sasseville JL (1997) Conditionnement et déshydratation de boues d'épuration municipales décontaminées par un procédé d'enlèvement des métaux toxiques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(5), 716.
- Blais JF (2016) *Assainissement des eaux usées*. Notes de cours, Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 726 p.

- Blais JF et Sasseville JL (1996) *État de l'art du traitement et de la disposition ou valorisation des boues d'usines d'épuration municipales*. Projet mandaté par Hydro-Québec, rapport scientifique No. 429, INRS-Eau, Institut national de la recherche scientifique, Université du Québec, Québec, QC, Canada, 150 p.
- Canler JP et Perret JM (2013) *Réduction des boues par voie biologique par le procédé MycET*. Unité de recherche Milieux Aquatique, Écologie et Pollution, Document technique n°39, Lyon, France, 51 p.
- Charbonneau H, Hébert M et Jaouich A (2001) Portrait de la valorisation agricole des matières résiduelles fertilisantes au Québec – partie 2: Contenu en éléments fertilisants et qualité environnementale. *Vecteur Environnement* 34(1), 56-60.
- Cheremisinoff PN (1992) Filter presses for industrial effluent and sludge dewatering. *Nature and Environmental Journal* 2(4), 48.
- Chouinard A, Yates C, Balch G, Jørgensen S, Wootton B et Anderson B (2014) Management of tundra wastewater treatment wetlands within a lagoon/wetland hybridized treatment system using the SubWet 2.0 wetland model. *Water* 6(3), 439-454.
- Dawson RN et Grainge JW (1969) Proposed design criteria for wastewater lagoons in arctic and sub-arctic regions. *Water Pollution Control Federation* 41(2), 237-246.
- Degrémont (1989) *Mémento technique de l'eau*. 2 tomes, Degrémont, Paris, France.
- Deviny JS, Deshusses MA et Webster TS (1999) *Biofiltration for air pollution control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, États-Unis.
- Doku IA et Heinke GW (1995) Potential for greater use of wetlands for waste treatment in northern Canada. *Journal of Cold Regions Engineering* 9(2), 75-88.
- Duvaud E, Mugnier E, Gazzo A, Aubain P et Wiart J (1999) *Situation du recyclage des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde*. ADEME Editions, Paris, France, 134 p.
- Environnement Québec (2004) *Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. Critères de référence et normes réglementaires*. Environnement Québec, Direction du

- milieu rural, Québec, QC, Canada, 127 p.
- Farrell J, Smith Jr J, Dean R, Grossman III E et Grant O (1970) Natural freezing for dewatering of aluminum hydroxide sludges. *American Water Works Association* 62(12), 787-791.
- Halcrow Gilbert Associates Ltd (1993) *Preliminary review of the energy considerations in dewatering and drying sewage sludge to produce a fuel*. Renewable Energy Research and Development Programme, Energy Technology Support Unit, Department of Trade and Industry, ETSU B/MS/00192/30/REP, Royaume-Uni, 34 p.
- Hayward J et Jamieson R (2015) Derivation of treatment rate constants for an arctic tundra wetland receiving primary treated municipal wastewater. *Ecological Engineering* 82, 165-174.
- Hayward J, Jamieson R, Boutilier L, Goulden T et Lam B (2014) Treatment performance assessment and hydrological characterization of an arctic tundra wetland receiving primary treated municipal wastewater. *Ecological Engineering* 73, 786-797.
- Hedström A et Hanaeus J (1999) Natural freezing, drying, and composting for treatment of septic sludge. *Journal of Cold Regions Engineering* 13(4), 167-179.
- Hong Y et Weiran S (1995) Using reed beds for winter operation of wetland treatment system for wastewater. *Water Science and Technology* 32(3), 111-107.
- Hu K, Jiang JQ, Zhao QL, Lee DJ, Wang K et Qiu W (2011) Conditioning of wastewater sludge using freezing and thawing: role of curing. *Water Research* 45(18), 5969-5976.
- Johnson K et Wilson A (1999) Sewage treatment systems in communities and camps of the Northwest Territories and Nunavut. Dans: *Cold Regions Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Edmonton, Alberta, Canada.
- Kadlec RH et Wallace S (2008) *Treatment wetlands*. CRC press, Boca Raton, Floride, États-Unis.
- Langstaff D (2011) *Reducing the gaps in the northern water infrastructure*. Northern Territories Water and Waste Association, Septembre, 51 p.
- Lévesque AM (2009) *Salluit: analyse et reconstitution d'évènements climatiques significatifs*

pertinents à l'aménagement du territoire et à la sécurité publique. Université Laval, Québec, QC, Canada.

Lingyun Jin, Guangming Zhang, Xiang Zheng (2015) Effects of different sludge disintegration methods on sludge moisture distribution and dewatering performance. *Environmental Sciences* 28(1), 22-28.

Martel CJ (1991) Freezing out sludge. *Civil Engineering* novembre, 64-65.

Martel CJ (1993) Fundamentals of sludge dewatering in freezing beds. *Water Science and Technology* 28(1), 29-35.

McAnally S, Benefield L et Reed RB (1984) Nickel removal from a synthetic nickel-plating waste water using sulphide and carbonate for precipitation and coprecipitation. *Separation Science and Technology* 19, 191-217.

McFadden F, Benefield L et Reed RB (1985) Nickel removal from nickel plating wastewater using iron, carbonate, and polymers for precipitation and coprecipitation. Dans: *40rd Proceeding of Industrial Waste Conference*, Purdue University, Lewis Publishers Inc., Boca Raton, FL, États-Unis, pp. 417-429.

MENV. (2001) *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique.* Ministère de l'Environnement, Québec, QC, Canada.

Metcalf et Eddy Inc. (1992) *Opportunities for energy conservation and load shaping in sludge management systems.* Electric Power Research Institute, EPRI TR-101026, Project 2662-10, Palo Alto, CA, États-Unis.

OTV (1997) *Traiter et valoriser les boues.* Lavoisier TEC et DOC, Cachan, France, 457 p.

Pottle DS, Moeller WB, Ott CR, Peirent R et Niedringhaus EL (1985) *Prevention of freezing and other cold weather problems at wastewater treatment facilities.* United States Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, États-Unis, 49 p.

Sabri M (2017) *Freeze/thaw treatment for sludge dewatering, nutrient recovery and biogas production in Northern Canadian Communities.* Faculty of Agricultural and Food Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

- Schowaneck D, Carr R, David H, Douben P, Hall J, Kirchmann H, Patria L, Sequi P, Smith S, Webb S (2004) A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture – conceptual framework. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 40, 227-251.
- Smith D (1996) *Cold regions utilities monograph*. Disponible à l'adresse suivante: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784401927>, Consulté en Juillet 2017.
- Sommers LE, Nelson DW et Yost KJ (1976) Variable nature of chemical composition of sewage sludges. *Journal of Environmental Quality* 5(3), 303-306.
- Spinosa L et Vesilind PA (2001) *Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization*. IWA Publishing, Alliance House, Londres, Angleterre, 394 p.
- St-Yves A et Beaulieu R (1988) *Caractérisation des boues de 34 stations d'épuration des EUM*. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction générale de l'assainissement des eaux, Direction de l'assainissement agricole, Québec, QC, Canada, 11 p.
- Tao LT, Romberg J Candès E (2006) *Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information*. IEEE Transactions on information theory, pp. 489-509.
- USEPA (1983) *Process design manual: land application of municipal sludge*. United States Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, États-Unis, 301 p.
- USEPA (2000) *Chemical precipitation*. EPA/832/F-00/018, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, États-Unis.
- Vesilind PA et Martel CJ (1990) Freezing of water and wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering Division ASCE* 116(5), 854-862.
- Vesilind PA, Wallinmaa S et Martel CJ (1991) Freeze-thaw sludge conditioning and double layer compression. *Canadian Journal of Civil Engineering* 18, 1078-1083.
- Wang S et Shi X. (2001) Molecular mechanisms of metal toxicity and carcinogenesis. *Molecular Cell. Biochemistry* 222, 3-9.

- Warren JA, Berner JE et Curtis T (2005) Climate change and human health: infrastructure impacts to small remote communities in the north. *International Journal of Circumpolar Health* 64(5), 487- 497.
- Water Pollution Control Federation (WPCF) et Association Québécoise des Techniques de l'Eau (AQTE) (1985) *Exploitation des stations d'épuration des eaux usées*. Environnement Canada, Ottawa, ON, Canada.
- Wootton B, Durkalec A et Ashley S (2008) *Draft Canada-wide strategy for the management of municipal wastewater effluent: Nunavut regional impact analysis*. Inuit Tapiriit Kanatami. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Yates CN (2012) *Developing an understanding for wastewater treatment in remote communities in Nunavut, Canada*. Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 158 p.
- Yates CN, Wootton B, Jorgensen SE, Santiago V et Murphy SD (2010) Natural wetlands for treating municipal wastewater in the Canadian Arctic: A case study of the Chesterfield Inlet, Nunavut wetland. 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Venise, Italie.
- Zibilske LM (1987) Dynamics of nitrogen and carbon in soil during papermill sludge decomposition. *Soil Science* 143, 26-33.

ANNEXES

Annexe 1 Bilan total de gel/dégel pour l'influence du type de boues

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (ST = 0,8%)	570,2	555,1	0,84
2 (ST = 0,8%)	573,7	563,4	0,85
3 (ST = 0,8%)	572,5	548,7	0,83
4 (ST = 1,5%)	571,4	546,3	0,83
5 (ST = 1,5%)	569,9	561,9	0,85
6 (ST = 1,5%)	571,2	666,1	1,01
7 (ST = 3%)	574,4	563,1	0,85
8 (ST = 3%)	574,1	565,6	0,85
9 (ST = 3%)	577,4	561,8	0,84
10 (ST = 4,5%)	574,2	458,1	0,69
11 (ST = 4,5%)	574,9	557,9	0,84
12 (ST = 4,5%)	574,7	543,5	0,82

Annexe 2 Bilan de masse de matière sèche pour l'influence du type de boues

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (ST = 0,8%)	4,562	3,832	0,84
2 (ST = 0,8%)	4,590	3,763	0,82
3 (ST = 0,8%)	4,580	3,668	0,80
4 (ST = 1,5%)	8,000	6,105	0,76
5 (ST = 1,5%)	7,979	7,747	0,97
6 (ST = 1,5%)	7,997	6,778	0,85
7 (ST = 3%)	17,23	15,94	0,93
8 (ST = 3%)	17,22	16,52	0,96
9 (ST = 3%)	17,32	15,68	0,91
10 (ST = 4,5%)	25,84	23,66	0,92
11 (ST = 4,5%)	25,87	25,39	0,98
12 (ST = 4,5%)	25,86	25,84	1,00

Annexe 3 Bilan total de gel/dégel pour l'influence de la hauteur et du temps de congélation

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (2 jrs, 4 cm)	3,46	2,73	0,79
2 (2 jrs, 8 cm)	7,03	5,69	0,80
3 (2 jrs, 12 cm)	10,9	9,44	0,86
4 (8 jrs, 4 cm)	3,32	2,39	0,72
5 (8 jrs, 8 cm)	7,08	6,48	0,91
6 (8 jrs, 12 cm)	10,9	9,06	0,83
7 (14 jrs, 4 cm)	3,37	3,23	0,96
8 (14 jrs, 8 cm)	7,01	5,99	0,86
9 (14 jrs, 12 cm)	10,9	10,1	0,92

Annexe 4 Bilan de masse de matière sèche pour l'influence de la hauteur et du temps de gel

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (2 jrs, 4 cm)	230,8	171,1	0,74
2 (2 jrs, 8 cm)	468,6	380,9	0,81
3 (2 jrs, 12 cm)	730,5	673,2	0,92
4 (8 jrs, 4 cm)	221,2	180,9	0,82
5 (8 jrs, 8 cm)	472,3	403,0	0,85
6 (8 jrs, 12 cm)	730,2	671,9	0,92
7 (14 jrs, 4 cm)	224,8	182,3	0,81
8 (14 jrs, 8 cm)	466,8	363,1	0,78
9 (14 jrs, 12 cm)	728,6	677,3	0,93

Annexe 5 Bilan total de gel/dégel pour l'influence de cycles de gel/dégel

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (2 jrs, 4 cm)	8,8	8,1	0,91
2 (2 jrs, 8 cm)	8,8	7,6	0,86
3 (2 jrs, 12 cm)	8,9	8,7	0,98
4 (8 jrs, 4 cm)	8,9	7,9	0,89
5 (8 jrs, 8 cm)	8,8	8,1	0,91
6 (8 jrs, 12 cm)	8,7	7,5	0,86

Annexe 6 Bilan de masse de matières solides pour l'influence de cycles de gel/dégel

Échantillon	Entrée (g)	Sortie (g)	Sortie/Entrée
1 (2 jrs, 4 cm)	589,2	574,2	0,97
2 (2 jrs, 8 cm)	587,9	560,9	0,95
3 (2 jrs, 12 cm)	593,9	566,2	0,95
4 (8 jrs, 4 cm)	596,1	575,8	0,96
5 (8 jrs, 8 cm)	589,8	536,0	0,91
6 (8 jrs, 12 cm)	583,9	444,8	0,76