



Rapport sur l'atténuation des impacts de la neige usée

21045 – Mars 2024



696, avenue Sainte-Croix – Montréal (Québec) H4L 3Y2
Laboratoire : 5515, rue Paré, local 200 – Montréal (Québec) H4P 1P7
Tél. 514-747-2782 – www.cteau.com

Rapport sur l'atténuation d'impact des neiges usées

Équipe de travail du Cteau

Préparé et rédigé par :

Chercheurs responsables : **François-René Bourgeois**, Ph.D, Cteau
Isabelle Noël, Ph.D, Cégep Saint-Laurent

Professionnelle de recherche : **Rachida Hamidou**, M.Sc, Cteau

Révisé par :

Édith Laflamme, ing.

Directrice générale, Cteau

Équipe de travail du **Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs**

Présenté à :

Nicolas Tremblay, ing.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatique, de la Faune et des Parcs

2024-03-21

Partenaires financiers

Québec 

CÉGEP DE
Saint-Laurent

Table des matières	
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des sigles	iv
Introduction	1
Partie 1 : CARACTERISATION DES EAUX DE FONTE	2
1. Matériels et méthodes	2
2. Méthodes d'échantillonnage.....	3
3. Analyses faites sur les échantillons.....	6
4. Résultats et discussion.....	7
Partie 2 : ÉVALUATION DES VOIES POSSIBLE DE DESSALEMENT PASSIF DES EAUX DE FONTE DE LIEUX D'ÉLIMINATION DES NEIGES	12
Étape 1 : Exploration des traitement passifs potentiels.....	12
1. Méthodologie expérimentale	13
2. Résultats	16
3. Conclusions.....	19
Étape 2 : Première série d'essais de capillarité	20
1. Méthodologie expérimentale	21
2. Résultats	23
3. Conclusion.....	26
Étape 3 : Deuxième série d'essais de capillarité.....	26
1. Méthodologie expérimentale	27
2. Résultats	28
3. Conclusions.....	32
Références bibliographiques	34

Liste des figures

Figure 1: Monticule de neige avant la fonte	4
Figure 2: Monticule de neige au début de la fonte	4
Figure 3: Emplacement des points d'échantillonnage	5
Figure 4: Emplacement du point d'échantillonnage 3	5
Figure 5: Dynamique de fonte observée à l'exutoire	11
Figure 6: Dynamique de fonte observé au point 7 situé en amont du point 6 et donc en mont de l'exutoire	11
Figure 7: Températures et précipitations observés lors de la dynamique de fonte	11
Figure 8: Support utilisés lors des essais d'évaporation par capillarité	16
Figure 9: Prototype de dessalement passif « champignon » - Représentation schématique (gauche) et photo du montage(droite)	21
Figure 10: Prototype de dessalement passif « champignon » - Taux d'évaporation témoin (vert), en présence de vent (bleu) et à température élevée (orange)	23
Figure 11: Prototype de dessalement passif « champignon » - Accumulation de sels en bordure des filtres.	24
Figure 12: Prototype de dessalement passif Hamzalex - Taux d'évaporation en comparaison avec le témoin (bêcher à surface libre).....	25
Figure 13: Prototype de dessalement passif Hamzalex - Représentation du tube poreux en charbon avec le filtre de bambou noir.....	25
Figure 14: Prototype de dessalement passif - Schéma conceptuel de la configuration voile (gauche) et de la configuration « champignon » (droite).....	26
Figure 15: Prototype de dessalement passif à voile – Présentation de la configuration	27
Figure 16: Prototype de dessalement passif « champignon » - Configuration « champignon » avec chapeau en tissu de coton et avec une corde en coton naturel... ..	28
Figure 17: Configuration de dessalement passif à voile - Essais de cristallisation sur le voile en coton du pilote.....	29
Figure 18: Configuration de dessalement passif à voile - Taux d'évaporation global et corrigé sur 20 jours.....	30
Figure 19: Amélioration de la configuration de dessalement passif « champignon » - Sommet du champignon avec les fils bleus apparaissant en transparence (Gauche), cordes bleues et corde torsadée (centre) et Configuration champignon avec toile de coton unique pour chapeau et corde(droite).....	31

Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres de suivi des eaux de fonte et les risques environnementaux associés	2
Tableau 2: Concentrations en chlorures (mg/L) mesurées lors de la campagne d'échantillonnage.	8
Tableau 3: Concentrations en MES (mg/L) mesurées lors de la campagne d'échantillonnage.	9
Tableau 4: Turbidité (UTN) mesurée lors de la campagne d'échantillonnage.....	10
Tableau 5: Concentrations choisies pour faire les tests en sel et en chlorure de calcium et concentration équivalente en ions Na ⁺ , Ca ²⁺ et Cl ⁻	14
Tableau 6: Paramètres de suivi et méthode d'analyse.....	14
Tableau 7: Conditions expérimentales pour les essais d'échange ou d'adsorption. Vitesse d'agitation 150 RPM.....	15
Tableau 8: Résumé des meilleurs taux d'enlèvements obtenus avec les essais de filtration par adsorption et échange d'ions pour la zéolite conditionnée, non conditionnée et la résine échangeuse d'ions.....	17
Tableau 9: Résultats des deux essais de Gel / Dégel dans congélateur en termes de fraction volumique d'eau dessalée et de fraction massique d'enlèvement des chlorures, des calciums et des sodiums.....	18
Tableau 10: Taux d'évaporation net (mL/jour) et ramené à la surface déployée en (Litre/Jour et par m ²)	19
Tableau 11: Aires d'évaporation en des différentes configurations.....	22
Tableau 12: Sommaire des masse de sel collectée durant les essais.....	31

Liste des sigles

Ag⁺ : ion argent

AgCl : chlorure d'argent

AgNO₃ : nitrates d'argent

APHA : American Public Health Association

AWWA : American Water World Association

Ca²⁺ : ion calcium

CaCl₂ : chlorure de potassium

CCNB-INNOV : Collège communautaire du Nouveau-Brunswick – Réseau de recherche appliquée et d'innovation

CEAEQ : Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec

Cl⁻ : ion chlorure

Cteau : Centre des technologies de l'eau.

LEN : Lieu d'élimination des neiges

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs.

meq/L : milliéquivalent par litre

mg/L : milligramme par litre

MES : Matières en suspension

Na⁺ : ion sodium

NaCl : chlorure de calcium

WEF : Water Environment Federation

Introduction

Reconnu par le gouvernement du Québec, le Cteau se consacre à la recherche appliquée et au développement de pilotes et de mise à l'échelle, d'aide technique, de validation et certification technologique et de diffusion de l'information dans le domaine des technologies de l'eau. Nous accompagnons les entreprises privées, les organismes publics et parapublics afin de les aider dans leur développement tout en enrichissant et en soutenant les activités d'enseignement du niveau collégial. Dans un objectif d'accompagnement, le Cteau, à travers ce projet, répond à un besoin du MELCCFP à faire le point sur l'état des connaissances lié à la problématique de gestion des lieux d'élimination des neiges (LEN) et des eaux de fontes pour la protection de la ressource. Ce projet est en réponse directe au constat de M. Paul Lanoie, commissaire au développement durable quant au manque de connaissances actuelles dont dispose le MELCCFP pour la gestion adéquate des lieux d'élimination des neiges usées.

L'utilisation d'agents de déglçage, tels que les sels de voiries, pour déglçer les routes, les voies piétonnières et les espaces de stationnement s'est généralisée. Cependant, les chlorures libérés en grande quantité endommagent la flore, la faune, la qualité de l'eau et des sols, ainsi que les infrastructures urbaines. L'utilisation excessive de sable entraîne quant à elle des problèmes de sédimentation dans les infrastructures pluviales ainsi que dans le milieu récepteur. Sans compter la pollution occasionnée par le transport des neiges usées, leur accumulation dans un LEN occasionne plusieurs problématiques environnementales. Ainsi, la neige accumulée sur un LEN peut contenir du sable, du gravier, des sels de voirie ou d'autres agents chimiques de déglçage, tels que des alcools; de l'huile, de la graisse et des métaux lourds provenant notamment des véhicules; des ordures et des débris; et de la poussière, de la saleté et des polluants atmosphériques. La neige ainsi stockée à ces endroits contient des contaminants qui sont déposés sur le sol ou transportés avec l'eau de fonte vers les eaux de surface et souterraines, occasionnant ainsi une pollution ponctuelle importante. L'effet de cette pollution varie tout au long de la période de fonte ainsi que les impacts environnementaux associés (Ciot et al., 2021).

Partie 1 : CARACTERISATION DES EAUX DE FONTE

Le premier objectif du projet est d'obtenir un profil général de la nature des principaux contaminants présents dans les eaux de fonte, en lien avec les différentes origines des neiges usées et les étapes observées lors de la période de fonte (Tableau 1). Pour mettre en lumière l'impact méconnu que peut représenter les eaux de fonte sur les cours d'eau, les données recueillies conjointement avec nos partenaires du Nouveau-Brunswick (CCNB-INNOV) sont utilisées afin d'établir un portrait de la dynamique de fonte sur le territoire québécois pour obtenir un modèle général qui peut aider à la bonne gestion des LEN.

Tableau 1: Paramètres de suivi des eaux de fonte et les risques environnementaux associés

Paramètre	Risques
Matières en suspension	Ensablement
Chlorure	Choc salin, éclosion cyanobactéries
Turbidité	Limpidité et vecteur métaux lourds
Débit	Calcul de charge

1. Matériels et méthodes

Afin d'atteindre le premier objectif de ce projet (qui est de mieux comprendre le profil des eaux de fonte et de ruissellement selon la localisation géographique, le mode de gestion de la neige, la période de fonte et selon les conditions météorologiques) une caractérisation des eaux de fonte et de ruissellement issues du LEN d'une municipalité du Québec est effectuée. Cette caractérisation des eaux de fonte et de ruissellement sera réalisée par une mise à jour de la littérature scientifique et technique ainsi que par une campagne d'échantillonnage et d'analyse. Une description des données obtenues sera présentée, des relations seront examinées entre certaines caractéristiques de ces eaux, et finalement, ces dernières seront comparées aux seuils et recommandations en vigueur. Dans ce document, il sera présenté la méthodologie d'échantillonnage et d'analyse effectuée pour les eaux de fonte. En colligeant toutes les informations actuelles et celles du présent projet de caractérisation, l'objectif ultime est de proposer un modèle général de « fonte des neiges » concernant des neiges municipales/résidentielles applicable pour le guide d'aménagement des lieux d'élimination de neige au niveau de la conception.

Voici les hypothèses à vérifier lors de la caractérisation des eaux de fonte et de ruissellement issues du LEN de la municipalité:

- La littérature scientifique et technique permet de relever des problématiques au niveau de la salinité, des métaux et de MES dans les eaux de fonte ;
- Les contaminants relâchés sont influencés dans le temps par une dynamique de fonte en trois phases distinctes ;
- Les concentrations diminuent à mesure que l'on s'éloigne du LEN en espace ouvert avec possibilité d'infiltration et effet de dilution avec les autres apports d'eaux de fonte externes au dépôt à neige ;
- Les conditions climatiques influencent la dynamique de fonte et la quantité de neiges à gérer.

2. Méthodes d'échantillonnage

Les échantillons ont été prélevés tout le printemps à partir de mars 2023 jusqu'à la fin de la fonte (début juin). Les prélèvements ont eu lieu 3 fois par semaine au début de la fonte (le lundi, mercredi et vendredi) pour le mois de mars et avril, puis 2 fois par semaine (chaque mardi et jeudi) à partir de mai jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eaux de fonte. Les figures 1 et 2 ci-dessous présentent la bute de neige avant et au début de la fonte respectivement.

Les échantillons ponctuels ont été prélevés sur 7 sites selon cette suggestion. D'autres points ont été également échantillonnés en fonction de nos observations sur place lors de la fonte. La figure 3 ci-dessous montre la disposition des différents points d'échantillonnage. La figures 4 ci-dessous présente l'emplacement du point 3 sur la bute de neige.



Figure 1: Monticule de neige avant la fonte



Figure 2: Monticule de neige au début de la fonte



Figure 3: Emplacement des points d'échantillonnage

- | | | |
|-----------|---|---------------------------------|
| Point 1: | Devant la bute, du côté du stationnement | Point médiane |
| Point 2: | À l'arrière de la bute, du côté de la rivière | Point le plus éloigné |
| Point 3: | À l'avant, à droite de la bute | Le plus près |
| Point 4: | Dans le ruisseau (témoin) | Non influencé par dépôt à neige |
| Point 5: | écoulement de l'eau vers l'exutoire | |
| Point 6 : | Écoulement en amont du point 5 | |



Figure 4: Emplacement du point d'échantillonnage 3

D'autres points ont été identifiés au fur et à mesure de la fonte. Il s'agit des points suivants :

- Point 7 : Écoulement en amont du point 6
- Point 8 : Dans le ruisseau, en amont du point 4
- Point 9 : Écoulement en amont du point 7

Ces points d'échantillonnage ont été choisis de sorte de suivre le trajet de la neige usée de la pile de la neige jusqu'à l'exutoire pour connaître la variation des concentrations en sels chlorures, mais aussi en métaux et d'autres polluants.

Des échantillons sont prélevés à l'aide de bouteilles en plastique de 1000 mL. Pour chaque campagne, deux échantillons de 1L sont prélevés par point d'échantillonnage pour les échantillons ponctuels. Les analyses seront faites par duplicata pour ainsi s'assurer de la fiabilité des analyses et de la méthode d'échantillonnage. Chaque bouteille sera identifiée soit par les 2 premières lettres, soit par le chiffre correspondant au numéro du point d'échantillonnage. Les échantillons sont envoyés le jour même au laboratoire du Cteau afin d'être analysés tout de suite ou alors préservés pour les analyses ultérieures.

3. Analyses faites sur les échantillons

Les chlorures, matières en suspension (MES), les métaux, le pH, la conductivité et la turbidité sont déterminés après chaque échantillonnage. Les données liées au pH, à la conductivité et à la turbidité sont mesurées avec les instruments suivants :

- pH : Oakton Acorn pH 5 Meter
- Conductivité : Oakton TDS 6+
- Turbidité : Hach turbidimètre portatif 2100P, USEPA 180.1

Toutes les analyses sont réalisées par le Cteau : chlorures, MES, Turbidité. Les chlorures sont analysés conformément au protocole interne du Cteau. La méthode employée est la méthode de Mohr, qui est un titrage colorimétrique dans lequel une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) est ajoutée à l'échantillon. Les chlorures précipitent de manière proportionnelle à l'ajout du AgNO_3 sous forme de chlorure d'argent AgCl . Le chromate de potassium, qui donne une coloration jaune à l'échantillon, est utilisé comme indicateur de précipitation. Lors du dosage, les ions Ag^+ forment un précipité blanc trouble avec les ions

Cl⁻ jusqu'au point d'équivalence, où tous les ions Cl⁻ auront précipité. L'échantillon devient plus trouble pendant le titrage si la teneur en chlorures est élevée (Duret, 2020). La méthode gravimétrique employée pour les MES est la méthode MA. 104— S.S. 2.0 (CEAEQ, 2012). Cette méthode est inspirée du Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, publié par American Public Health Association (APHA), l'American Water Works Association (AWWA) et la Water Environment Federation (WEF).

4. Résultats et discussion

Les tableaux 2, 3 et 4 ci-dessous présentent les résultats d'analyse par point d'échantillonnage pour les chlorures et MES. Afin de mieux comprendre la dynamique de fonte, les figures 5 6 et 7 ci-dessous illustre le comportement des chlorures, MES et turbidité durant toute la période de fonte. Il est à noter que les points d'échantillonnages ne sont pas tous accessible durant la campagne d'échantillonnage. Ce qui explique que certains points ne sont pas caractérisés selon les dates d'échantillonnage.

Selon les figures 5 et 6, la dynamique de fonte comporte 3 phases distinctes. Durant la première phase correspondant au début de la fonte, les concentrations en chlorures sont élevées et celles en MES sont faibles, voir nulles. Cela est dû au faible débit de fonte, ne pouvant donc pas entrainer les MES vers l'exutoire. Ces particules restent alors bloquées dans la pile de neige. Contrairement aux MES, les chlorures étant solubles, ils sont lessivés et entraînés par la veine d'eau jusqu'à l'exutoire. La municipalité ayant opté pour un mode de gestion des neiges selon une approche « sans sel » (quartiers blancs), il est observé que les concentrations en chlorure demeurent somme toute significative, soit des concentrations relevées à près de 1000mg/L dans le mois d'avril. Au fur et à mesure de la période de fonte, les températures (figure 7) augmentent, entraînant une augmentation du débit de fonte. Ce dernier, entraine progressivement les MES vers l'exutoire. Les graphiques des figures 5 et 6 illustrent l'augmentation progressive des MES et la diminution progressive des ions chlorures au fur et à mesure de la fonte. La turbidité quant à elle, étant liée aux particules, ses concentrations suivent la même dynamique de fonte que les MES. Toutefois, la littérature relève qu'il peut y avoir une pointe de turbidité lors d'une baisse de débit de fonte (baisse de concentrations en MES).

Tableau 2: Concentrations en chlorures (mg/L) mesurées lors de la campagne d'échantillonnage.

Date	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
2023-04-12	67,21	4,26					
2023-04-14	30,59	65,71	23,76				
2023-04-21	11,02	38,18	9,16	20,95			
2023-04-26				12,16	1007,96		
2023-05-03			7,70	8,00	210,00	233,00	
2023-05-04				12,70	402,00	280,00	
2023-05-05					531,00	311,00	303,00
2023-05-09					291,00	219,00	221,00
2023-05-10						198,00	204,00
2023-05-12			6,28		140,00	139,00	139,00
2023-05-16					81,40	79,80	77,30
2023-05-23					63,90	69,80	68,40
2023-05-30					38,60	37,60	36,60
2023-05-31					30,30		29,30
2023-06-02					23,50		21,10
2023-06-07					23,60		23,20
2023-06-09					21,00		20,50
2023-06-13					9,16		9,89
2023-06-15					12,80		12,80
2023-06-16					12,20		12,40
2023-06-19					9,93		9,25

Tableau 3: Concentrations en MES (mg/L) mesurées lors de la campagne d'échantillonnage.

Date	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
2023-04-12	21060,0	678,0					
2023-04-14	3930,0	1016,7	286,0				
2023-04-21	18000,0	556,0	182,0	7,3			
2023-04-26				6,3	28,4		
2023-05-03			38,0	8,0	8,8	5,6	
2023-05-04				2,5	5,5	5,5	
2023-05-05					27,5	16,2	68,4
2023-05-09					15,5	24,2	19,8
2023-05-10						55,0	26,5
2023-05-12			696,0		94,0	57,3	81,2
2023-05-16					27,0	11,7	12,0
2023-05-23					122,0	25,3	24,8
2023-05-30					50,0	36,5	36,0
2023-05-31					204,0		73,5
2023-06-02					65,0		68,0
2023-06-07					110,8		5,6
2023-06-09					46,8		8,8
2023-06-13					340,0		172,0
2023-06-15					340,0		28,0
2023-06-16					70,0		23,4
2023-06-19					112,0		35,5

Tableau 4: Turbidité (UTN) mesurée lors de la campagne d'échantillonnage.

Date	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
2023-04-12	6600	144					
2023-04-14	4440	1014	564				
2023-04-21	6550	178	146	1,9			
2023-04-26				2,34	6,9		
2023-05-03			62,2	8,00	20,1	13,2	
2023-05-04				3,05	11,1	9,18	
2023-05-05					19,2	15,5	30,3
2023-05-09					10,3	14,9	15,9
2023-05-10						19,9	24,5
2023-05-12			177		63,5	52,8	62,2
2023-05-16					32,2	33,3	37,3
2023-05-23					152	65,6	70,5
2023-05-30					67,5	66,9	73
2023-05-31					257		173
2023-06-02					71,3		78,8
2023-06-07					71,4		30,9
2023-06-09					51,4		27,9
2023-06-13					170		159
2023-06-15					177		61,7
2023-06-16					64,0		49,6
2023-06-19					104		56,8

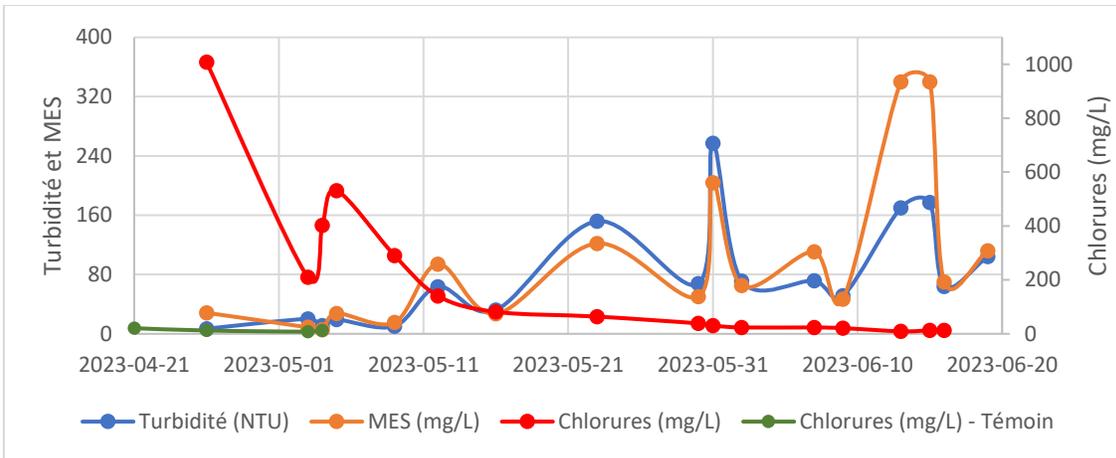


Figure 5: Dynamique de fonte observée à l'exutoire

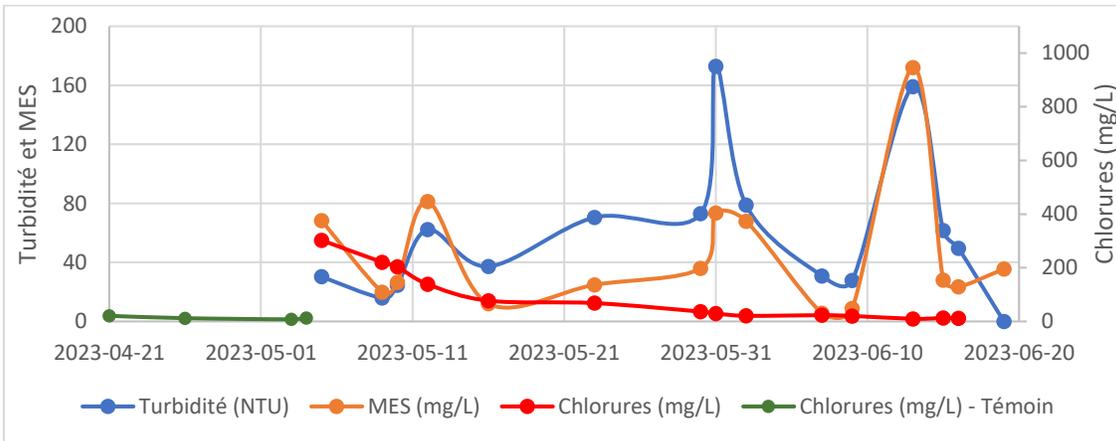


Figure 6: Dynamique de fonte observé au point 7 situé en amont du point 6 et donc en mont de l'exutoire

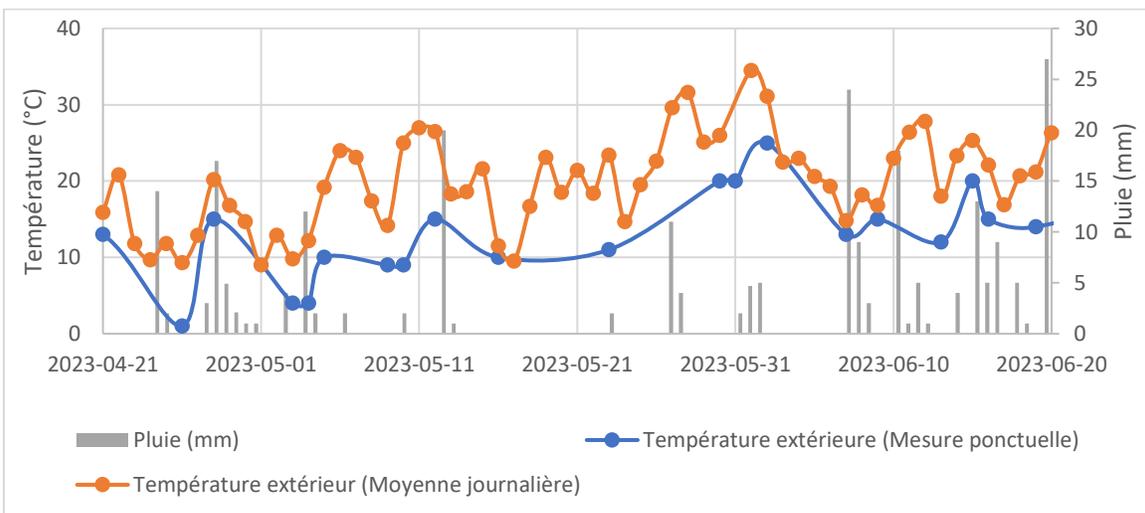


Figure 7: Températures et précipitations observés lors de la dynamique de fonte

Partie 2 : ÉVALUATION DES VOIES POSSIBLE DE DESSALEMENT PASSIF DES EAUX DE FONTE DE LIEUX D'ÉLIMINATION DES NEIGES.

Le second objectif est de déterminer si l'utilisation de techniques de dessalement passives sur les lieux d'élimination des neiges usées permet d'améliorer la qualité des eaux lors de la fonte et si cette mesure permet d'atténuer significativement la pollution ponctuelle causée par le ruissellement issu des dépôts à neige. Ces résultats contribueront à l'effort collectif d'assainissement.

La section 2 présentée ici est la partie exploratoire visant à étudier la faisabilité de plusieurs méthodes de traitement pour l'enlèvement partiel du **sel** (essentiellement NaCl et CaCl₂) des eaux de fontes. La réduction des MES par voie passive, notamment par des ballots de paille, a déjà fait l'objet d'études par la ville d'Edmunston en collaboration avec le CCNB-INNOV. L'étude de l'enlèvement des métaux lourds par charbon actif devrait faire l'objet d'une autre partie de projet.

Afin de faciliter l'implantation dans les municipalités, les méthodes de traitement du sel à envisager doivent recourir le moins possible à une mécanisation ou à une procédure complexe, être capable de traiter de très grands volumes (environ 50 000 m³ en 1 mois pour la phase la plus concentrée en sel) et des concentrations en sel variables pouvant atteindre des cas extrême estimés à 70 g/L en NaCl.

Étape 1 : Exploration des traitement passifs potentiels

Dans ce contexte, seuls des traitements dits *passifs* ont été envisagés pour l'enlèvement du sel à savoir l'échange ionique sur résine et sur zéolite, l'adsorption sur charbon actif, la filtration gravitaire, le gel-dégel, l'évaporation *par capillarité/cristallisation*.

Il est à noter que les trois premiers traitements sont pour l'enlèvement des ions (Ca²⁺ Na⁺ et métaux lourds) tandis que les 3 derniers visent l'enlèvement des sels (NaCl et CaCl₂). Cette étape a fait partie du projet d'intégration technique de deux étudiants du programme DEC Technologie de l'Eau du Cégep Saint-Laurent. Ils ont réalisé les travaux expérimentaux et les résultats présentés ici sont tirés de leur rapport de projet d'intégration technique (Coudé, H. et Read, E. 2021).

1. Méthodologie expérimentale

Cette section présente les caractéristiques des eaux de fontes utilisées pour valider en laboratoire quatre (4) approches de dessalement passif des eaux de fontes : l'échange ionique ou l'adsorption, l'utilisation de cycle de gel et de dégel, l'évaporation par capillarité et la filtration gravitaire.

1.1. Description des eaux de fonte

Les eaux de fonte sont essentiellement constituées de MES, de NaCl, de CaCl₂ et de traces de métaux lourds. Dans ce projet, nous cherchons une méthode de dessalement passif afin de limiter les pics de concentrations en sel.

Les critères de rejet dans l'environnement pour la prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques) sont fixés à 230 mg/L pour les chlorures et 200mg/L pour les sodium. Il n'y a pas de restrictions pour les calcium (MELCCFP, 2023). Cependant certaines études mentionnent un caractère toxique pour les chlorures à des concentrations aussi basses que 64 mg/L pour des eaux de faible dureté telle que 10mg/L CaCO₃ (Elphick James R.F et al. 2010). Enfin notons que lors des infiltrations dans le sol d'effluents salés, en plus de potentiellement contaminer les nappes phréatiques, les Na⁺ affectent la structure des sols de part leur pouvoir dispersant.

Les essais de dessalement ont été effectués sur des eaux synthétiques représentant les concentrations maximales, minimales et moyennes des résultats de caractérisation et un effluent réel.

Il est important de noter que la campagne d'échantillonnage pour la caractérisation des eaux de fonte s'est amorcée à la fin du mois d'avril donc théoriquement après le pic de concentration. Ainsi la concentration en chlorures pourraient être plus élevée dans la période qui précède le début de la prise d'échantillons. Les solutions testées et les paramètres de suivit sont présentées aux tableaux 4 et 5.

Tableau 5: Concentrations choisies pour faire les tests en sel et en chlorure de calcium et concentration équivalente en ions Na⁺, Ca²⁺ et Cl⁻

Solution	Concentrations choisies		Concentrations équivalentes en ions		
	NaCl (mg/L)	CaCl ₂ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
S0 (sel seulement)	800	0	315,07	0	486
S1 (min)	763	138	300	50	552
S2 (max)	1779	318	701	115	1284
S3 (moyenne)	1271	222	500	80	913
S4 (réelle)	Selon échantillon réel		Selon échantillon réel		

Tableau 6: Paramètres de suivi et méthode d'analyse.

	Appareillage / méthode	Principe
Conductivité	conductimètre portatif CON 6 de la marque OAKTON	Mesure directe
Concentration en chlore libre Cl ⁻	méthode de MOHR	100 ml échantillon titré avec AgNO ₃ 0.0141N +1 mL d'indicateur K ₂ CrO ₄ Virage cuivré
Dureté (Ca ²⁺)	complexométrie	50 ml échantillon à 30C titré par EDTA 0.02N avec BBr (indicateur) et pH=12 Virage rose à bleu

1.2. Expériences réalisées : Échange ionique ou adsorption

Ces expériences ont été réalisées sur des zéolites, des résines échangeuses de cations et sur du charbon actif. L'objectif était de vérifier la capacité des zéolites de type clinoptilolite à échanger les Na⁺ et Ca²⁺ notamment lorsque celle-ci sont conditionnées à l'acide. Le conditionnement se fait en mettant la zéolite à tremper pendant 24H dans une solution d'acide sulfurique 1N.

Également il s'agissait de vérifier le comportement d'une résine échangeuse d'ion ainsi que le charbon notamment pour l'enlèvement des métaux dans les solutions vraies. Ce dernier point n'a pu être analysé faute de temps.

La procédure consistait à mettre dans 250ml une quantité de média et laisser agiter (250 RPM) pour le temps de contact requis. Il n'y a pas eu de filtration avant analyses, bien que nous recommanderions d'en faire une.

Tableau 7: Conditions expérimentales pour les essais d'échange ou d'adsorption. Vitesse d'agitation 150 RPM.

	Zéolite non conditionnée	Zéolite conditionnée	Charbon actif en poudre	Résine EC 1.2 eq/L
Solutions testées	S0, S3, S4	S0, S3, S4	S4	S0, S3, S4
Temps de contact	5 min, 30 min, 1h, 2h	5 min, 30 min, 1h, 2h	5 min, 30 min, 1h	5 min, 20 min, 1h
Masse de média ajoutée à 250 ml d'échantillon	1g, 5g, 10g	1g, 5g, 10g	10 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L	0,5 g, 1g, 5g
Analyses	Dureté calcique, chlorures, conductivité	Dureté calcique, chlorures, conductivité, pH	Dureté calcique, chlorures, conductivité	Dureté calcique, chlorures, conductivité, pH

1.3. Expériences réalisées : Gel /dégel

L'objectif est d'opérer la séparation entre une zone d'eau pure et une zone d'eau salée par la méthode gel suivi d'un dégel. Il s'agit donc de faire un dessalement partiel de NaCl. Les essais s'opèrent sur des flacons en plastique contenant 1 L d'échantillon. Deux séries d'échantillons sont mises au congélateur et une autre est placée sur le toit du cégep. Le temps de congélation pour l'essai avec le congélateur est d'une semaine. Les échantillons sur le toit y sont installés alors que les températures nocturnes tombent encore en dessous de zéro. Une fois la période de congélation terminée, les échantillons sont placés à température pièce afin de décongeler.

Lorsque les échantillons sont complètement décongelés, une sonde de conductivité portative est insérée afin de déterminer quelle est la hauteur de séparation entre la phase concentrée en sel et celle dessalée se trouvant au-dessus. Cette étape permet de déterminer la proportion du volume qu'occupe les deux phases. Ceci est suivi du prélèvement d'une partie du surnageant pour en faire l'analyse de la dureté calcique et des chlorures.

1.4. Expériences réalisées : Évaporation par capillarité

Il s'agit de favoriser l'évaporation de la solution en induisant la remontée capillaire de la solution saline sur un support. Les sels devraient cristalliser sur le support. La figure 8 présente les trois types de support ont été étudiés pour cette méthode : Cône en terre cuite, corde de coton et coton à fromage.



Figure 8: Support utilisés lors des essais d'évaporation par capillarité

Le cadre support du coton à fromage est constituée de pailles en plastique collées ensemble en les faisant fondre. Une paille en plastique est également utilisée comme structure pour la corde de coton. Une pellicule de film étirable est placée sur le dessus du bécher afin de ne laisser que le support exposé à l'air libre. Un témoin de chaque solution ne contenant pas de support est laissé à l'air libre afin d'évaluer l'évaporation naturelle (sans support). Les essais sont faits à l'intérieur (pas de vent) à une température autour de 25°C. Il n'y a pas eu de mesure du taux d'humidité.

1.5. Expériences réalisées : Filtration gravitaire

Cet aspect du projet n'a pu aboutir par manque de matériel adéquat. Dans les rares cas où la filtration a été possible les résultats sont décevants. Il est cependant clair que la séparation de sel nécessite des pressions importantes et des filtres fins. Donc d'un point de vue gravitaire, soit on met une colonne d'eau très grande soit on attend un temps très long. Dans les deux cas, cela n'est pas adapté à la problématique du projet.

2. Résultats

Les résultats d'intérêt sont présentées dans cette section.

2.1. Résultats des expérimentations d'échange ionique

Les résultats obtenus sur les zéolites non conditionnées sont présentés dans le tableau 8. Les résultats montrent un bon taux d'enlèvement des calciums allant de 50% en 5 minutes de contact jusqu'à 90 % en deux heures. On note également un léger enlèvement des chlorures jusqu'à 27%. Le sodium ne semble pas être enlevé.

Le conditionnement à l'acide de la zéolite n'a pas permis de mettre en évidence un meilleur taux d'enlèvement des ions sodium, mais en revanche a amélioré l'enlèvement des chlorures au détriment des ions calcium. Des essais plus poussés pourraient être envisagés pour étudier ce phénomène. Cependant les résultats obtenus avec la zéolite conditionnée sont trop partiels pour pouvoir conclure.

Le taux d'enlèvement des ions calcium avec la résine échangeuse de cation est excellent plus de 99%.

Les essais avec le charbon actif ne sont pas concluants quant à l'enlèvement des cations ou anions présents en solution. L'analyse des métaux lourds n'a pas pu être faite.

Tableau 8: Résumé des meilleurs taux d'enlèvements obtenus avec les essais de filtration par adsorption et échange d'ions pour la zéolite conditionnée, non conditionnée et la résine échangeuse d'ions

Enlèvement des chlorures Cl ⁻		
Type de média	Meilleur taux d'enlèvement (%)	Conditions (échantillon, masse de média par 250 mL, temps d'exposition)
Zéolite non conditionnée	27	S3, 10 g, 2h
Zéolite conditionnée	34	S4, 1 g, 1h
Enlèvement du calcium Ca ²⁺		
Type de média	Meilleur taux d'enlèvement (%)	Conditions (échantillon, masse de média par 250 mL, temps d'exposition)
Zéolite non conditionnée	90	S4, 10g, 2h
Zéolite conditionnée	52	S3, 5g, 1h
Résine	99	S2, 10g, 1h

2.2. Résultats des expérimentations de Gel/Dégel

Les résultats des essais de Gel/Dégel effectués sur le toit du Cégep ne sont pas constants contrairement à ceux effectués au congélateur. Seuls ces derniers résultats sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9: Résultats des deux essais de Gel / Dégel dans congélateur en termes de fraction volumique d'eau dessalée et de fraction massique d'enlèvement des chlorures, des calciums et des sodiums

Échantillon	Fraction du volume occupé par l'eau dessalée (%)		Enlèvement Cl ⁻ (%)		Enlèvement Ca ²⁺ (%)		Enlèvement Na ⁺ (%)	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2
S0	51	48	42	33	-	-	32	33
S1	51	56	22	15	39	44	38	29
S2	51	59	69	81	61	74	75	84
S3	61	54	73	70	99	65	81	79
S4	60	64	50	53	95	10	-	-

Les pourcentages d'enlèvement sont exprimés par rapport à la masse des sels résiduels. L'enlèvement pour Na⁺ est calculé par rapport à la concentration initialement mise et en supposant que la concentration en sodium résiduelle $[Na^+] = [Cl^-]_{résiduelle} - 2x[Ca^{2+}]$, les concentrations sont exprimées en meq/L.

Ces essais démontrent la faisabilité du Gel/dégel pour séparer à au moins 50% une eau saline en deux zones : une eau dessalée et une eau salée et ce quelque soit la concentration initiale en sel. Ce qui signifie que l'on peut réduire de 50% le volume à traiter. L'eau dessalée devrait rencontrer les normes pour être rejetée directement dans l'environnement. En fait, les analyses effectuées sur le surnageant (eau dessalée) démontrent que les concentrations des critères de rejet dans l'environnement sont respectés pour au moins 6 essais. Il est à noter que le fait de plonger une électrode de conductivité a certainement perturbé la zone de surnageant d'autant que le volume est petit (1litre). Cette voie est prometteuse mais requière des essais sur de plus gros volumes.

2.3. Résultats des expérimentations d'évaporation par capillarité

Les essais préliminaires d'évaporation ont donné des résultats très intéressants. En termes d'évaporation nette l'évaporation a été plus rapide pour tous les essais avec support comparé au témoin. Cependant, ramené à la surface déployée, le taux d'évaporation le plus important a été obtenu avec le coton fromage, suivi dans l'ordre par le témoin, la corde de coton et enfin le cône d'argile.

Tableau 10: Taux d'évaporation net (mL/jour) et ramené à la surface déployée en (Litre/Jour et par m²)

	Évaporation (ml/J)			Évaporation (L/J/m ²)		
	S0	S3	S4	S0	S3	S4
Coton fromage	50	52	57	2,56	2,57	2,90
Témoin	8	7	7	1,89	1,65	1,60
Corde coton	20	20	20	0,60	0,59	0,60
Terre cuite	10	10	11	0,23	0,23	0,26

Le coton fromage a un taux d'évaporation de presque le double du témoin. Il est à noter que La conductivité dans le témoin augmente de 40% en 10 jours alors que la conductivité reste identique pour les autres essais avec support. Ceci indique que seule l'eau s'évapore dans le témoin alors que pour les systèmes avec support capillaire le sel circule lors de la remontée capillaire et va cristalliser sur le support.

3. Conclusions

Les essais exploratoires visaient à établir la faisabilité des traitements passif d'enlèvement du sel notamment des eaux de fonte d'un dépôt à neige. Il a été établi :

- Que les essais avec zéolite ne sont pas concluants pour l'enlèvement du sel
- Que les essais avec résine permettent de beaux taux d'enlèvement des calciums mais sont dispendieuses et peu adaptées à de gros volumes et ne permettent pas l'enlèvement des chlorures
- Que les essais avec charbon actifs ne permettent pas d'enlèvement significatifs des ions considérés mais devraient être testés pour traitement des métaux lourds.
- Que les essais Gel/Dégel permettent d'obtenir au moins 50% d'eau dessalée pouvant rencontrer les normes de rejets. Cette voie est prometteuse puisqu'il serait possible de réduire de 50% les volumes à traiter. Cependant il faudrait faire

du stockage pour profiter du Gel/Dégel naturel. Considérant les débits à traiter cela semble problématique. Des essais complémentaires devraient être effectués sur de plus gros volume afin de bien vérifier la conformité des eaux dessalées.

- Que les essais d'évaporation capillaire sont les plus prometteurs puisqu'ils permettent une évaporation et une récupération du sel sous forme de cristaux.

Cette voie mériterait une investigation afin d'établir le comportement d'évaporation en milieu naturel soit en présence de vent et de température plus froide. Il existe une littérature faisant état d'évaporateur assistés par le vent WAIV, dont les performances indiquent un taux d'évaporation jusqu'à 10 fois supérieur au témoin (Gilron, J et al ,2003). Ces procédés sont proposés pour traiter les lixiviats. (WAIV™ Evaporation System) D'autres études combinent l'action du soleil (matériaux noirs pour absorber la chaleur) et le vent.

Toutes ces voies sont prometteuses et pourraient être adaptées au contexte de l'étude. Cependant dans tous les cas il faudra être capable de canaliser les eaux de fonte pour mieux les traiter.

Étape 2 : Première série d'essais de capillarité

Les résultats des tests d'évaporation par capillarité ayant été les plus prometteurs, une série complémentaire d'essais a été effectuée afin d'évaluer l'influence des paramètres vent, température et type de matériau sur le taux d'évaporation observé. Cette étape a fait partie du projet d'intégration technique de deux étudiants du programme DEC Technologie de l'Eau du Cégep Saint-Laurent : Hamza Joulaibi et Alexis Cayouette sous la supervision de leur professeure Isabelle Noël.

Ils ont réalisé les travaux expérimentaux (45 heures chacun) et les résultats d'intérêt présentés ici sont tirés de leur rapport de projet d'intégration technique (Cayouette, A. et al., 2022).

1. Méthodologie expérimentale

Les expériences ont été effectuées au laboratoire du Cégep Saint-Laurent. Dans la mesure du possible, les conditions de températures et de vent ont été reproduites l'aide d'une ampoule chauffante de 160W de la marque REPTIZOO pour simuler le soleil et un ventilateur de marque Mafiti modèle MF100 pour simuler le vent. La fonte des neiges se passe surtout dans les mois de mars et d'avril. Les températures et les vitesses de vent moyennes pour ces mois en 2022 sont respectivement 4.38 m/s et 5.02°C.

En laboratoire, l'influence de la température a été suivie pour des températures comprises entre 17 et 25°C celle du vent entre 1.5 et 2.5 m/s. Le taux d'humidité moyen était de 20%. La configuration adoptée pour tous les tests de dessalement par capillarité est celle « *champignon* ». Elle consiste en une corde reliée à un filtre faisant office de chapeau du champignon. L'objectif attendu est que l'eau salée puisse remonter par capillarité le long de la corde, qu'elle imbibe le filtre et que le sel ayant cristallisé sur le bord du filtre tombe par gravité dans la coupelle externe (Figure-10).

L'évaporation de 15 béciers *champignons* soumis à des conditions différentes de vent, chaleur et type de matériau utilisé ont été suivis quotidiennement pendant 10 jours. Des témoins ont été également ajoutés afin de vérifier l'efficacité du dessalement type « *champignon* ».

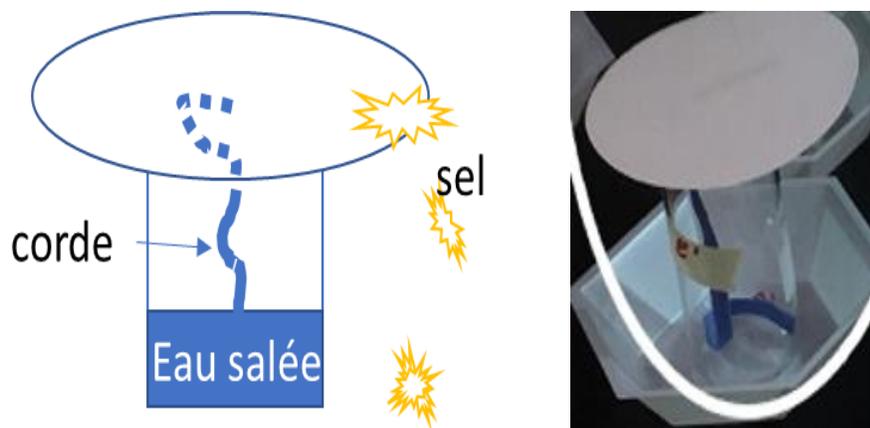


Figure 9: Prototype de dessalement passif « *champignon* » - Représentation schématique (gauche) et photo du montage (droite)

Trois types de corde ont été testés, une corde en coton bleu, une corde en coton noir et une corde en coton blanc. Les fils des 15 béciers-champignons ont une longueur similaire de 25 cm. Deux types de filtres ont également été testés, un filtre classique blanc d'un diamètre de 12,5 cm et le même filtre imbibé de charbon afin de vérifier s'il capte plus de chaleur et améliore ainsi l'évaporation. Pour imprégner le filtre de charbon, une solution de charbon actif en poudre est filtrée sur le filtre qui est ensuite séché au dessiccateur. Quelques tests ont été effectués sur des filtres en bambou noirs qui se sont révélés inefficaces et donc abandonnés par la suite. La concentration en NaCl pour tous les essais est de 12g/L.

Un prototype final a été conçu par les étudiants comprenant un tube de charbon poreux d'une hauteur de 24cm et d'un diamètre de 2,9 cm surmonté d'un filtre de bambou noir, remplacé par un filtre blanc d'un diamètre de 9 cm au bout de 10 jours. Une corde de coton noir de 45cm passe au centre du cylindre et est connectée au filtre. L'intérêt de ce prototype est d'utiliser la capillarité pour obtenir une évaporation sur le filtre comme pour les essais champignon mais également d'offrir une surface supplémentaire pour l'évaporation à travers le tube poreux. Le sel est récolté via une collerette sur le tube poreux. La concentration en NaCl pour tous les essais avec le prototype est de 10g/L. Les surfaces d'évaporation sont données dans le tableau 10

Tableau 11: Aires d'évaporation en des différentes configurations

Configuration	Aire d'évaporation (m ²)
Grand filtre blanc	0,02454
Petit filtre blanc	0,01272
Filtre noir	0,02077
Filtre bambou	0,00814
Aire extérieure. tube de charbon	0,01822
Aire intérieure du tube	0,00283
Surface totale du tube	0,02105

2. Résultats

Cette section présente les résultats des essais réalisées avec le prototype champignon et le prototype Hamzalex pour l'évaporation par capillarité.

Prototype champignon

Les résultats des essais sont présentés à la figure 11 et le montage expérimental est présenté à la figure 12. Les faits saillants suivants sont à noter pour le prototype champignon :

- La couleur noire du filtre n'a pas eu l'impact escompté puisqu'aucune amélioration n'a pu être observée en présence de chaleur.
- Le type de corde n'a pas eu d'influence majeure sur l'évaporation
- La connection entre la corde et le filtre est difficile à maintenir particulièrement pour le filtre en bambou. En conséquence, certains tests n'ont pas pu être menés jusqu'au bout puisque l'eau ne pouvait se rendre jusqu'au filtre. De plus certaines cordes se sont asséchées coupant ainsi la connection avec le filtre.
- Il n'a pas été possible d'observer un impact du paramètre température sur l'évaporation. L'écart des températures pièce et sur le filtre éclairé par la lampe n'étant pas plus de 5 degrés, les tests se sont révélés non concluants.
- Le paramètre vent est celui dont l'impact sur l'évaporation a été le plus concluant

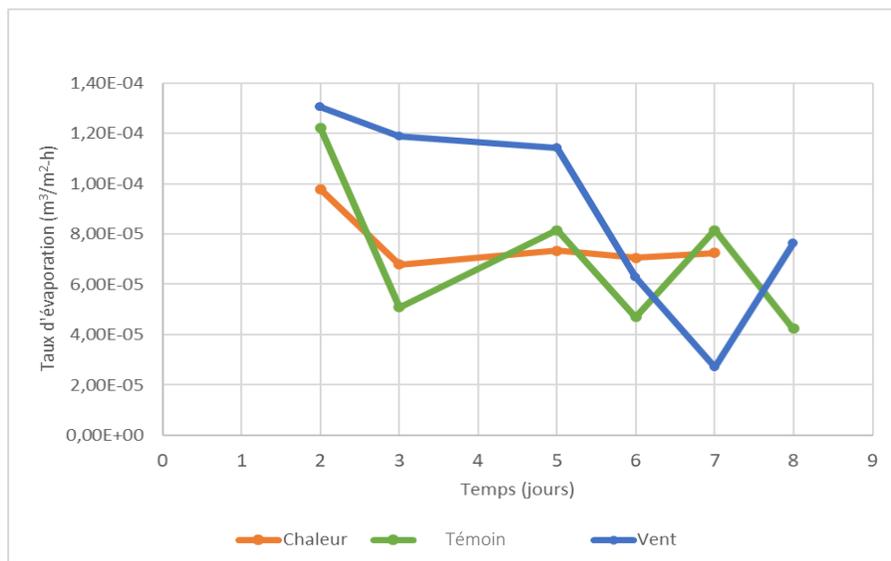


Figure 10: Prototype de dessalement passif « champignon » - Taux d'évaporation témoin (vert), en présence de vent (bleu) et à température élevée (orange)

Il est à noter que tous les taux d'évaporation ont une tendance à la baisse au fur et à mesure que les jours passent. Ceci peut s'expliquer par le fait que les filtres accumulent du sel chaque jour limitant l'aire d'évaporation disponible. Les taux d'évaporation sont calculés selon l'équation 1.

$$\text{taux} \left(\frac{m^3}{m^2 \cdot h} \right) = \frac{\text{volume d'eau évaporée}(m^3)}{\text{aire de l'évaporateur}(m^2) \times \text{temps}(h)} \quad (1)$$

Le sel s'est bien accumulé en bordure du filtre mais n'a pas cristallisé suffisamment pour tomber et être récolté dans la collerette. Environ 2 à 6 g de sel ont été récoltés dans ces essais sur 8 jours. Le taux de récupération de sel par jour et par mètre carré de surface d'évaporation est compris entre 19 et 59g/j.m².



Figure 11: Prototype de dessalement passif « champignon » - Accumulation de sels en bordure des filtres.

Prototype Hamzalex

Les résultats des essais sont présentés à la figure 13 et le montage expérimental est présenté à la figure 14. Les traits saillants sont à noter pour le prototype final Hamzalex :

- Le taux d'évaporation du prototype a été maintenu supérieur au taux d'évaporation témoin (bécher à surface libre) sur 12 jours. Dans les 3 premiers jours, un taux d'évaporation 3 fois supérieur au taux témoin a été observé (figure 12). Le taux d'évaporation du prototype est aussi supérieur dans les premiers jours aux autres essais type champignon.

- L'eau s'évaporant également à travers le tube de charbon poreux, du sel peut être récupéré sur le pied du prototype directement. La cristallisation du sel a été particulièrement efficace sur le tube poreux (figure 13). Il n'a cependant pas été possible de peser la masse de sel obtenu car une partie de la cristallisation sur le tube poreux a empêché une collecte du sel sans destruction du support poreux.

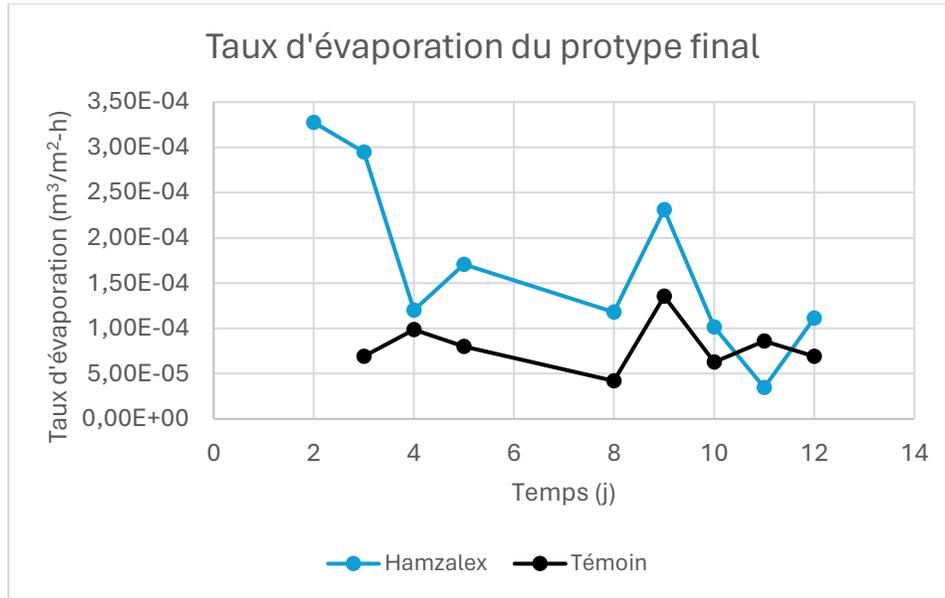


Figure 12: Prototype de dessalement passif Hamzalex - Taux d'évaporation en comparaison avec le témoin (bêcher à surface libre)



Figure 13: Prototype de dessalement passif Hamzalex - Représentation du tube poreux en charbon avec le filtre de bambou noir

3. Conclusion

Les essais menés dans cette partie ont permis de mettre en évidence que la **configuration champignon** est une avenue prometteuse pour l'autocollecte du sel mais qui nécessite une amélioration du filtre collecteur afin que le sel puisse cristalliser en bordure et tomber dans la collerette. La corde servant à la montée capillaire se doit aussi d'être protégée afin de ne pas sécher.

Le **prototype Hamzalex** est aussi prometteur mais la tenue du tube en charbon est assez problématique. En revanche, c'est le procédé qui a donné le meilleur taux d'évaporation et la meilleure cristallisation du sel.

Étape 3 : Deuxième série d'essais de capillarité

Aux vues des résultats obtenus, une deuxième série d'essais de capillarité a été menée parallèlement au laboratoire du Cteau par l'équipe pilote du Cteau et au laboratoire du Cégep Saint-Laurent par Isabelle Noël. Ces essais visaient la mise à l'échelle du principe d'évaporation par capillarité et l'amélioration de la configuration champignon. Tel que présenté à la figure 15, deux configurations ont été mises à l'essai : une configuration *voile* et une configuration *champignon* inspirée de l'étape 2.

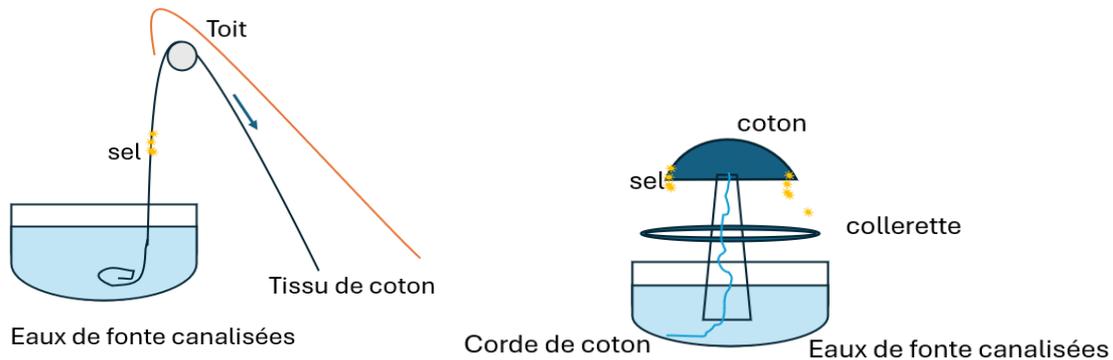


Figure 14: Prototype de dessalement passif - Schéma conceptuel de la configuration voile (gauche) et de la configuration « champignon » (droite)

Bien que la configuration champignon soit attractive de part son potentiel d'autocollecte du sel, la configuration voile semble plus prometteuse en terme de surface d'évaporation. Cette dernière configuration consiste à faire tremper un rectangle de tissu dans l'eau à

dessaler et de le remonter au fur et à mesure de la formation de cristaux de sel afin d'éviter que la cristallisation du sel diminue la surface d'évaporation.

1. Méthodologie expérimentale

1.1. Mise à l'échelle pilote configuration voile :

À partir du schéma de conceptualisation, l'équipe pilote du Cteau a réalisé un prototype de dessalement par voile. Le pilote réalisé reprend l'idée de faire tremper le tissu dans l'eau à dessaler et de le faire tourner par une série de calandres afin d'accélérer le séchage. La dernière calandre a une règle en plastique qui permet récolter le sel cristallisé dans un compartiment séparé du bac des eaux de fonte dans lequel le tissu est plongé. Un moteur permet de faire tourner le voile de coton à raison d'un tour complet en 90 minutes. Dans le bac, la solution saline simulant des eaux de fonte est déversée en continu au moyen d'une pompe et d'un réservoir en boucle fermée. La hauteur d'eau dans le bac et le débit sont ajustables.

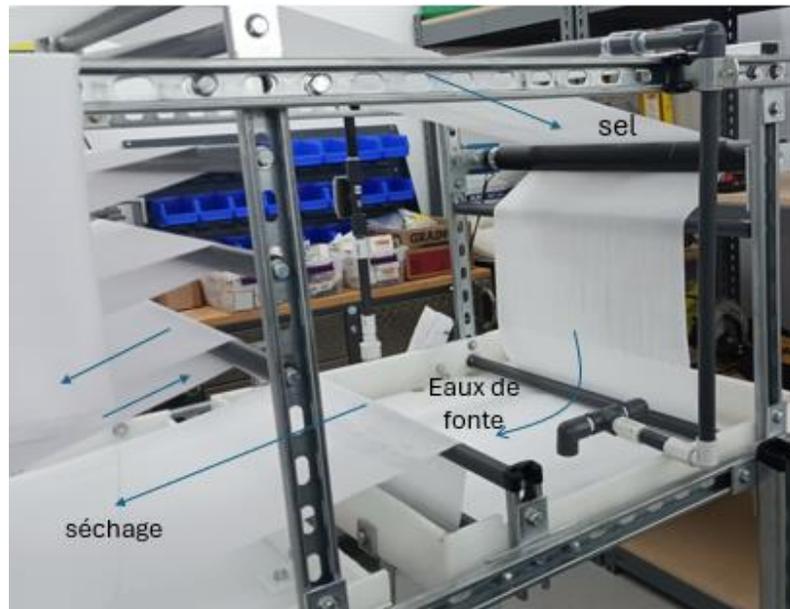


Figure 15: Prototype de dessalement passif à voile – Présentation de la configuration

Les essais réalisés visaient à établir le temps de rotation du tissu pour une récupération optimum de sel. La concentration en sel choisie pour les essais est 70g/L, soit le potentiel maximum (cas extrême de la pointe de concentration) estimé dans les eaux de fonte d'un dépôt à neige.

1.2. Amélioration de la configuration champignon

L'élaboration du prototype champignon à partir du schéma de conceptualisation, a été effectuée en impression 3D par un étudiant en génie mécanique du Cégep Saint Laurent et employé de l'équipe pilote du Cteau. Les essais réalisés au laboratoire visait le suivi du taux d'évaporation, la quantité de sel récupérée et la faisabilité de l'autocollecte du sel. Le tissu collecteur est un tissu de coton fromage en double couche et la corde servant à la montée capillaire est une tresse de trois cordes en coton naturel. La hauteur du champignon est d'environ 25 cm. Le pied du champignon est mis dans un bac contenant 3 litre d'eau salée. La concentration de sel choisie est 10g/L. Une capsule de céramique est mise au sommet du champignon afin d'assurer le contact entre les fils de coton de la corde et le tissu coton formant le chapeau du champignon.



Figure 16: Prototype de dessalement passif « champignon » - Configuration « champignon » avec chapeau en tissu de coton et avec une corde en coton naturel

2. Résultats

2.1. Mise à l'échelle pilote configuration voile

Lors des essais pilotes plusieurs problèmes sont survenus. Tout d'abord la tension du tissu a du être améliorée afin de garantir l'efficacité des rouleaux entraineurs. En effet, le tissu mouillé se déformant beaucoup plus, la rotation des calandres n'était plus efficace (peu d'amprise sur les rouleaux). Ensuite, le temps de rotation étant trop court pour un séchage efficace, il a fallu opérer en cycle plutôt qu'en continu. Enfin le sens de rotation a été changé.

La cristallisation observée n'ayant pas été satisfaisante, les essais ont été arrêtés pour revenir à un système plus proche du schéma conceptuel, davantage adapté à la réalité terrain. Une série d'essai de cristallisation a été effectuée afin d'établir la masse de sel collectée par mètre carré de surface et par jour avec le tissu du pilote. Pour cela le montage ci-dessous a été réalisé. Le voile trempe dans la solution synthétique à 70g/L de sel et est remonté manuellement de 2cm par 24h environ.

L'essai a été réalisé en continu sur 20 jours. La concentration en sel dans le bac a été maintenue à 70g/L par ajout de solution en remplacement de l'évaporation observée. Le taux d'humidité était inférieur à 20%, la température de 25 °C en moyenne et pas de vent.

Le taux d'évaporation global moyen observé sur 20 jours est de $3.47 \times 10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Le taux d'évaporation spécifique de la toile, ici nommé taux d'évaporation corrigé correspond au taux d'évaporation global moins le taux d'évaporation en surface libre dans le bac évalué par un témoin (bécher à surface libre). Le taux d'évaporation corrigé moyen sur 20 jours est de $2.13 \times 10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. On remarque un taux d'évaporation plus important pour les deux premiers points et une relative stabilité ensuite. L'écart entre ces valeurs n'est pas expliqué et pourrait provenir d'erreurs expérimentales.



Figure 17: Configuration de dessalement passif à voile - Essais de cristallisation sur le voile en coton du pilote.

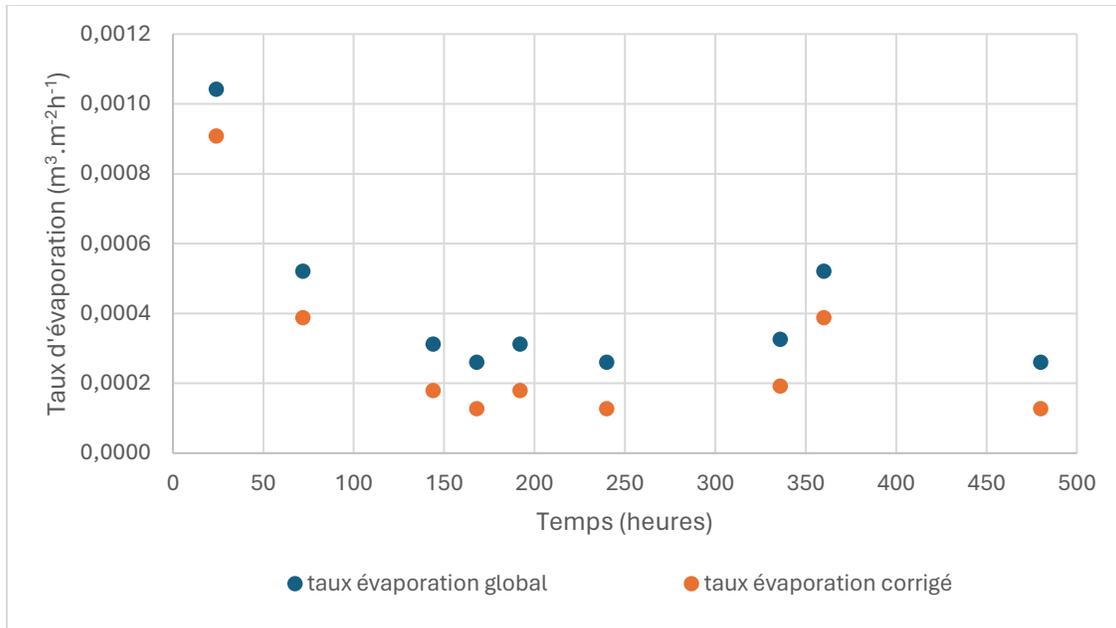


Figure 18: Configuration de dessalement passif à voile - Taux d'évaporation global et corrigé sur 20 jours.

La masse de sel collectée a été évaluée au bout de 31 jours d'essai. Le sel a été récolté sur une surface de 35x80 cm². Le taux de récupération est de 918g de sel par m² de toile pour 31 jours; soit environ 30g de sel par jour et par m² de voile humide.

2.2. Amélioration de la configuration champignon :

Les essais visaient à établir le taux d'évaporation du champignon et l'autocueillette du sel. Les essais ont été réalisés sur 41 jours avec une solution de sel à 10g/L. La température était en moyenne de 21 °C, et le taux d'humidité a oscillé entre 20 et 45%. Le taux d'évaporation moyen obtenu est de $6 \times 10^{-5} m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. La masse de sel collectée est en moyenne de 7g par jour et par m² de coton (chapeau).

Ces performances, qui sont bien inférieures à celles obtenues dans la configuration voile, s'expliquent par le fait que l'eau n'a pu se rendre au bout du tissu car les fils capillaires bleus étaient trop courts sur le chapeau du champignon. L'autocueillette dans la collerette n'a pas pu se réaliser puisque le bord du chapeau n'a pas été atteint.



Figure 19: Amélioration de la configuration de dessalement passif « champignon » - Sommet du champignon avec les fils bleus apparaissant en transparence (Gauche), cordes bleues et corde torsadée (centre) et Configuration champignon avec toile de coton unique pour chapeau et corde(droite).

L'efficacité de la configuration champignon dépend donc étroitement de la corde servant à la remontée capillaire et de sa connection avec le chapeau. Dans cette optique différentes cordes (voile de coton tressé, cordes bleues, voile simple, et voile de coton torsadé) ont été évaluée en terme d'efficacité de remontée capillaire et de cristallisation de sel permettant une éventuelle autocueillette. La concentration en sel dans le bac est de 10g/L. La masse de sel collectée a été évaluée au bout de 22 jours. Le volume d'eau évaporé a été remplacé et la conductivité maintenue relativement constante par ajout de solution saline. La hauteur de remontée capillaire est de 25 cm pour toutes les configuration de corde testée. La qualité du cristal de sel est évalué visuellement. Les résultats en terme de masse de sel récolté sont consignés dans le tableau 12 ci -dessous.

Tableau 12: Sommaire des masse de sel collectée durant les essais.

Type de support		Sel récolté (g/j.m ²)
Configuration à voile	Voile	13,35
Configuration « Champignon »	Corde tressée	12,29
	Corde torsadée	2,39
	Fils bleus*15	19,26

Les fils de coton bleus offrent la meilleure performance avec 19.26 g de sel /jour et par m² collecté. De plus, la cristallisation du sel est assez homogène et dense et se détache

facilement du fil ce qui serait adéquat dans l'optique d'une autocueillette. Le voile de coton est également performant avec 13.35g sel/j.m². Le taux de collecte de sel est inférieur à celui de l'essai précédent car la concentration en sel choisie est 7 fois plus basse. Les autres configurations n'apportent pas d'améliorations substantielles en termes de qualité de cristallisation ou de masse de sel collectée.

Afin d'améliorer la connectivité entre le chapeau du champignon et les fils permettant la remontée capillaire, il a été décidé d'utiliser un morceau de coton fromage unique servant de chapeau et de corde. Les premiers essais préliminaires de deux semaines ont montré que l'eau se rendait jusqu'au bord du chapeau et que quelques grains de sel sont tombés dans la collerette validant le processus d'autocueillette. Ce sont des essais exploratoires qui nécessitent d'être approfondis pour se prononcer sur la faisabilité du concept. Une implantation in situ permettrait d'exporter ces concepts sur le terrain tout en permettant d'aborder les questions techniques liées aux conditions réelles.

3. Conclusions

Cette troisième série d'essais a permis d'évaluer la faisabilité de la configuration voile pour l'enlèvement partiel du sel de l'eau de fonte synthétique. Cependant, il serait nécessaire de procéder à d'autres essais pour valider les résultats exploratoires de cette étude. Citons l'impact du vent sur le taux d'évaporation qui logiquement devrait améliorer le taux de sel collecté lors de conditions venteuses telles qu'observées lors de la fonte des dépôts à neige.

La mise en œuvre sur le terrain nécessite de répondre à de nombreuses questions :

- Doit-on maintenir une hauteur d'eau dans la canalisation des eaux de fonte ?
- Comment remonter passivement le tissu ?
- Quel est l'impact de la variation de la concentration sur la collecte du sel ?
- Peut-on optimiser la surface en contact avec le vent (couloir de vent) ?
- Comment protéger le tissu salé des pluies (toit de type abri bus) ?
- Est-ce acceptable pour les municipalités d'avoir un champ de draps permettant la collecte du sel ?
- Comment récupérer le sel collecté (tremper le tissu dans un petit volume et récupérer le sel) ?
- Peut-on réutiliser le sel récolté (pollutions métaux lourds)... ?

Concernant la configuration champignon, les essais démontrent que le taux d'évaporation est moins haut qu'avec la configuration voile mais le potentiel d'autocueillette rend ce concept attractif. De plus, il semble qu'il est plus esthétique d'avoir un champ de champignon dont le chapeau se couvre de sel qu'un champ de draps qui trempent dans l'eau. Ce concept de dessalement par configuration champignon requière cependant encore quelques essais pour que soit validé sa faisabilité. Les derniers essais se révèlent prometteurs surtout en ce qui concerne l'autocueillette et la superficie d'évaporation. Une question d'importance demeure quant aux épisodes de pluie printanière. Le sel collecté dans la collerette devrait être à l'abri mais pas celui sur le chapeau.

En conclusion et d'après les résultats obtenus, il semble possible de limiter le choc toxique dû aux eaux des fontes des dépôts à neige par un dessalement passif. La mise en œuvre sur le terrain nécessite de très grandes surfaces d'évaporation qui peuvent être rebutantes pour les municipalités. Cependant d'autres essais, notamment en conditions réelles, pourraient permettre une optimisation des taux d'évaporation et de collecte de sel et réduisant par là les surface requises. La récupération du sel, son éventuel recyclage et la protection contre la pluie restent des enjeux majeurs à résoudre avant une application terrain d'où l'importance de poursuivre les essais.

Références bibliographiques

- Ciot T., Gasser D., Crites C.O., Bourgeois F.-R. 2021. *Caractérisation des eaux de fonte et de ruissellement issues d'un dépotoir à neiges usées de la municipalité d'Edmundston*, Rapport technique CTEAU.
- Cayouette A., Joulaibi H. 2022. *Projet dessalement partiel par voie passive des effluents de dépôts à neige : Études exploratoires de la faisabilité de techniques passives de dessalement*. Rapport de projet d'intégration d'études, DEC Technologie de l'Eau, Cégep Saint Laurent, Montréal.
- Coudé, H. et Read, E. 2021. *Dessalement passif*. Rapport de projet d'intégration d'études, DEC Technologie de l'Eau, Cégep Saint Laurent, Montréal.
- Elphick James R.F., Bergh Kelli D., Bailey Howard C. 2011 *Chronic toxicity of chloride to freshwater species: Effects of hardness and implications for water quality guidelines*, Environmental Toxicology and Chemistry (30)1 239-246
- Gilron J., Folkman Y., Savliev R., Waisman M., Kedem O. 2003. *Wind aided intensified evaporation for reduction of desalination brine volume*, Desalination. 158. 205-214
- MELCCFP (2021) *Critères de qualité de l'eau de surface*.
https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/
- Leachate Management Specialists. (2021). WAIV™ Evaporation System.
<https://www.leachate.us/waiv/>