POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Performance de recouvrements isolants partiels pour contrôler l'oxydation de résidus miniers sulfureux
Auteur: Author:	Véronique Coulombe
Date:	2012
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Coulombe, V. (2012). Performance de recouvrements isolants partiels pour contrôler l'oxydation de résidus miniers sulfureux [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/1050/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/1050/
Directeurs de recherche: Advisors:	Bruno Bussière, & Jean Côté
Programme: Program:	Génie minéral

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PERFORMANCE DE RECOUVREMENTS ISOLANTS PARTIELS POUR CONTRÔLER L'OXYDATION DE RÉSIDUS MINIERS SULFUREUX

VÉRONIQUE COULOMBE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUEÉS

(GÉNIE MINÉRAL)

DÉCEMBRE 2012

© Véronique Coulombe, 2012.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Ce mémoire intitulé :

PERFORMANCE DE RECOUVREMENTS ISOLANTS PARTIELS POUR CONTRÔLER L'OXYDATION DE RÉSIDUS MINIERS SULFUREUX

présenté par : COULOMBE Véronique

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., président

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CÔTÉ Jean, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. ALLARD Michel, Ph.D., membre

DÉDICACE

À ma famille et amis

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche Bruno Bussière pour sa disponibilité et son encadrement tout au long de ce projet ainsi que mon co-directeur Jean Côté pour sa disponibilité et sa contribution à ce travail. Je tiens également à remercier l'équipe de Xstrata Nickel Mine Raglan pour leur accueil au site et pour leur précieuse collaboration à ce projet. Merci à la chaire industrielle CRSNG-Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers et le FQRNT-CSRNG de m'avoir permis de mener ce projet de recherche. Merci à l'équipe de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue et de l'Université Laval pour leur aide lors de la réalisation des travaux de terrain et de laboratoire. Finalement, merci à ma famille et amis qui m'ont appuyée tout au long de ce projet.

RÉSUMÉ

Un défi environnemental important de l'industrie minière est la restauration des parcs à résidus miniers, particulièrement lorsque les résidus ont un potentiel de génération de drainage minier acide (DMA). Le DMA est causé par l'oxydation naturelle de minéraux sulfureux au contact de l'oxygène de l'air et de l'eau, phénomène pouvant mener à une contamination des eaux de drainage. Le recouvrement isolant est une méthode de restauration spécialement conçue pour les conditions nordiques. Cette méthode vise à intégrer les résidus miniers dans le pergélisol afin de les maintenir dans un état constamment gelé et ainsi éviter la génération de DMA.

L'objectif principal du projet est d'évaluer la performance à limiter l'oxydation des résidus miniers sulfureux de deux configurations de recouvrements isolants partiels (0,4 m et 1,2 m) installés sur le parc à résidus de Mine Raglan. Pour ce faire, une approche basée sur la mesure directe de la réactivité des résidus sous les recouvrements isolants partiels avec le test de consommation d'oxygène est utilisée. De plus, la température, la teneur en eau volumique et la succion à la surface des résidus et dans les recouvrements isolants partiels sont mesurés afin d'évaluer l'effet du comportement thermo-hydrique sur la réactivité des résidus miniers pour ce site en particulier.

Une caractérisation des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, hydrogéologiques et thermiques des résidus et du matériel de recouvrement 0-20 mm a été effectuée. Les résultats montrent que les résidus miniers ont des propriétés hydrogéologiques typiques (conductivité hydraulique saturée de l'ordre de $1x10^{-5}$ cm/s et pression d'entrée d'air d'environ 20-30 kPa) et un fort potentiel de génération d'acide puisqu'ils contiennent peu de minéraux ayant un pouvoir neutralisant et des teneurs en pyrrhotite entre 10 et 20%wt. Quant au matériau utilisé comme recouvrement (0-20 mm), il a une conductivité hydraulique saturée de l'ordre de $1x10^{-1}$ cm/s et une pression d'entrée d'air d'environ 1 kPa; ce matériau n'est pas considéré problématique d'un point de vue géochimique. De plus, la courbe de réactivité en fonction du degré de saturation des résidus miniers a été évaluée en laboratoire et la variabilité du test de consommation d'oxygène *in situ* a été évaluée sur le terrain. Des courbes caractéristiques de gel obtenues *in situ* pour les résidus miniers et pour le gravier concordent assez bien avec les courbes de rétention d'eau mesurées en laboratoire pour des valeurs de succion supérieures à $1x10^{3}$ cm. Les courbes de rétention d'eau de terrain concordent bien avec les courbes de laboratoire pour le gravier, mais

sous-estiment la rétention d'eau des résidus miniers par rapport aux courbes obtenues au laboratoire.

Des flux d'oxygène variant entre 0 moles·m^{-2}·an^{-1} et 544 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés pour les stations non couvertes et entre 4 moles·m^{-2}·an^{-1} et 525 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les stations sous les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m. Les résultats de la présente étude montrent que les résidus entreposés dans le parc à résidus miniers de Mine Raglan sont dans des conditions hydrogéologiques favorables à leur oxydation (40% < S_r < 60%). Un effet de la température sur le flux d'oxygène a été observé. Pour le cas de Mine Raglan, il a été montré que la loi d'Arrhénius représente assez bien l'effet de la température sur la réactivité. Également, on observe que l'oxydation des sulfures est diminuée de façon considérable à des températures entre -2°C et -6°C; on peut donc considérer cet intervalle de température comme un objectif à atteindre si l'on veut contrôler l'oxydation des minéraux sulfureux de Mine Raglan. Les travaux réalisés ont également montré que la réactivité varie de façon importante selon l'emplacement et la période de l'année dans le parc à résidus miniers.

Les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m sont la majorité du temps non saturés (S_r < 40%) et la température maximale des résidus (à 5 cm sous la surface) est de 7°C, de 1,4°C et de 25,2°C pour les résidus sous les recouvrements isolants partiels de 0,4 m, de 1,2 m et pour les résidus non couverts respectivement. L'efficacité de ces recouvrements à contrôler l'oxydation des résidus miniers a été évaluée avec la méthode par profil de température et avec la méthode par tests de consommation d'oxygène. Les recouvrements isolants partiels ne permettent pas de réduire la période d'oxydation de façon significative. Ils permettent par contre de réduire la durée des périodes où les résidus sont très réactifs. L'efficacité des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m à contrôler l'oxydation des minéraux sulfureux est de 52 ± 18% et de 65 ± 25% respectivement basé sur le flux d'oxygène moyen annuel avec ou sans recouvrement. De plus, l'étude a montré que l'efficacité des recouvrements isolants partiels varie de façon significative selon la période de l'année. Ils ont un effet bénéfique la majorité du temps, à l'exception d'une période entre la fin septembre et la mi-décembre 2011 pour le couvert de 1,2 m et de fin septembre 2011 à fin octobre 2011.

Les résultats de cette étude sont intéressants pour la gestion du plan de recouvrement progressif ainsi que pour la compréhension de l'efficacité du recouvrement final de Mine Raglan. Pour

l'évaluation de la performance du scénario de restauration final, on suggère l'étude de la réactivité des résidus miniers en laboratoire dans des conditions contrôlées pour l'identification plus précise d'une température où l'oxydation des résidus est nulle. Il sera ensuite crucial de relier les flux d'oxygène à la qualité d'eau de l'effluent puisque c'est sur cette dernière que l'on évaluera la performance du scénario de restauration choisi. Une modélisation thermo-hydro-géochimique permettrait également de mieux comprendre le comportement à moyen et long terme du parc à résidus miniers de Mine Raglan et d'inclure les scénarios de changements climatiques.

ABSTRACT

An important challenge for the mining industry is the reclamation of tailings storage area, especially when tailings can generate acid mine drainage (called AMD). AMD is caused by the reaction of sulfide minerals in tailings exposed to air and water. Integrating tailings within the permafrost by the use of an insulation cover is a reclaiming method designed and used especially for Nordic conditions.

The main objective of this project is to evaluate the performance of partial insulation covers (0.4 m and 1.2 m thick) built on the Raglan Mine tailings storage facility. The method used to assess the performance of the partial insulation covers includes oxygen consumption tests (OC tests) for measuring tailings reactivity under the partial insulation covers. Moreover, temperature, volumetric water content and suction measurements at various depths in the cover material and in sulfide tailings allow to study the effect of the partial covers' hydro-thermal behavior on tailings reactivity for this particularly site.

Cover and tailings materials were characterized for their mineralogical, physical, hydrogeological and thermal properties. Results show that the tailings hydrogeological properties are typical for that kind of material (saturated hydraulic conductivity around $1x10^{-5}$ cm/s and air entry value around 20-30 kPa). Tailings have a good potential for acid generation with their high sulfide content (10 to 20% wt) and low neutralization potential. Tailings reactivity at different degrees of saturation was evaluated in laboratory, and oxygen consumption test variability was assessed *in situ* in the Raglan Mine tailings storage facility. Cover material (0-20 mm) has a saturated hydraulic conductivity near $1x10^{-1}$ cm/s and an air entry value around 1 kPa; its geochemical behavior is not considered problematic. *In situ* characteristic soil freezing curves for tailings and cover material agree well with water retention curves obtain in laboratory for suction greater than $1x10^{3}$ cm. *In situ* water retention curves agree well with the laboratory water retention curve for cover material but underestimate water retention for tailings.

Oxygen fluxes between 0 moles·m^{-2}·an^{-1} and 544 moles·m^{-2}·an^{-1} were measured for non-covered tailings and between 4 moles·m^{-2}·an^{-1} and 525 moles·m^{-2}·an^{-1} for tailings with 0.4 m and 1.2 m partial insulation covers. Results of the study show that tailings hydrogeological conditions in the tailings storage facility are favorable for their oxidation (40%< S_r < 60%). Effect of temperature on tailings reactivity had previously been observed and this effect is well described with the

Arrhenius law for the Raglan Mine case. Tailings reactivity is considerably decreased for temperature between -2°C and -6°C; this temperature interval can be considered as an objective for controlling mineral oxidation of Raglan Mine tailings. Tailings reactivity will vary according to the emplacement in tailings stack and the period of the year.

Partial insulation covers (0.4 m and 1,2 m) are unsaturated for most of the time ($S_r < 40\%$) and maximal tailings temperature (5 cm under surface) is 7°C, 1.4°C, and 25.2°C for tailings covered with 0.4 m, 1.2 m, and non-covered tailings. The partial insulation covers performance for the control of tailings oxidation was assessed with the temperature profile and oxygen consumption test methods. Partial insulation covers do not affect the oxidation period length, but reduce the period where tailings are highly reactive. Performance of 0.4 m and 1.2 m partial insulation covers is 52 ± 18% and 65 ± 25% respectively, based on the mean annual oxygen flux with and without cover. The study has shown that the efficiency of partial insulation covers to control tailings oxidation varies according to the period of the year. They have a beneficial effect most of the year, except for the period between from the end of September 2011 and mid-December 2011, and from the end of September 2011 to the end of October 2011 for the 1.2 m and 0.4 m respectively.

The results of this study are interesting for the management of the progressive reclamation plan, and for the understanding of the efficiency of the proposed final insulation cover for the Raglan Mine tailings storage facility. For the performance evaluation of the final cover scenario, a laboratory study of the tailings reactivity in controlled conditions should be undertaken to identify the temperature at which tailings oxidation is stopped. Furthermore, the performance of reclamation scenario is evaluated on the effluent water quality; the next challenge will be to relate the oxygen flux with the water quality effluent. A thermo-hydro-geochemical modelling would allow the understanding of the mid-long term behavior of Raglan Mine tailings stack and to include the climate change scenarios in the cover performance evaluation.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE……. III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ……. V

ABSTRACT…... VIII

TABLE DES MATIÈRES X

LISTE DES TABLEAUX XV

LISTE DES FIGURES XVIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXV

LISTE DES ANNEXES XXIX

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Problématique environnementale reliée à la restauration des parcs à résidus miniers 1

1.2 Drainage minier acide (DMA) 2

1.3 Techniques de restauration des parcs à résidus miniers générateurs de DMA en climat tempéré 4

1.3.1 Barrière à l'oxygène 4

1.3.2 Barrière à l'infiltration d'eau 5

1.4 Restauration de sites miniers en environnement nordique 5

1.5 Contexte et objectif du projet de recherche 7

1.6 Contenu et contributions scientifiques du mémoire 8

CHAPITRE 2 LITTÉRATURE PERTINENTE À L'ÉTUDE 11

2.1 Description du concept du recouvrement isolant 11

2.2 Facteurs influençant la performance d'un recouvrement isolant 15

2.2.1 Réactivité des résidus miniers 16

2.2.2 Degré de saturation 17

2.2.3 Température 19

2.2.4 Ajout du recouvrement isolant 23

2.3 Comportement thermique et hydrique du sol en période de gel et de dégel 24

2.3.1 Structure d'un sol gelé 24

2.3.2 Processus liés au gel-dégel 25

2.4 Lois de comportement thermo-hydrique 26

2.4.1 Propriétés des matériaux 27

2.4.2 Équations d'écoulement d'eau 31

2.4.3 Équations de transfert de chaleur 33

2.4.4 Équation couplée d'écoulement d'eau et de transfert de chaleur 34

2.5 Méthodes d'évaluation de la performance de recouvrement isolant 35

2.5.1 Méthode par profil de température 36

2.5.2 Méthode par tests de consommation d'oxygène 42

2.6 Besoin en recherche sur le comportement des résidus miniers en climat nordique et sur les recouvrements isolants 47

CHAPITRE 3 SITE À L'ÉTUDE, DESCRIPTION DU DESIGN ET CONSTRUCTION DES STATIONS DE MESURE 49

3.1 Mise en contexte 49

3.2 Description du site 49

3.2.1 Géologie et minéralogie 51

3.2.2 Description du parc à résidus 52

3.3 Restauration du parc à résidus de Mine Raglan 54

3.4 Localisation des stations de mesure 56

3.5 Description des différents tests de consommation d'oxygène 58

3.5.1 Montage du test de consommation d'oxygène de base 58

3.5.2 Test de consommation d'oxygène sous recouvrement isolant partiel (1,2 m) 60

3.5.3 Test de consommation d'oxygène modifié (0,4 m) 61

3.6 Instrumentation des stations 62

3.6.1 Information supplémentaire sur les instruments sélectionnés 65

3.6.2 Facteurs influençant la lecture de l'instrumentation 67

3.6.3 Calibration de la sonde de teneur en eau volumique 69

3.7 Construction des stations de mesure 70

3.7.1 Stations non recouvertes 71

3.7.2 Stations recouvertes (1,2 m) 73

3.7.3 Stations recouvertes (0,4 m) 80

3.7.4 Caractéristiques générales des stations 82

CHAPITRE 4 MATÉRIAUX, MÉTHODES ET RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION 84

4.1 Méthodes de caractérisation des propriétés des matériaux 84

4.1.1 Caractérisation physique 84

4.1.2 Caractérisation minéralogique et chimique 85

4.1.3 Caractérisation hydrogéologique 87

4.1.4 Caractérisation thermique 89

4.1.5 Détermination de la réactivité des résidus miniers 92

4.2 Résultats de la caractérisation des matériaux 93

4.2.1 Résultats de la caractérisation physique 93

4.2.2 Résultats de la caractérisation minéralogique et chimique 96

4.2.3 Résultats de la caractérisation hydrogéologique 100

4.2.4 Résultats de la caractérisation thermique 103

4.2.5 Courbe de réactivité des résidus miniers 109

4.3 Variabilité du test de CO 110

CHAPITRE 5 RÉACTIVITÉ DES RÉSIDUS MINIERS DE MINE RAGLAN 112

5.1 Présentation des résultats par station 112

5.1.1 Généralités 112

5.1.2 Station S1 (non recouverte) 115

5.1.3 Station S2 (non recouverte) 117

5.1.4 Station S3 (non recouverte) 119

5.1.5 Station S4 (recouvert de 1,2 m) 121

5.1.6 Station S5 (recouvert de 1,2 m) 123

5.1.7 Station S6 (recouvert de 1,2 m) 125

5.1.8 Station S7 (recouvert de 0,4 m) 127

5.2 Interprétation des résultats du test de consommation d'oxygène 128

5.3 Interprétation des résultats de la teneur en eau volumique non gelée dans les résidus 130

5.4 Effet de la température sur la réactivité 133

5.4.1 Application de la loi d'Arrhénius 134

5.4.2 Identification de la température cible 136

5.5 Variation spatiale des mesures *in situ* 138

5.6 Sommaire 141

CHAPITRE 6 INFLUENCE DES RECOUVREMENTS SUR LA RÉACTIVITÉ DES RÉSIDUS MINIERS DE MINE RAGLAN 144

6.1 Comportement thermo-hydrique des recouvrements 144

6.1.1 Profil de température dans les recouvrements isolants partiels 144

6.1.2 Profil de teneur en eau volumique dans les recouvrements isolants partiels 148

6.2 Propriété *in situ* des matériaux 150

6.2.1 Courbe de gel 150

6.2.2 Comparaison des courbes de rétention d'eau *in situ* et en laboratoire 152

6.3 Efficacité des recouvrements isolants partiels 157

6.3.1 Méthode par profil de température 157

6.3.2 Méthode par tests de consommation d'oxygène 159

6.4 Recouvrement final 163

6.5 Dernières remarques 167

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 168

7.1 Conclusions 168

7.2 Recommandations 171

RÉFÉRENCES… 175

ANNEXES……. 184

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Sites miniers utilisant ou considérant l'utilisation d'un recouvrement isolant pour la restauration de leur parc à résidus miniers 15

Tableau 2.2 : Propriétés thermiques des matériaux 27

Tableau 2.3 : Paramètres utilisés pour le calcul de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation (d'après Côté et Konrad, 2005) 29

Tableau 2.4 : Modélisation thermique des différents scénarios de recouvrement du parc à résidus de Mine Raglan, tiré d'Holubec, 2004 41

Tableau 2.5: Résumé des résultats des tests de consommation d'oxygène en conditions climatiques tempérées (adapté de Tibble et Nicholson, 1997) 45

Tableau 2.6 : Tests de consommation d'oxygène sur des résidus miniers en climat nordique 46

Tableau 3.1 : Comparaison entre les différentes techniques utilisées pour la mesure de la teneur en eau volumique (adapté de Maqsoud et al., 2007) 63

Tableau 3.2 : Comparaison entre les différentes techniques utilisées pour la mesure de la succion (adapté de Maqsoud et al., 2007) 64

Tableau 3.3 : Caractéristiques de l'instrumentation choisie pour le projet 67

Tableau 3.4 : Tableau résumé des caractéristiques des stations expérimentales installées sur le PAR de Mine Raglan 83

Tableau 4.1 : principales caractéristiques granulométriques des échantillons analysés 94

Tableau 4.2 : Densité relative des grains des résidus et du gravier 96

Tableau 4.3 : Composition minéralogique des échantillons de gravier 96

Tableau 4.4 : Composition minéralogique des échantillons de résidus miniers 97

Tableau 4.5 : Résultats de l'analyse ICP-AES pour le gravier 98

Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse ICP-AES pour les résidus miniers 98

Tableau 4.7 : Résultats de l'analyse soufre-carbone par la fournaise à induction 99

Tableau 4.8 : Tableau comparatif du S et C selon les calculs minéralogique et les analyses S-C à la fournaise à induction 100

Tableau 4.9 : Résultats de l'essai à charge constante pour le matériel 0-20 mm 100

Tableau 4.10 : Résultats des essais de perméabilité à charge variable et résultat du modèle KCM pour les résidus miniers 101

Tableau 4.11 : Paramètres du modèle de van Genuchten (1980) obtenus avec le code RETC ... 103

Tableau 4.12 : Conductivité thermique non gelée et gelée des résidus miniers à différents degrés de saturation 104

Tableau 4.13 : Calcul de la conductivité thermique des solides des résidus miniers avec la méthode de la moyenne géométrique 105

Tableau 4.14 : Résultats des tests de conductivité thermique non gelée et gelée à différents degré de saturation pour le matériel de recouvrement 0-20 mm. 107

Tableau 4.15 : Calcul de la conductivité thermique des solides du gravier avec la méthode de la moyenne géométrique 107

Tableau 4.16 : Écart des valeurs conductivité thermique de Nixon (2000) par rapport au modèle théorique de conductivité thermique de Côté et Konrad (2005). 109

Tableau 4.17 : Résultats des tests de consommation d'oxygène (moles·m^{-2}·an^{-1}) pour l'étude de variabilité du test de CO dans l'espace et le temps 111

Tableau 5.1 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S1 à différentes périodes de l'année 115

Tableau 5.2 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S2 à différentes périodes de l'année 117

Tableau 5.3 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S3 à différentes périodes de l'année 119

Tableau 5.4 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S4 à différentes périodes de l'année 121

Tableau 5.5 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S5 à différentes périodes de l'année.....123

Tableau 5.6 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S6 à différentes périodes de l'année.....125

Tableau 5.7 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S7 à différentes périodes de l'année.....127

Tableau 6.1 : Évaluation de la performance des recouvrements à limiter l'oxydation des résidus basés sur la durée et l'intensité de la période d'oxydation.....158

Tableau 6.2 : Flux d'oxygène utilisés pour le calcul de la moyenne annuelle.....160

Tableau 6.3 : Efficacité du recouvrement de 0,4 m et 1,2 m à diminuer le flux d'oxygène basée sur la moyenne annuelle selon les différentes stations.....161

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Distribution du pergélisol au Canada (d'après Ressources Naturelles Canada, 2009)12

Figure 2-2: Régime thermique du pergélisol (Robitaille et Allard, 1996) 13

Figure 2-3 : Profil de température dans un parc à résidus miniers avec recouvrement isolant en zone de pergélisol continu (modifié d'Andersland et Ladanyi, 2004) 14

Figure 2-4 : Influence du degré de saturation sur le coefficient D_e (tiré de Gosselin et al., 2007) 18

Figure 2-5 : Influence du degré de saturation sur le coefficient de réactivité K_r (tiré de Gosselin et al., 2007).....19

Figure 2-6 : Oxydation chimique (carrés vides) et biologique (carrés pleins) de résidus miniers et équation d'Arrhénius (ligne pleine) d'après Elberling (2001) 20

Figure 2-7 : Température du sol, température de l'air, mesures de consommation d'oxygène *in situ* et modélisation (tiré d'Elberling, 2001).....22

Figure 2-8 : Comportement général du système recouvrement isolant - résidus miniers 23

Figure 2-9 : Définition des différentes zones d'un sol gelé d'après Miller (1972) et Harlan (1973) 24

Figure 2-10 : Courbe de gel typique d'un sol fin et d'un sol grossier.....26

Figure 2-11 : Profil de température dans le recouvrement isolant et dans les résidus minier (tiré d'Holubec, 2004).....36

Figure 2-12 : Comparaison de différente hauteur de dégagement du réservoir source (1 cm, 2 cm, 5 cm et 10 cm (tiré de Mbonimpa et al., 2011) 43

Figure 2-13 : Ratio FR pour h = 2 cm à différents degrés de saturation pour des tests d'une durée de 1 h et 4 h (tiré de Mbonimpa et al., 2011) 44

Figure 2-14 : Montage du test de consommation d'oxygène de base 45

Figure 2-15 : Montage du test de consommation d'oxygène sous un recouvrement granulaire....47

Figure 3-1 : Localisation du site minier de Xstrata Nickel Mine Raglan (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2011) 50

Figure 3-2 : Différents sites d'exploration et d'exploitation de la mine Raglan à l'hiver 2010 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2010). 52

Figure 3-3 : Photo du PAR de la mine Raglan en 2012 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2012) 53

Figure 3-4 : État de la restauration progressive du PAR en 2010 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2010).....56

Figure 3-5: Localisation des stations de mesure (S1 à S7) sur le parc à résidus de Mine Raglan (Xstrata Nickel Mine Raglan) 57

Figure 3-6 : Schéma du montage du test de consommation d'oxygène de base avec couvercle étanche.....59

Figure 3-7 : Schéma du test de consommation d'oxygène modifié pour installation sous le recouvrement isolant partiel de 1,2 m 60

Figure 3-8 : Schéma du test de consommation d'oxygène modifié pour le recouvrement isolant partiel de 0,4 m.....62

Figure 3-9 : Schéma et images des sondes utilisées dans les stations de mesure : a) Decagon 5TM (tiré de Decagon Devices Inc., 2010); b) Decagon MPS-1 (tiré de Decagon Devices, 2008-2009); c) Apogee SO-110 (tiré de Apogee instruments inc.,) 66

Figure 3-10 : Courbe de calibration de la sonde 5TM à 21°C : a) pour le gravier; b) pour les résidus miniers.....70

Figure 3-11 : Insertion des cylindres à l'aide d'une masse et d'un madrier 71

Figure 3-12 : Emplacement de l'instrumentation sur les résidus non recouverts : a) pour la station S1; b) pour les stations S2 et S3 (T =température, θ = teneur en eau volumique, ψ = succion) 72

Figure 3-13 : Montage sur le terrain des tests de consommation d'oxygène : a) cylindres en triplicata servant au test de consommation d'oxygène; b) lors d'un test, avec les boites isolantes sur les cylindres.....73

Figure 3-14 : a) excavation du recouvrement isolant partiel afin d'atteindre les résidus pour l'installation des stations de mesure; b) présence de glace sous dans le recouvrement empêchant l'excavation.....74

Figure 3-15 : Cylindres avec couvercle, capteur d'oxygène et la bentonite à la base des cylindres 75

Figure 3-16 : Dispositif de protection du senseur : a) raccord se fixant au récipient de protection et tuyaux ABS servant de pilier entre le récipient et le couvercle; b) réduit hexagonal se fixant au récipient de protection et raccord male servant à maintenir le tubage en place.....76

Figure 3-17 : dispositif de protection : a) tous les morceaux assemblés avec le fil du capteur d'oxygène, le fil du capteur d'oxygène de contrôle et les tubulures; b) assemblage final du dispositif de protection 77

Figure 3-18 : Installation d'un capteur 5TM dans le recouvrement granulaire 77

Figure 3-19 : Emplacement de l'instrumentation dans le recouvrement de 1,2 m : a) station S4; b) station S5; c) station S6.....78

Figure 3-20 : Remblayage de l'excavation à l'aide de la pelle mécanique 79

Figure 3-21 : Station S5 sur le recouvrement isolant partiel de 1,2 m: a) installation finale avec les différentes tubages de protection; b) capteur d'oxygène protégés par le tubage fixé à côté du système d'acquisition de données Em50.....79

Figure 3-22 : Cylindre servant au test du CO_M dans le recouvrement de 0,4 m 81

Figure 3-23 : Emplacement de l'instrumentation à la station S7 dans le recouvrement de 0,4 m .81

Figure 3-24 : a) remblayage de la station S7; b) Allure finale de la station S7 en surface du recouvrement.....82

Figure 4-1: Montage de l'essai à la cellule de pression pour déterminer la CRE des résidus miniers.....88

Figure 4-2 : Colonne instrumentée utilisée pour déterminer la CRE du gravier en laboratoire 89

Figure 4-3 : Sonde à aiguille TP08 utilisé pour la mesure de la conductivité thermique des résidus (tiré d'Hukseflux Thermal Sensor) 90

Figure 4-4 : Montage du fluxmètre tel que présenté dans les travaux de Côté et Konrad (2005b)91

Figure 4-5 : Montage utilisé pour mesurer la réactivité des résidus miniers en laboratoire 93

Figure 4-6 : Distribution granulométrique des échantillons de gravier (C-S4 à C-S7) et de résidus miniers (T-S1 à T-S7); les objectifs granulométriques du concepteur du recouvrement sont également indiqués dans la figure 95

Figure 4-7 : Courbe de rétention d'eau du gravier 0-20 mm obtenue en laboratoire et lissée avec le modèle de Van Genutchen et CRE 102

Figure 4-8 : Courbe de rétention d'eau des résidus pour les essais à la cellule à pression en laboratoire et courbe lissées selon le modèle de van Genutchen. 103

Figure 4-9 : Conductivité thermique gelée (λ_f) et non gelée (λ_u) des résidus miniers en fonction du degré de saturation et prédictions avec le modèle de Côté et Konrad (2005) 106

Figure 4-10 : Conductivité thermique gelée (λ_f) et non gelée (λ_u) du matériel de recouvrement 0-20 mm en fonction du degré de saturation et prédictions avec le modèle de Côté et Konrad (2005) 108

Figure 4-11 : Essai de consommation d'oxygène sur les résidus selon le degré de saturation à 21°C 109

Figure 4-12 : Montage expérimental pour l'évaluation de la variabilité du test de CO 110

Figure 5-1: Données de la station météorologique localisé à Mine 2 (données de Mine Raglan) : a) température ; b) précipitation à la station météo de Mine Raglan 113

Figure 5-2: Localisation des stations non recouvertes (S1 à S3), avec recouvrement de 1,2 m (S5 à S6), avec recouvrement de 0,4 m (S7) et de la cellule expérimentale (S8) sur le PAR de Mine Raglan 114

Figure 5-3: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S1 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 115

Figure 5-4: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S2 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 117

Figure 5-5: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S3 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 119

Figure 5-6: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S4 couverte d'un recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 121

Figure 5-7: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S5 recouverte d'un recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 123

Figure 5-8: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S6 avec recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 125

Figure 5-9: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S7 avec recouvrement de 0,4 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion 127

Figure 5-10: Flux d'oxygène moyen par station pour la période de juillet 2011 à juillet 2012 : a) stations non recouvertes; b) stations avec recouvrement de 0,4 m et 1,2 m de gravier 0-20 mm.....129

Figure 5-11 : Teneur en eau volumique non gelée mesurée dans les résidus à 5 cm de profondeur ; a) station non couvertes S1 à S3 ; b) stations couvertes S4 à S7 130

Figure 5-12 : Flux d'oxygène moyen mesurés par station selon la teneur en eau volumique non gelée 132

Figure 5-13 : Effet de la température des résidus à 5 cm de profondeur sur le flux d'oxygène pour toutes les stations (excluant S4) 133

Figure 5-14 : Effet de la température sur le flux d'oxygène des résidus et prédictions avec l'équation d'Arrhénius 134

Figure 5-15 : Réactivité des résidus miniers selon la teneur en eau volumique non gelée mesurée sur le terrain, en laboratoire à 20°C et prédites à 12°C avec Arrhénius.....136

Figure 5-16 : Effet de la température des résidus à 5 cm de profondeur sur le flux d'oxygène moyen 137

Figure 5-17 : Effet de la localisation sur la réactivité des résidus; a) non couverts ; b) couverts 138

Figure 5-18 : Comparaison du comportement thermique (i) et hydrique (ii) par station : a) stations non couvertes, b) stations couvertes (1,2 m) 139

Figure 5-19 : Relation entre la teneur en pyrrhotite et le flux d'oxygène moyen annuel mesuré aux stations couvertes (0,4 m et 1,2 m) et non couvertes.....140

Figure 6-1: Profils de température dans les recouvrements isolants partiels (avec les températures cibles de -2 et -6°C identifiées en pointillé) : a) station S4 (1,2 m) ; b) station S5 (1,2 m) ; c) station S6 (1,2 m) ; d) station S7 (0,4 m) 145

Figure 6-2 : Distribution de température dans les résidus à une profondeur de 5 cm sous la surface des résidus (avec les températures cibles de -2 et -6°C identifiées en pointillé) : a) stations non recouvertes ; b) stations avec recouvrement (0,4 m et 1,2 m) 147

Figure 6-3 : Profil de la teneur en eau volumique non gelée dans les recouvrements isolants partiels : a) station S4 (1,2 m) ; b) station S5 (1,2 m) ; c) station S6 (1,2 m) ; d) station S7 (0,4 m) 149

Figure 6-4 : Courbes de gel des résidus : a) résidus non couverts aux stations S1 à S3 ; b) résidus couverts de 1,2 m (S4 à S6) et de 0,4 m (S7) 150

Figure 6-5 : Courbe de gel des résidus à la station S2 à des profondeurs de -5, -15 et -25 cm sous la surface des résidus.....151

Figure 6-6 : Courbes de gel typiques du gravier (station S5 à 30 cm, 60 cm et 110 cm de hauteur dans le recouvrement au-dessus des résidus miniers et station S4 à 110 cm au-dessus des résidus miniers) 152

Figure 6-7 : Courbes caractéristiques de gel pour les résidus comparées à la CRE obtenue au laboratoire lissée avec le modèle de VG et avec le modèle de MK; a) non couverts ; b) couverts (0,4 m et 1,2 m).....153

Figure 6-8 : Courbe caractéristique de gel et courbe de rétention d'eau mesurés en laboratoire pour le gravier 0-20 mm : a) station S4 ; b) station S5 154

Figure 6-9 : Courbe de rétention d'eau de terrain pour le gravier aux stations S4 à S7 et courbe de laboratoire (VG) 155

Figure 6-10 : Courbes de rétention d'eau de terrain pour les résidus miniers aux stations S1 à S3 et courbes prédites par MK et MK_h (β_d = 60° et β_d = 80°) 156

Figure 6-11 : Efficacité du recouvrement de 1,2 m à différente période de l'année ; a) comparaison entre station S1 et S5 ; b) comparaison entre station S2 et S6.....162

Figure 6-12 : Efficacité du recouvrement de 0,4 m à différente période de l'année ; a) comparaison entre station S3 et S7 ; b) comparaison entre station S2 et S7.....163

Figure 6-13 : Section longitudinale de la parcelle expérimentale construite sur le parc à résidus de Mine Raglan (communication personnelle, Mine Raglan) 164

Figure 6-14 : Instrumentation de la parcelle expérimentale construite sur le parc à résidus de Mine Raglan (communication personnelle, Mine Raglan) 165

Figure 6-15 : Évolution de la température dans les résidus à 5 cm de profondeur pour le recouvrement de 0,4 m, de 1,2 m et de 2,4 m 165

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire [L^2]
c	Chaleur spécifique (J/g°C)
C	Concentration en oxygène [M/L^3]
C_a	Concentration en oxygène dans l'air [M/L^3]
C_0	Concentration en oxygène au temps initial [M/L^3]
CO	Consommation d'oxygène
CO_M	Test de CO modifié
C_p	Teneur relative en sulfure (%)
C_U	Coefficient d'uniformité [-]
C_w	Concentration en oxygène dans l'eau [M/L^3]
CRE	Courbe de rétention d'eau
D_a^0	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air [L^2/T]
D_w^0	Coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau [L^2/T]
D_e	Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène [L^2/T]
D_v	Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air
D_{10}	Diamètre des particules correspondant au 10% passant [L]
D_{60}	Diamètre des particules correspondant au 60% passant [L]
D_H	Diamètre équivalent des grains [L]
E_a	Énergie d'activation (kJ/mol)
FD	*Frequency domain*
F_L	Flux d'oxygène (mole $L^{-2}T^{-1}$)
H	Constante de Henry [-]
h	Hauteur de dégagement pour le test de consommation d'oxygène [L]

h_{CO}	Remonté capillaire équivalente
h_r	Humidité relative
K_{air}	Permittivité de l'air (1)
K_{eau}	Permittivité de l'eau (80,18)
K_{sol}	Permittivité du sol ($2 < K_{sol} < 5$)
K_1	Taux de réaction pour une température T_1
K_2	Taux de réaction pour une température T_2
K'	Réactivité de la pyrite avec l'oxygène [$L^3/L^2/T$]
K_r	Coefficient de réactivité des résidus [T^{-1}]
K_w	Conductivité hydraulique [L/T]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [L/T]
L_v	Chaleur latente de vaporisation (2 375 kJ/kg)
L_f	Chaleur latente de fusion (333,7 kJ/kg)
MAAT	Température moyenne annuelle de l'air
m_2^w	Pente de la courbe de rétention d'eau (1/kPa)
m^i_2	Pente de la courbe de gel du sol (1/T)
n	Porosité [-]
p_a	Tortuosité dans la phase gazeuse [-]
PAR	Parc à résidus miniers
p_w	Tortuosité dans la phase aqueuse [-]
P_v	Pression partielle due à la vapeur d'eau (kPa)
q	Flux de chaleur
q_v	Taux de transfert de vapeur d'eau dans le sol
q_w	Débit spécifique [L/T]

Q_{10}	Coefficient de température (-)
R	Constante des gaz parfait (8,314 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)
R^2	Coefficient de détermination (-)
SFCC	Courbe caractéristique de gel
S_r	Degré de saturation [%]
t	Temps [T]
T	Température (°C)
TDR	*Time domain reflectometry*
T_m	Température moyenne du sol en surface (°C)
T_{max}	Température maximale du sol en surface (°C)
T_{min}	Température minimale du sol en surface (°C)
T_s	Température moyenne annuelle du sol à la profondeur d'amplitude annuelle nulle (°C)
V	Volume [L^3]
x	Proportion volumique [-]
z	Profondeur (L)
α	Diffusivité thermique [L^2/T]
λ	Conductivité thermique (W/m°C)
λ_d	Conductivité thermique sèche (W/m°C)
λ_m	Conductivité thermique d'un minéral (W/m°C)
λ_{sat}	Conductivité thermique saturée (W/m°C)
λ_r	Conductivité thermique normalisée (W/m°C)
λ_s	Conductivité thermique des solides (W/m°C)
ψ	Succion (kPa)

θ_a	Teneur en air volumique [-]
θ_i	Teneur en glace volumique [-]
θ_u	Teneur en eau volumique non gelée [-]
θ_w	Teneur en eau volumique totale [-]
γ_w	Poids volumique de l'eau
Ω	Facteur de tortuosité
ρ_v	Masse volumique de la vapeur d'eau [M/L^3]
ρ_w	Masse volumique de l'eau [M/L^3]
ρ_i	Masse volumique de la glace [M/L^3]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Interprétation des tests de consommation d'oxygène

A.1 Stations non-couvertes (S1 à S3) et stations couvertes de 1,2 m (S4 à S6) et de 0,4 m (S7)……...184

A.2 Variabilité sur le terrain……...……..216

A.3 Réactivité selon le degré de saturation en laboratoire……...221

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique environnementale reliée à la restauration des parcs à résidus miniers

L'exploitation minière génère une quantité importante de rejets. Parmi les différents types de rejets solides produits, on retrouve les rejets de concentrateur. Ces rejets consistent en des particules de roche finement broyée dont les valeurs commerciales ont été extraites à l'usine de concentration du minerai. Ils sont habituellement déposés dans des aires d'entreposage prévues à cet effet, nommées parcs à résidus miniers. La méthode conventionnelle de stockage des résidus est la déposition des rejets sous forme de pulpe, entre 25% et 45% solides, dans un parc à résidus ceinturé de digues et de la topographie naturelle, qui retiennent le matériel et les eaux minières (Aubertin et al. 2002). Cependant, des problèmes de stabilité physique et chimique sont fréquemment observés avec ce mode de stockage (Martin et al., 2005; Bussière, 2007). Afin d'améliorer la stabilité hydrogéotechnique des résidus, une nouvelle approche a été développée au cours des dernières années, qui consiste à densifier les rejets (résidus épaissis, en pâtes ou filtrés) avant leur déposition. D'autres méthodes développées récemment telles que la désulfuration environnementale (e.g. Benzaazoua et al., 2000; Derycke, 2012), l'utilisation de rejets de concentrateur dans les recouvrements (e.g. Bussière et al., 2004), le remblayage sous-terrain (e.g. Benzaazoua et al., 1999; Benzaazoua et al., 2002) et la co-disposition avec les stériles miniers (e.g. Aubertin et al., 2011) sont considérées comme des alternatives intéressantes (totales ou partielles) aux méthodes de gestion des résidus conventionnelles afin de réduire les risques environnementaux (autant géotechniques que géochimiques) liés aux parcs à résidus miniers.

Un défi environnemental important de l'industrie minière est la restauration des parcs à résidus miniers, que ces derniers soient conçus avec le mode traditionnel ou avec les nouvelles approches. Depuis 1995, la Loi sur les mines oblige les entreprises minières à déposer un plan de restauration des sites miniers actifs. La restauration vise à remettre le site dans un état satisfaisant, selon un guide de restauration qui précise les exigences gouvernementales (Gouvernement du Québec, 1997). Pour que l'état du site soit considéré satisfaisant il faut :

- éliminer les risques inacceptables pour la santé et assurer la sécurité des personnes;

- limiter la production et la propagation de substances susceptibles de porter atteinte au milieu récepteur et, à long terme, viser à éliminer toute forme d'entretien et de suivi;
- remettre le site dans un état visuellement acceptable pour la collectivité;
- remettre le site des infrastructures (en excluant les aires d'accumulation) dans un état compatible avec l'usage futur.

Au niveau des parcs à résidus miniers, le guide spécifie que la restauration doit permettre le contrôle de la production de tous les types de contaminants, incluant la génération du drainage minier acide (DMA); le traitement chimique des eaux après la fermeture est considéré comme une méthode palliative qui n'est pas de la restauration au sens du document.

1.2 Drainage minier acide (DMA)

Le DMA est le principal souci environnemental lorsque l'on doit restaurer un parc à résidus miniers contenant des résidus miniers sulfureux. Il est causé par l'oxydation naturelle de minéraux sulfureux présents dans les résidus miniers qui s'oxydent au contact de l'oxygène de l'air et de l'eau. Les eaux de drainage acide sont caractérisées par un faible pH, des concentrations en métaux lourds et en sulfates solubles élevées ainsi qu'une grande concentration en solides dissous (Aubertin et al., 2002). La réaction globale à la base du DMA, pour la pyrite (FeS_2), est présentée à l'équation 1.1.

$$FeS_2+\frac{15}{4}O_2+\frac{7}{2}H_2O\rightarrow Fe(OH)_3+2H_2SO_4 \qquad [1.1]$$

Les principales équations en lien avec la génération de DMA sont présentées aux équations 1.2 à 1.5. L'oxydation de la pyrite peut être directe par l'oxygène de l'air et l'eau ou indirecte par le fer ferrique. L'équation 1.2 décrit l'oxydation directe des sulfures (la pyrite est prise ici à titre d'exemple). L'équation indirecte, présentée à l'équation 1.5, se produit seulement lorsque le pH est inférieur à environ 3. Les équations 1.3 et 1.4 sont des réactions intermédiaires qui conduisent à l'oxydation indirecte des sulfures.

$$FeS_2+\frac{7}{2}O_2+H_2O\rightarrow Fe^{2+}+2SO_4^{2-}+2H^+ \qquad [1.2]$$

$$Fe^{2+}+\frac{1}{4}O_2+H^+\rightarrow Fe^{3+}+\frac{1}{2}H_2O \qquad [1.3]$$

$$Fe^{3+}+3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3+3H^+ \quad [1.4]$$

$$FeS_2+14Fe^{3+}+8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+}+2SO_4^{2-}+16H^+ \quad [1.5]$$

L'oxydation directe et indirecte peut être catalysée par diverses bactéries, telle que la bactérie *thiobacillus ferrooxidans*. L'action des bactéries est plus marquée à des pH plus bas, soit inférieure à 3,5. Une fois que le milieu s'est acidifié, le fer ferreux se transforme en fer ferrique qui reste en solution sous un pH de 3,5 et qui permet l'oxydation indirecte. À ce stage, des bactéries acidophiles catalysent notamment l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique qui se traduit par une augmentation de plusieurs ordres de grandeur du taux d'acidification général. Dans la littérature, on parle d'une accélération de la réaction par un facteur de 10^3 à 10^6 (Singer et Stumm, 1970; Nordstrom, 2000). Des minéraux possédant un pouvoir neutralisant grâce à leur capacité à réagir avec l'acide peuvent parfois neutraliser l'acide produit par l'oxydation des sulfures. Les minéraux carbonatés, tels que la calcite et la dolomite, ont le plus grand potentiel de neutralisation (Kwong, 1993).

En terminant cette brève description des phénomènes menant à la formation de DMA, il est important de mentionner que d'autres réactions chimiques (autres que l'oxydation et la neutralisation) sont susceptibles de se produire dans les rejets miniers et que ces dernières vont modifier le comportement géochimique du système. En effet, lorsque les concentrations en ions dissous, générés par les réactions d'oxydation et de neutralisation, arrivent à saturation ou sursaturation, il y a précipitation de minéraux secondaires. Ces précipitations vont affecter la qualité de l'eau (en réduisant ou en augmentant les concentrations de certains éléments) et peuvent également affecter les propriétés des rejets (baisse de la porosité, par exemple). L'accumulation des minéraux secondaires peut conduire à la formation d'un horizon induré (*hard pan*), qui forme localement une interface moins perméable entre la zone de résidus oxydés et les résidus frais (Aubertin et al., 2002). La compréhension des processus géochimiques, prenant place dans la formation des minéraux secondaires, est primordiale si on veut pouvoir prédire l'évolution du DMA dans le contexte d'un site minier.

En résumé, la composition géochimique finale des eaux de drainage d'un site minier est influencée par une pléthore de réactions biologiques et chimiques qui elles-mêmes peuvent être influencées par l'environnement où se retrouvent les résidus (ex. saturation des résidus, température, etc.). L'effet de la température sur les taux des réactions d'oxydation des sulfures et

sur les processus de neutralisation ont été documentés dans quelques études (Godwaldt et al., 1999; Elberling, 2001; Ethier, 2011). Plus de détails sur la formation, prédiction et traitement du DMA sont disponibles entres autres dans Aubertin et al. (2002).

1.3 Techniques de restauration des parcs à résidus miniers générateurs de DMA en climat tempéré

Lorsqu'un résidu minier est réputé générateur d'acide, il est important de prendre les mesures nécessaires pour contrôler la contamination par le DMA. Différents types de recouvrement existent pour limiter ou contrôler la formation du DMA provenant des parcs à résidus miniers. Dans les climats tempérés, les techniques les plus efficaces sont conçues de façon à couper soit l'oxygène ou l'eau, qui sont des réactifs nécessaires à la formation de DMA.

1.3.1 Barrière à l'oxygène

Pour contrôler l'apport en oxygène, on peut installer des recouvrements ayant une perméabilité au gaz extrêmement faible ou encore un recouvrement qui consomme l'oxygène; on appelle ces méthodes les barrières à l'oxygène. L'eau, les sols, les matériaux synthétiques et des combinaisons de ces matériaux peuvent être utilisés pour créer un recouvrement à faible perméabilité au gaz, alors que les matériaux organiques sont généralement utilisés comme composante des recouvrements à consommation d'oxygène. De façon plus spécifique, les techniques les plus courantes pouvant être utilisées pour contrôler les flux d'oxygène sont le recouvrement en eau, les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) et le recouvrement monocouche avec nappe surélevée.

Le recouvrement en eau consiste à ennoyer les résidus de façon à empêcher la migration de l'oxygène vers ces derniers en profitant du fait que la diffusion de l'oxygène à travers l'eau est faible (10 000 fois plus faible que dans l'air). Même si l'eau contient de l'oxygène dissout, les flux sont habituellement suffisamment faibles pour ne pas générer de l'acidité de façon importante. Cependant, d'autres phénomènes tels que la remise en suspension et l'infiltration à travers des rejets peuvent réduire leur performance. Une revue de littérature sur ce type de recouvrement a été réalisée récemment dans la thèse d'Awoh (2012).

Le recouvrement monocouche avec nappe surélevée vise à maintenir un degré de saturation (S_r ; correspond au pourcentage des vides d'un milieu poreux occupé par l'eau) élevé dans les résidus, donc à réduire la concentration d'oxygène disponible dans les résidus sulfureux. Pour être efficace, cette technique exige que le niveau phréatique soit relativement près de la surface des résidus afin que ceux-ci se maintiennent près de la saturation par capillarité. Le recouvrement monocouche sur le dessus vise essentiellement à réduire la perte d'eau par évaporation. Plus d'informations sur cette technique peuvent être trouvées dans Ouangrawa (2007).

Enfin, la couverture à effet de barrière capillaire (CBEC) utilise les effets de barrière capillaire pour maintenir une des couches du recouvrement (appelée couche de rétention d'eau) près de la saturation. En ayant un degré de saturation élevée, cette couche contrôle les flux d'oxygène à travers le recouvrement puisque la diffusion de l'oxygène à travers un milieu poreux quasi-saturé est plus faible que celle à travers l'eau stagnante (Mbonimpa et al., 2003). L'avantage de cette technique est qu'elle peut être efficace même si le niveau phréatique est loin (quelques mètres) de l'interface. Plus d'informations sur cette technique peuvent être trouvées dans Bussière (1999).

1.3.2 Barrière à l'infiltration d'eau

L'eau est un des réactifs essentiels à la formation de DMA. En excluant l'apport en eau aux résidus miniers sulfureux, on peut réduire ou même éliminer la production de DMA. Pour ce faire, on doit aménager des barrières peu perméables, qui empêchent l'infiltration des eaux de surface et souterraines. Ces barrières peuvent être faites de sols à faibles conductivités hydrauliques saturées (ex. argiles compactées) ou de matériaux synthétiques peu perméables (géomembrane ou géocomposite bentonitique). Les recouvrements visant à réduire l'infiltration dans les aires d'accumulation de rejets miniers générateurs de DMA sont du même type que ceux développés pour les sites d'enfouissement de déchets domestiques, dangereux ou nucléaires (voir Aubertin et al., 1995 pour plus de détails).

1.4 Restauration de sites miniers en environnement nordique

En environnement nordique, la restauration de sites miniers est complexe et soumis à divers défis tels que la présence de pergélisol, les conditions climatiques difficiles, l'éloignement causant une logistique plus compliquée et les changements climatiques (Bussière et Hayley, 2010). Des contraintes supplémentaires s'ajoutent lors de la mise en place du mode de restauration telles

qu'une période estivale plus courte, l'accessibilité aux matériaux de recouvrement, l'effet des cycles de gel et de dégel sur les propriétés des matériaux de recouvrement, pour n'en nommer que quelques-unes (O'Kane Consultants Inc., 2012). Les méthodes considérées pour la restauration de parc à résidus miniers potentiellement générateurs de DMA en environnement nordique sont le recouvrement en eau, le recouvrement fait de matériaux peu perméables ou synthétiques, le recouvrement multicouche, le recouvrement saturé et le recouvrement isolant (Rykaart et Hockley, 2009; O'Kane Consultants Inc., 2012).

Le recouvrement isolant est une méthode spécialement conçue pour les conditions nordiques. Cette méthode vise à intégrer les résidus miniers dans le pergélisol afin de les maintenir dans un état constamment gelé. À faible température, les cinétiques de réactions géochimiques et biochimiques à la base du DMA sont presque nulles. Également, le gel peut restreindre la migration des polluants dans l'environnement (Holubec, 1993; Dawson et Morin, 1996). Pour empêcher le dégel des résidus, une couche de matériel non réactif est posée à la surface des résidus miniers, ce qui permet l'isolation des résidus du réchauffement de surface saisonnier. La performance d'un recouvrement isolant à contrôler le DMA va dépendre de plusieurs facteurs tels que le degré de saturation des résidus et du recouvrement (diffusion de l'oxygène) et la température des résidus (cinétiques de réaction varient selon la température). Ainsi, les comportements thermiques et hydrogéologiques des résidus jouent un rôle important sur le contrôle de leur réactivité et sur la performance du recouvrement. Le comportement thermo-hydrique est contrôlé en partie par les conditions climatiques ambiantes. De plus, l'ajout du recouvrement isolant modifie l'état thermique et hydrogéologique des résidus en modifiant les transferts d'eau et de chaleur. Les propriétés des matériaux utilisés pour confectionner le recouvrement isolant et sa configuration influencent la vitesse de ces transferts thermiques et hydriques. En bref, le recouvrement isolant est un système complexe qui fait intervenir plusieurs processus interagissant entre eux. Il est important de bien étudier les conditions particulières de chaque site si l'on veut faire un design efficace.

Enfin, il est important de souligner que quelques recherches ont montrées que les rejets miniers (résidus miniers ou stériles miniers) sont susceptibles de s'oxyder à des températures inférieures à 0°C (Elberling, 2001; Meldrum et Jamieson, 2001; Elberling, 2005; Ethier, 2011). Malgré ces quelques recherches menées sur le sujet (cela sera traité plus en détails au chapitre 2), il n'existe aucune méthodologie précise pour identifier, pour un cas particulier, la température à laquelle

l'oxydation des résidus est négligeable. De plus, les études sur le terrain sont plutôt rares et il existe peu de travaux qui tentent de relier l'oxydation des résidus, avec ou sans recouvrement isolant, aux conditions thermiques et hydrogéologiques du site.

1.5 Contexte et objectif du projet de recherche

On retiendra des sections précédentes que le recouvrement isolant est une technique de restauration de plus en plus considérée en environnement nordique (Holubec, 2004; Rykaart et Hockley, 2009). Malgré cela, il existe très peu de travaux de recherche sur ce type de recouvrement. Pour chaque site ayant un potentiel de génération de DMA, il est important de connaitre la température à laquelle la réactivité des résidus est nulle (ou négligeable) afin de construire un recouvrement isolant qui atteint les objectifs de contrôle du DMA. De plus, la plupart des études menées sur l'efficacité des recouvrements isolants utilisent la température comme seul critère d'évaluation de la performance des recouvrements isolants (Kyhn et Elberling, 2001; Holubec, 2004). Il est important de développer d'autres techniques complémentaires pour évaluer de façon plus directe la performance des recouvrements isolants à contrôler l'oxydation des résidus sulfureux. Enfin, on remarque qu'il existe très peu, à la connaissance de l'auteure, de travaux qui étudient le comportement et la performance de différentes configurations de recouvrement isolant directement sur le terrain. Ainsi, le présent projet de recherche a comme objectif principal d'évaluer la performance à limiter l'oxydation des résidus miniers sulfureux de deux configurations de recouvrements partiels (0,4 m et 1,2 m) installés sur un parc à résidus miniers existant, soit le parc à résidus de Mine Raglan. Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

- Caractériser les matériaux impliqués dans la recherche afin de mieux comprendre leur comportement géochimique, thermique et hydrogéologique.
- Étudier la réactivité des résidus sur le parc à résidus miniers de Mine Raglan, en mettant l'emphase sur l'influence de la température.
- Évaluer le comportement thermique et hydrique des différentes configurations de recouvrements isolants partiels (0,4 m et 1,2 m) en période de gel et de dégel.

- Évaluer l'effet des recouvrements isolants partiels (0,4 m et 1,2 m) sur la réactivité des résidus miniers et sur le profil thermique et hydrique des résidus miniers sous le recouvrement.

Noter que le projet porte essentiellement sur des recouvrements isolants partiels. Le recouvrement isolant complet (de 2,4 m) est présentement à l'étude sur une cellule expérimentale à la mine Raglan mais les données n'ont pas été recueillies suffisamment rapidement pour que cela puisse être intégré de façon exhaustive dans ce mémoire (le recouvrement complet sera tout de même abordé brièvement au chapitre 6).

1.6 Contenu et contributions scientifiques du mémoire

Les travaux de ce mémoire ont été menés afin d'atteindre les objectifs spécifiques énumérés précédemment. Tout d'abord, au chapitre 2, une revue de littérature présente une brève description des recouvrements isolants suivis des facteurs influençant la performance de ces mêmes recouvrements. Le comportement des sols en période de gel et de dégel ainsi que les lois de comportement thermique et hydrique sont ensuite présentées. Les méthodes d'évaluation de la performance des recouvrements isolants sont identifiées avec quelques exemples de cas. L'objectif de cette revue de littérature est de comprendre les aspects particuliers d'un site situé en climat nordique, d'identifier les concepts à la base de la méthode de restauration par recouvrement isolant et les approches pour en évaluer son efficacité.

Au chapitre 3, le site à l'étude ainsi que la localisation des différentes stations de mesures sont présentés. Le parc à résidus et les recouvrements isolants partiels et final sont ensuite décrits plus en détails. La conception des stations de mesures, le choix et le détail de l'instrumentation sont expliqués pour les stations non recouvertes, pour les stations recouvertes de 0,4 m et de 1,2 m. Les différentes étapes menant à la construction des stations de mesures sont enfin décrites.

Le chapitre 4 présente les techniques de caractérisation physique, minéralogique, chimique, hydrogéologique et thermique utilisées pour les matériaux à l'étude. Les résultats pour les résidus miniers et pour le matériel de recouvrement sont par la suite présentés. La variabilité *in situ* de la réactivité des résidus miniers ainsi que la variabilité de la réactivité des résidus miniers en fonction du degré de saturation en laboratoire sont évaluées dans ce chapitre.

Le chapitre 5 présente les résultats de teneur en eau volumique, de température, de succion et des tests de consommation d'oxygène mesurés sur une période d'une année dans les résidus miniers, avec ou sans recouvrement. Ces résultats sont ensuite interprétés et reliés avec la réactivité des résidus miniers. L'effet de la température sur la réactivité des résidus est analysé afin de mieux comprendre l'impact du gel sur l'oxydation des sulfures. Une température cible (ou plutôt une plage de valeur) pour diminuer la réactivité des résidus miniers est identifiée. Finalement une attention particulière est portée sur la variation spatiale des résultats de test de consommation d'oxygène sur le parc à résidus miniers.

L'influence des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m sur la réactivité des résidus miniers est discutée au chapitre 6. Une partie du chapitre se concentre sur l'étude des comportements thermiques et hydriques des recouvrements et sur l'effet de ces recouvrements isolants partiels sur la température et sur la teneur en eau volumique des résidus miniers. L'efficacité des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m à diminuer l'oxydation des résidus miniers est évaluée avec la méthode par profil de température et avec la méthode par test de consommation d'oxygène. Un bref aperçu du scénario de recouvrement final de 2,4 m est présenté. De plus, des informations supplémentaires sur les propriétés hydrogéologiques et thermiques des matériaux *in situ* sont présentées à partir des mesures de température, de teneur en eau volumique et de succion prises sur le terrain.

Ce mémoire apporte diverses contributions scientifiques. Au niveau technique, une nouvelle approche d'évaluation de la performance de recouvrement isolant basé sur la réactivité des résidus miniers estimée par essai de consommation d'oxygène (réalisé sous le recouvrement) a été appliquée sur le terrain. Cette méthode innovatrice permet d'évaluer la performance du recouvrement à un instant et un endroit donné. Les essais réalisés permettent d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle de la réactivité avec et sans recouvrement. La combinaison de cette nouvelle approche et de l'approche basée sur la température des résidus peut permettre d'estimer de façon encore plus précise la réactivité d'un site et/ou la performance de recouvrements isolants.

Les résultats de caractérisation apportent des informations pertinentes sur les propriétés thermiques, hydrogéologiques et géochimiques des résidus. Le matériel de recouvrement à l'étude a également été caractérisé en détails. Rappelons que ces propriétés sont essentielles dans

le design de scénarios de restauration. Les mesures de température, de teneur en eau volumique, de succion et de réactivité des résidus miniers permettent quant à elles de mieux comprendre le comportement environnemental du parc à résidus miniers de Mine Raglan. Même si le projet est appliqué à un cas réel, l'approche préconisée est transférable à d'autres cas de parc à résidus miniers générateurs d'acide situés en climat nordique.

De façon plus générale, l'étude apporte des informations supplémentaires concernant l'effet de la température et de la teneur en eau volumique non gelée sur la réactivité des résidus miniers en environnement nordique et sur la variabilité de la réactivité des résidus miniers sur un site donné. Il existe, à la connaissance de l'auteure, très peu d'étude semblable présentement dans la littérature. Enfin, l'étude permet d'évaluer l'effet de l'épaisseur de recouvrements isolants partiels sur la performance à contrôler l'oxydation des minéraux sulfureux. Dans un contexte où les coûts de construction sont importants, l'identification d'une épaisseur optimale de ce recouvrement isolant partiel pourrait permettre d'optimiser les coûts associés à la restauration du parc à résidus miniers de Mine Raglan.

CHAPITRE 2 LITTÉRATURE PERTINENTE À L'ÉTUDE

Comme le présent projet porte sur la technique de restauration par recouvrements isolants, on présente dans ce qui suit plus de détails sur cette approche et sur les lois qui régissent son fonctionnement. On présente également les méthodes qui sont utilisées pour évaluer la performance de ce type de recouvrement, ainsi que quelques cas réels où ces techniques ont été appliquées. Enfin, suite à cette revue de la littérature, on identifie les principaux besoins en recherche pour ce type de recouvrement.

2.1 Description du concept du recouvrement isolant

Afin de limiter la formation de drainage miniers acide (DMA) et la migration de métaux en climat nordique, il a été proposé d'intégrer les résidus miniers dans le pergélisol (Holubec, 1993; Dawson et Morin, 1996). Cette proposition est basée sur le fait que les cinétiques de réactions géochimiques et biochimiques sont presque nulles à faible température et que le gel peut restreindre la migration des polluants dans l'environnement. Il est possible d'intégrer les résidus miniers au pergélisol en climat nordique car une grande portion du sol est gelée à l'année. Le pergélisol est défini comme un sol dont la température est égale ou inférieure à 0°C pour deux années consécutives (Rykaart et Hockley, 2009). Cette définition ne prend pas en compte les phénomènes qui affectent les caractéristiques physiques et chimiques du pergélisol, tels que l'abaissement du point de congélation, la teneur en glace et en eau, la température du pergélisol, etc. Andersland et Ladanyi (2004) définissent la limite arbitraire entre le pergélisol continu et discontinu à l'isotherme de température moyenne annuelle du sol (T_s) de -5°C, mesuré juste en dessous de la profondeur où l'amplitude annuelle de température est nulle. Les différentes zones de pergélisol sont présentées à la Figure 2-1, où la limite entre le pergélisol continu et discontinu est définie par une valeur de T_s de -5°C. La présence du pergélisol et ses caractéristiques (température, sensibilité au gel ou dégel) varient selon la température de l'air, la topographie locale, l'hydrologie, la teneur en eau du sol, l'épaisseur de neige, la végétation et le type de sol.

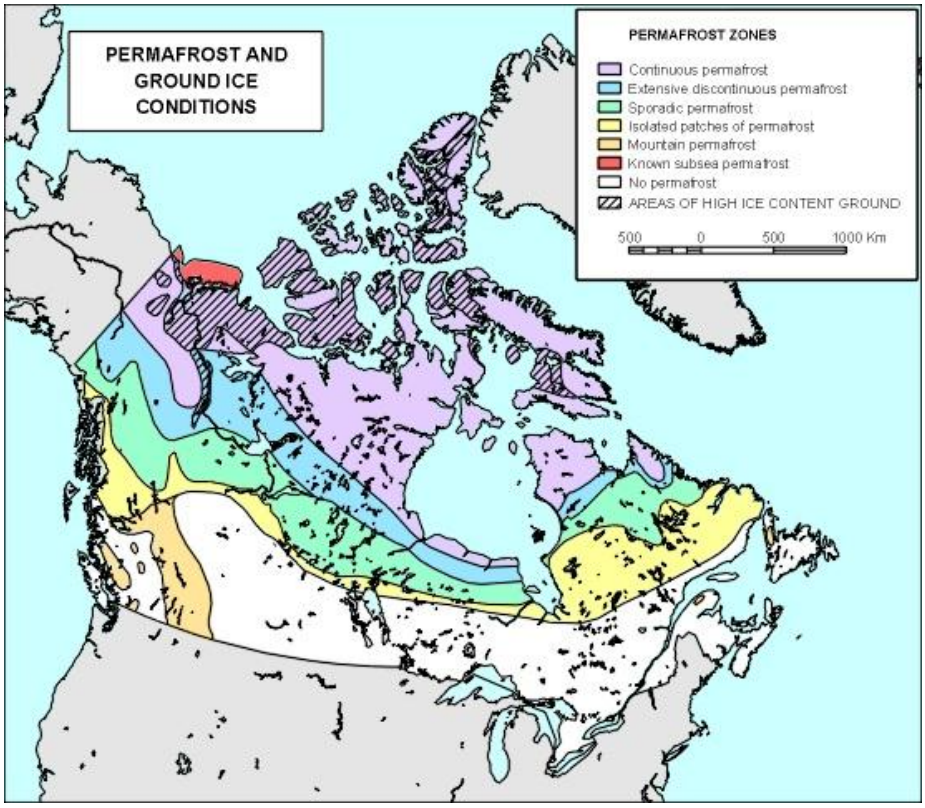


Figure 2-1: Distribution du pergélisol au Canada (d'après Ressources Naturelles Canada, 2009)

La Figure 2-2 présente le profil de température d'un sol en zone de pergélisol continue. La température minimale, moyenne et maximale du sol en surface (T_{min}, T_m, T_{max}), ainsi que les profils de température minimale et maximale sont illustrées sur cette figure. La couche de pergélisol, où la température maximale du sol est inférieure à 0°C toute l'année, peut atteindre jusqu'à 700 m d'épaisseur dans l'archipel Arctique (Ressources Naturelles Canada, 2009). En surface on retrouve une couche de sol, appelée la couche active ou mollisol, où la température maximale peut être supérieure à 0°C. Cette couche de sol subit les cycles de gel et de dégel annuels et sa température fluctue autour de 0°C. Son épaisseur varie régionalement et dépend de plusieurs facteurs, tels que la sévérité de l'hiver (indice de gel), la teneur en eau du sol, le couvert de neige, le degré et l'orientation des pentes, la végétation et le type de sol (Andersland et Ladanyi, 2004). En général, la couche active est de moins de 1 m en région arctique et entre 1 à 5 m dans les zones de pergélisol discontinu (Dawson et Morin, 1996).

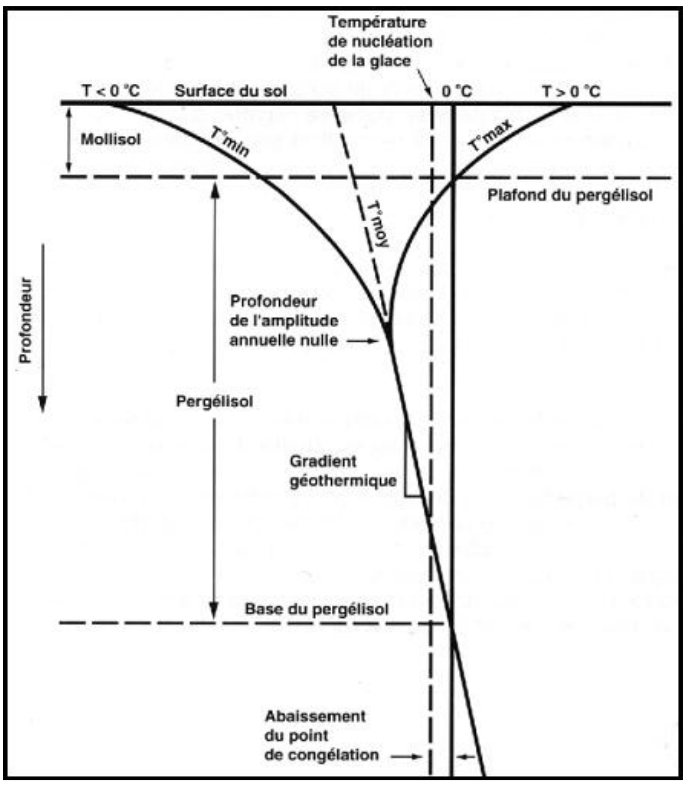


Figure 2-2: Régime thermique du pergélisol (Robitaille et Allard, 1996)

Afin d'intégrer les résidus miniers au pergélisol, une épaisseur suffisante de matériel non réactif est posée sur les résidus miniers, afin de permettre l'isolation des résidus du réchauffement de surface saisonnier, comme il est schématisé à la Figure 2-3. Ainsi, le gel et le dégel saisonnier se produit dans la couche de recouvrement et les résidus restent constamment gelés. Le recouvrement isolant peut être composé d'une seule couche de matériel (monocouche) ou de plusieurs épaisseurs de recouvrement (multicouche). Il est recommandé d'utiliser des matériaux fins qui resteront saturés et qui fournissent une meilleure isolation (Rykaart et Hockley, 2009). Par contre, les matériaux fins ne sont pas toujours disponibles à la proximité du site et d'autres matériaux d'origine naturelle ou minière (tel que du sable, de la roche concassée, du till, stériles miniers, etc.) peuvent être utilisés. L'utilisation de matériaux grossiers pourrait permettre d'engendrer un phénomène de convection dans le recouvrement qui aiderait au refroidissement des résidus sous-jacents, facilitant leurs intégration au pergélisol (Arenson et Sego, 2007; Pham et al., 2009).

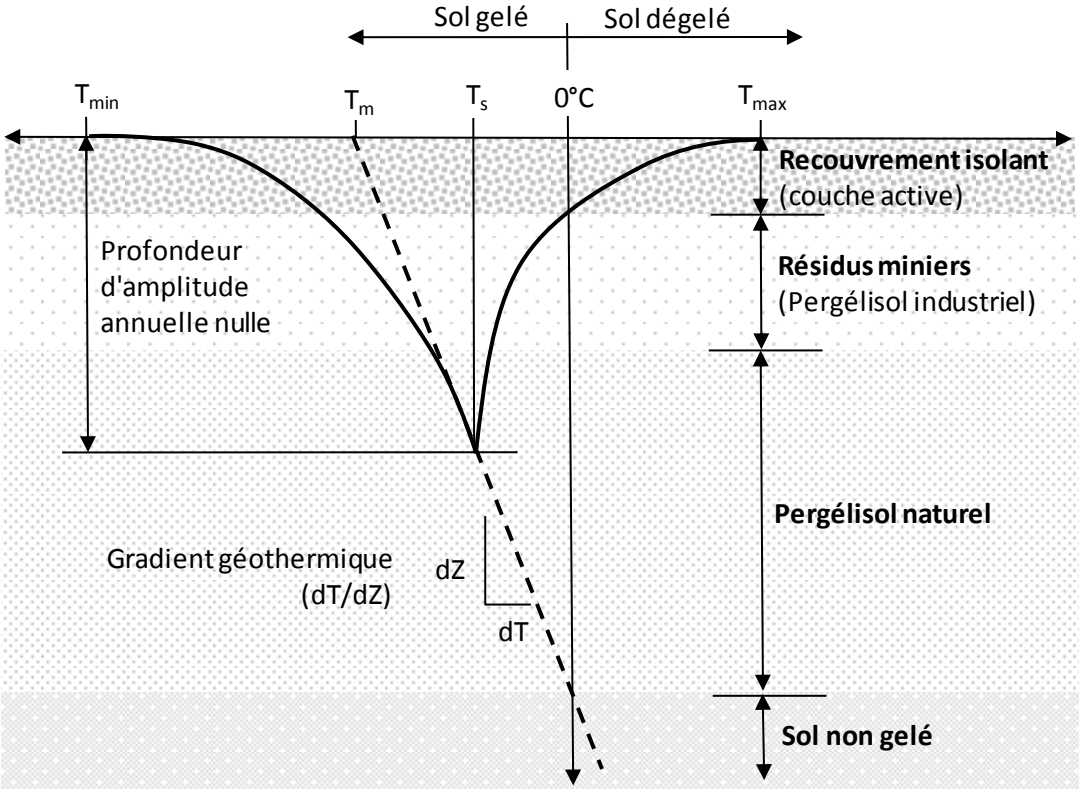


Figure 2-3 : Profil de température dans un parc à résidus miniers avec recouvrement isolant en zone de pergélisol continu (modifié d'Andersland et Ladanyi, 2004)

Le recouvrement isolant comme méthode de restauration devrait être considéré seulement pour les sites en zone de pergélisol continu, où la température de l'air et du sol est suffisamment froide. Pour s'assurer d'une bonne intégration des résidus miniers au pergélisol, il est recommandé que la température moyenne annuelle du sol à la profondeur d'amplitude nulle soit inférieure à -2°C, correspondant à une température annuelle moyenne de l'air (MAAT) de -7,5°C (Holubec, 2004; Rykaart et Hockley, 2009). Un réchauffement climatique pourrait cependant venir limiter l'application de cette règle. L'utilisation de recouvrement isolant pour la restauration de parcs à résidus miniers est toujours en développement. Tout d'abord, la température à laquelle l'oxydation des résidus miniers devient négligeable n'est pas encore connue et probablement unique pour chaque site. Ensuite, si les conditions climatiques évoluent, le comportement thermique et hydrique du recouvrement sera différent et le design de base pourrait ne plus être adéquat (Rykaart et Hockley, 2009). Quelques sites miniers situés en climat nordique au Canada utilisent ou comptent utiliser le recouvrement isolant comme méthode de restauration de leur parc

à résidus. Le Tableau 2.1 présente ces sites, leur localisation et une description sommaire de leur recouvrement.

Tableau 2.1 : Sites miniers utilisant ou considérant l'utilisation d'un recouvrement isolant pour la restauration de leur parc à résidus miniers

Sites	Location	Détails du site	Année complété	Description du recouvrement	Référence
Rankin Inlet Mine, NU	62°48'N 92°05'O	MAAT de -11 °C	1994	1,0 m de sable et de gravier d'esker	Meldrum et al., 2001; Holubec, 2004
Nanisivik, NU	73°02'N, 84°31'O	MAAT de -15,2°C	2007	1,0 m de shale (sable graveleux) recouvert de 0,25 m de sable et gravier.	Elberling, 2001, 2005; Kyhn et Elberling, 2001; Rykaart & Hockley, 2009
Raglan, Qc	61°41'N, 73°41'O	MAAT de -10,5°C	Proposé	1,2 m de roche grossière avec > 6% fines reposant sur 1,2 m de roche fines partiellement saturées.	Holubec I., 2004; AMEC, 2002
Meadowbank, NU	65°01'N, 96°04'O	MAAT de -11,4°C	Proposé	4,0 m de stérile minier inerte	Robert S., 2012
Diavik Mine, NWT	64°30'N, 110°40'O	MAAT de -10,0°C	Proposé	0,5 m de sable silteux saturé recouvert de 3 m de roche grossière.	Holubec, 2004; Rykaart & Hockley, 2009
Ekati Mine, NWT	64°44'N, 110°20'O	MAAT de -10,3°C	Proposé	1,5 à 2,0 m composés d'une couche de matériaux fins saturés recouvert d'une couche de stérile granitique	Holubec, 2004; Rykaart & Hockley, 2009

2.2 Facteurs influençant la performance d'un recouvrement isolant

Certains facteurs peuvent influencer la performance d'un recouvrement isolant à prévenir le DMA. Le potentiel des résidus à générer du DMA va varier en fonction de la réactivité des résidus, du degré de saturation et de la température des résidus. Ensuite, l'ajout du recouvrement isolant influence la performance du système en modifiant le profil thermique et hydrique des

résidus. Ces différents facteurs influençant la performance du système sont décrits plus en détails dans les sections suivantes.

2.2.1 Réactivité des résidus miniers

La réaction d'oxydation des résidus causant la génération du DMA s'effectue progressivement des couches de résidus de la surface vers les couches plus profondes. L'oxygène atmosphérique est consommé et un gradient de concentration d'oxygène se développe dans les résidus. Ce gradient de concentration est le facteur contrôlant le transport de l'oxygène par diffusion dans les résidus miniers. Dans le cas des rejets de concentrateur, il est généralement accepté que la diffusion moléculaire est le principal mécanisme de transport de l'oxygène menant à la production de drainage minier acide (Collin, 1987; Collin et Rasmuson, 1988; Nicholson et al., 1989; Elberling et al., 1993; Elberling et al., 1994). Dans le cas où l'oxygène réagit avec le milieu (présence de minéraux sulfureux), une partie de l'oxygène qui diffuse dans le milieu est consommé par les résidus. La diffusion et la consommation d'oxygène dans les résidus peut être décrite par la 2e loi de Fick modifiée (Elberling et Nicholson, 1996; Aubertin et al., 2000; Mbonimpa et al., 2003; Mbonimpa et al., 2011) selon l'équation 2.1.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - K_r C^n \qquad [2.1]$$

Où C est la concentration en oxygène, t est le temps, z est la profondeur, D_e est le coefficient de diffusion de l'oxygène et K_r le coefficient de réactivité des résidus. Lorsque le système est en régime permanent pour une réaction du 1er ordre (n=1), l'équation représentant le flux d'oxygène (F_L) qui diffuse au travers des résidus (Elberling et Nicholson, 1996) s'écrit :

$$F_L = C_o (D_e K_r)^{0,5} \qquad [2.2]$$

Où C_0 est la concentration en oxygène au temps initial. Deux paramètres influencent la réaction d'oxydation de façon importante, soit le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène D_e, qui décrit la facilité avec laquelle l'oxygène a accès aux sulfures, et le coefficient de réactivité des résidus K_r. Les paramètres D_e et K_r peuvent être estimés à partir des propriétés de base des matériaux, tel que la porosité et le degré de saturation. L'équation 2.3 peut être utilisée pour estimer la valeur de D_e (Aachib et al., 2002; Aachib et al., 2004). D_e varie selon la constante de Henri (H), la tortuosité (p_w, p_a), la teneur en eau et en air volumique (θ_w, θ_a) et selon les

coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau et dans l'air D_w^0 et D_a^0 (à 25°C ; $D_w^0 \approx 2{,}5x10^{-9}$ m²/s et $D_a^0 \approx 1.8x10^{-5}$ m²/s)

$$D_e = \frac{1}{n^2}\left[D_a^0\theta_a^{p_a} + HD_w^0\theta_w^{p_w}\right] \quad [2.3]$$

Ensuite, la réactivité des résidus miniers peut être décrite par le paramètre de réaction K_r. Collin (1987, 1998) a proposé un modèle simple, où la réactivité K_r varie linéairement avec la teneur relative en sulfure (C_p; cette étude a été réalisée pour la pyrite). La relation prend également en considération la porosité (n) et la surface spécifique des grains exprimés sous la forme du coefficient de diamètre équivalent des grains (D_H). Le modèle de Collin est présenté à l'équation 2.4.

$$K_r = K'\frac{6}{D_H}(1-n)C_p \quad [2.4]$$

Dans cette équation, K' est la réactivité de la pyrite avec l'oxygène; une valeur de K' de 5 x 10^{-10} m^3 O_2/m^2 pyrite/seconde est utilisée. La surface spécifique des grains est exprimée avec le paramètre D_H, qui s'estime avec les paramètres de la courbe granulométrique (éq. 2.5), où D_{10} est le diamètre des particules correspondant au passant 10% sur la courbe granulométrique et C_U est le coefficient d'uniformité (Aubertin et al., 1998; Mbonimpa et al., 2003). Une étude granulométrique sur une variété de rejets de concentrateur montre des valeurs de D_{10} variant entre 1 x 10^{-6} m et 5 x 10^{-6} m et des valeurs de C_U variant entre 8 et 18 (Bussière, 2007). À partir de ces valeurs, un D_H correspondant entre 2 x 10^{-6} m et 1 x 10^{-5} m est obtenu.

$$D_H = [1 + 1{,}17log(C_u)]D_{10} \quad [2.5]$$

Les paramètres D_e et K_r qui contrôlent la réactivité des résidus miniers vont être influencés en grande partie par le degré de saturation (S_r) du milieu et par la température (T).

2.2.2 Degré de saturation

Tel que mentionné précédemment, la diffusion est le principal mécanisme de transport de l'oxygène dans les résidus miniers. Le degré de saturation des résidus influence fortement le coefficient de diffusion de l'oxygène, qui lui contrôle le flux diffusif. Gosselin (2007) a évalué l'effet du degré de saturation sur le coefficient de diffusion et sur le coefficient de réaction des résidus. Pour ce faire, il a mené des essais de diffusion et de consommation d'oxygène en cellule fermée à 1 ou 2 réservoirs sur des résidus en faisant varier le degré de saturation. Ces essais en

cellules fermées, décrites en détails dans Gosselin et al. (2007), permettent de déterminer les valeurs de D_e et de K_r. La Figure 2-4 présente l'influence du degré de saturation sur les valeurs de D_e mesurées en cellule fermée à 1 réservoir, ainsi que la valeur de D_e calculée avec le modèle de prédiction présenté à l'équation 2.3. On observe sur cette figure que les valeurs mesurées de D_e sont conformes au modèle proposé par Aachib et al. (2002, 2004). Également, plus le degré de saturation augmente, plus la valeur de D_e diminue. Lorsque le degré de saturation est inférieur à 85-90%, la diffusion de l'oxygène se produit dans la phase gazeuse. Au-dessus de ces valeurs, la phase gazeuse devient discontinue et l'oxygène doit diffuser dans les pores du sol remplis d'eau. La diffusion est donc limitée par la concentration maximale de l'oxygène dans l'eau (C_w = 9,2 mg/L à 20ºC) qui est environ 30 fois plus faible de la concentration en oxygène dans l'air (C_a = 276,7 mg/L). Il a été proposé qu'à partir de S_r = 85%, la diffusion de l'oxygène dans les résidus est suffisamment faible pour que l'oxydation des résidus sulfureux soit réduite à des niveaux qui peuvent être considérés acceptables (Ouangrawa, 2007).

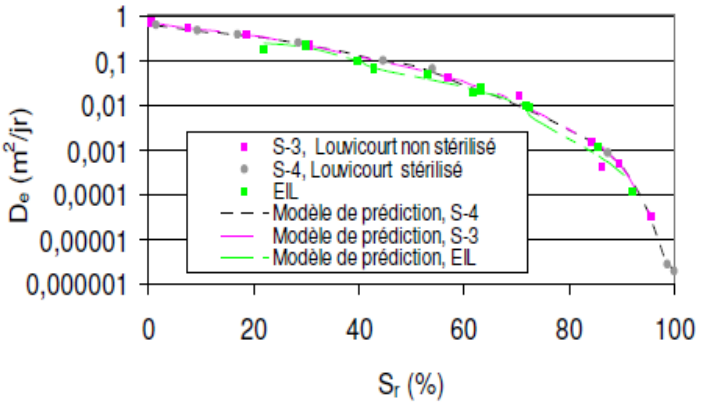


Figure 2-4 : Influence du degré de saturation sur le coefficient D_e (tiré de Gosselin et al., 2007)

Ensuite, il a été démontré que K_r est influencé par le degré de saturation (Gosselin, 2007; Gosselin et al., 2007) ce qui n'est pas considéré dans le modèle de Colin (1987). Selon les travaux de Gosselin (2007), K_r est plus faible pour $S_r \leq 20\%$ et à $S_r \geq 80\%$. Entre ces deux valeurs, K_r est plus élevé et varie peu. L'évolution du coefficient K_r en fonction du degré de saturation tiré des travaux de Gosselin et al. (2007) est présentée à la Figure 2-5. Hamdi (2011) a également évalué l'effet du degré de saturation sur le coefficient K_r. Selon ses travaux, les valeurs de K_r augmentent jusqu'à atteindre un plateau entre S_r de 40% à 60%, avec des valeurs proches

de celles estimées par le modèle de Colin (1987). Ensuite, au-delà de ce plateau, K_r diminue avec le degré de saturation.

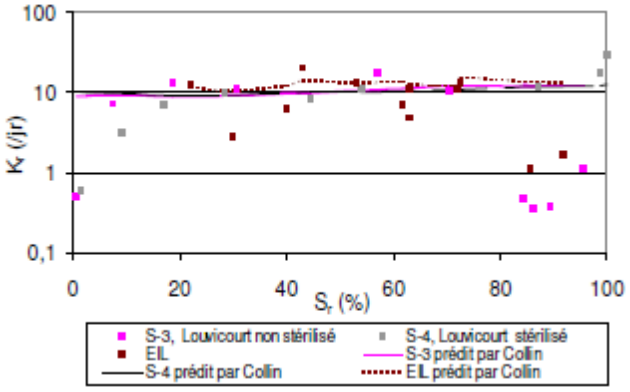


Figure 2-5 : Influence du degré de saturation sur le coefficient de réactivité K_r (tiré de Gosselin et al., 2007)

2.2.3 Température

Les cinétiques d'oxydation chimiques et biologiques des minéraux sulfureux sont influencées par la température; la relation d'Arrhénius, présentée à l'équation 2.6 représente la dépendance des constantes de réaction par rapport à la température (Nicholson et al., 1988). Des études ont démontrées que cette équation est une approximation valide pour décrire les taux de réaction d'oxydation chimiques et biologiques des minéraux sulfureux (Ahonen et Tuovinen, 1992; Dawson et Morin, 1996).

$$ln(K_1/K_2) = E_a\,(T_1 - T_2)/(RT_1T_2) \qquad [2.6]$$

Dans cette équation, K_1 et K_2 sont les taux de réaction aux températures T_1 et T_2, E_a est l'énergie d'activation et R est la constante des gaz parfaits. E_a varie selon le minéral sulfureux en place. Par exemple, la valeur de E_a pour la pyrite (FeS_2) varie de 50 kJ/mole à 88 kJ/mole selon les conditions expérimentales (Nicholson et al., 1988). L'énergie d'activation pour l'oxydation de la pyrrhotite par l'oxygène varie de 48 à 124 kJ/mole (Janzen et al., 2000). Elberling (2001) a mesuré en laboratoire des taux d'oxydation totaux (chimique et biologique) et chimiques de résidus miniers pour des températures variant entre -4°C et 15°C avec la méthode par consommation d'oxygène décrite par Elberling et Nicholson (1996). L'oxydation chimique a été mesurée en stérilisant des échantillons de résidus miniers afin d'éliminer l'influence des

bactéries. Au-dessus de 0°C, la variation des taux d'oxydation chimiques et biologiques selon la température sont bien représentés par l'équation d'Arrhénius (trait plein). Par contre, sous 0°C, les taux d'oxydation sont mieux représentés par une régression linéaire (trait pointillé). On observe à la Figure 2-6 que l'oxydation chimique et biologique des résidus présente le même comportement selon la température. Il est donc possible d'évaluer l'influence de la température sur l'oxydation totale des résidus, peu importe le degré de réaction biologique.

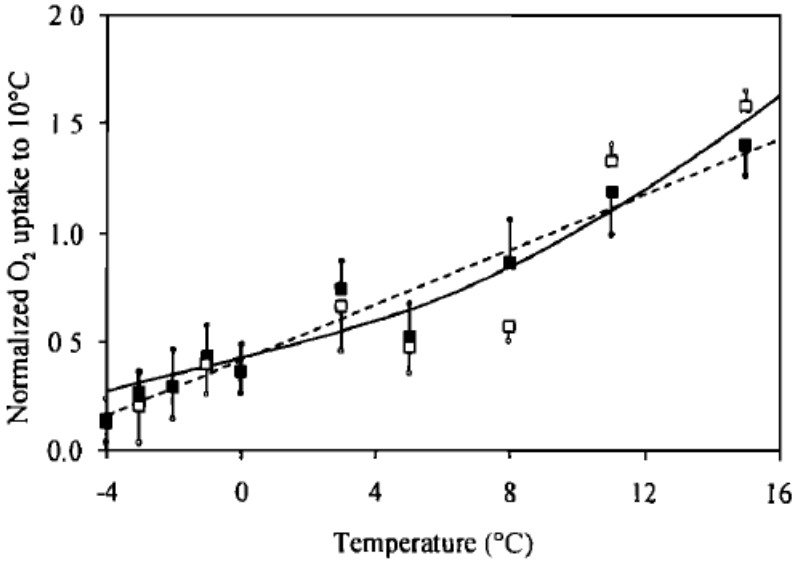


Figure 2-6 : Oxydation chimique (carrés vides) et biologique (carrés pleins) de résidus miniers et équation d'Arrhénius (ligne pleine) d'après Elberling (2001)

Le coefficient de température (Q_{10}) est une autre approximation qui peut être utilisée pour décrire la variation du taux de réaction pour un changement de température de 10°C (Elberling, 2005). L'équation pour calculer Q_{10} est la suivante :

$$Q_{10} = \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{10/(T_2 - T_1)} \qquad [2.7]$$

où K_1 est le taux de réaction à la température T_1 et K_2 est le taux de réaction à la température T_2. Une étude de Nicholson et al. (1988) a démontré que Q_{10} se situe entre 2 et 3 pour l'oxydation de la pyrite pure à une température entre 3°C et 25°C et qu'il est incertain aux température où il y a présence de gel. Selon Elberling (2005), Q_{10} aurait une valeur de 2 pour l'oxydation de la pyrite à des températures au-dessus de -2°C (R^2 = 0,99) et de 10 pour des températures sous -2°C (R^2 = 0,92). Pour ce qui est de la pyrrhotite, une étude rapporte que le coefficient de température aurait

une valeur de 2 pour des températures entre 25°C et 35°C (Kwong, 1995). Aucune valeur de Q_{10} à des températures inférieures à 0°C n'a été trouvée dans la littérature pour la pyrrhotite.

Selon Elberling (2005), le changement de Q_{10} à des température sous -2°C serait causé par la diminution de la disponibilité en oxygène à la surface des grains de pyrite en condition de gel. Le gel aurait comme effet de piéger l'oxygène dans le sol, obligeant ainsi l'oxygène à diffuser au travers de la glace afin d'accéder au grain de pyrite. Ce phénomène contribuerait ainsi à la diminution plus rapide des taux d'oxydation en condition de gel. Selon le même auteur, le gel des résidus n'aurait pas d'effet sur le coefficient de diffusion de l'oxygène lorsque le degré de saturation des résidus est inférieur à 30%. À partir d'un S_r de 30% et plus, le gel diminuerait le coefficient de diffusion jusqu'à un facteur de 10 pour un S_r de 70% (Elberling, 1998). Ainsi, selon ces études, le gel des résidus pourrait devenir un facteur limitant la diffusion de l'oxygène. Peu d'études ont été menées sur les processus contrôlant l'oxydation des résidus miniers en environnement nordique, cette hypothèse n'a donc pas été confirmée par d'autres études.

Plusieurs auteurs ont montré que l'oxydation des résidus est encore possible à des températures inférieures à 0°C sur différents sites. Une étude de Godwaldt (2001) mentionne que l'oxydation des résidus miniers est possible à des températures inférieures à 0°C s'il y a présence d'eau non gelée et d'oxygène. Dans leur étude, Meldrum et Jamieson (2001) ont noté une oxydation de résidus sulfureux à des températures de -2°C en laboratoire, mais non détectable à -10°C. De son côté, Elberling (2001) a effectué des tests de consommation d'oxygène à Nanisivik sur des résidus bien drainés, ayant un degré de saturation entre 8 % et 10 %. Des tests menés durant la période hivernale (novembre et décembre 1998) sur le même site ont montré des taux d'oxydation de l'ordre de 44 ± 7 $moles \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$ pour une température du sol variant entre -1° et -3°C dans les premiers 20 cm des résidus. Également, des mesures faites en mai 1999 ont montré que l'oxydation des résidus n'était pas mesurable à des températures des résidus de -8°C, mais était détectable lorsque la température des résidus augmentait à -4°C. La même étude a montré que la consommation d'oxygène peut être modélisée de façon satisfaisante en prenant seulement la température des résidus en compte. Les résultats de la modélisation, les tests de consommations d'oxygène *in situ*, la température de l'air et du sol sont présentés à la Figure 2-7. A partir de ces résultats, Elberling (2001) a conclu que 40% de l'oxydation annuelle avait lieu durant la période hivernale, lorsque la température du sol est sous 0°C.

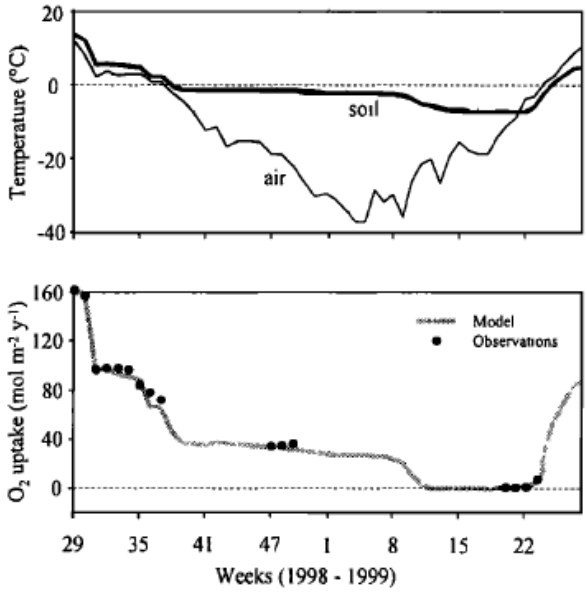


Figure 2-7 : Température du sol, température de l'air, mesures de consommation d'oxygène *in situ* et modélisation (tiré d'Elberling, 2001)

Par la suite, Elberling (2005) a mesuré en laboratoire de l'oxydation sur des résidus importés de la mine Nanisivik jusqu'à des température de -11°C. Les échantillons ont été maintenus à des températures entre -8°C et -10°C durant environ 9 mois pour simuler les conditions hivernales. Une raison qui pourrait expliquer l'oxydation des résidus à de si faibles températures est que les bactéries en climat nordique se seraient acclimatées à leur milieu et aurait modifié leur température optimale pour leurs activités, restant actives à de faibles températures. Pour que les bactéries soient encore actives à la température de gel, il doit y avoir présence d'eau non gelée et présence d'ions diminuant le point de congélation de l'eau. La présence d'eau non gelée est souvent plus prononcée dans les résidus miniers que dans les autres types de sol, vu la quantité plus importante d'ions dissous (Elberling, 2005). La présence de ces ions permet ainsi aux procédés biogéochimiques de se produire à de faibles températures. Elberling (2001) a observé et simulé la présence d'eau non gelée dans des résidus bien drainés à Nanisivik et a documenté la présence d'eau non gelée jusqu'à des températures de -10°C.

Malgré les études menées sur le sujet, la température où la réactivité des résidus est nulle n'est pas encore connue. Sur les bases des observations d'Elberling (2001), Kyhn et Elberling (2001) ont proposé une température critique de -5°C pour le design de recouvrement isolant. Ainsi, selon

ce critère, il est préférable de viser une température des résidus de -5°C afin de s'assurer que le recouvrement isolant soit efficace pour prévenir l'oxydation des résidus.

2.2.4 Ajout du recouvrement isolant

La température et la teneur en eau sont deux facteurs qui jouent un rôle important sur la réactivité des résidus miniers. L'ajout d'un recouvrement isolant modifie le profil thermique et hydrique des résidus, et donc la réactivité de ces derniers; l'objectif du recouvrement étant de modifier ces conditions d'une telle façon qu'elles soient non favorables à l'oxydation des minéraux sulfureux. L'ajout du recouvrement change l'épaisseur de la couche active et la durée de la période de dégel, selon les propriétés thermiques des matériaux ajoutés. Également, le déplacement d'eau par infiltration, par ruissellement, par évaporation et percolation sera différent avec l'ajout du recouvrement. La Figure 2-8 présente le comportement général d'un recouvrement isolant avec les différents mécanismes de transport de chaleur, d'eau et d'oxygène ainsi que les propriétés thermiques, hydrogéologiques et géotechniques des matériaux affectant ces transferts. Le comportement thermo-hydrique des sols en période de gel sera abordé plus en détails à la section suivante.

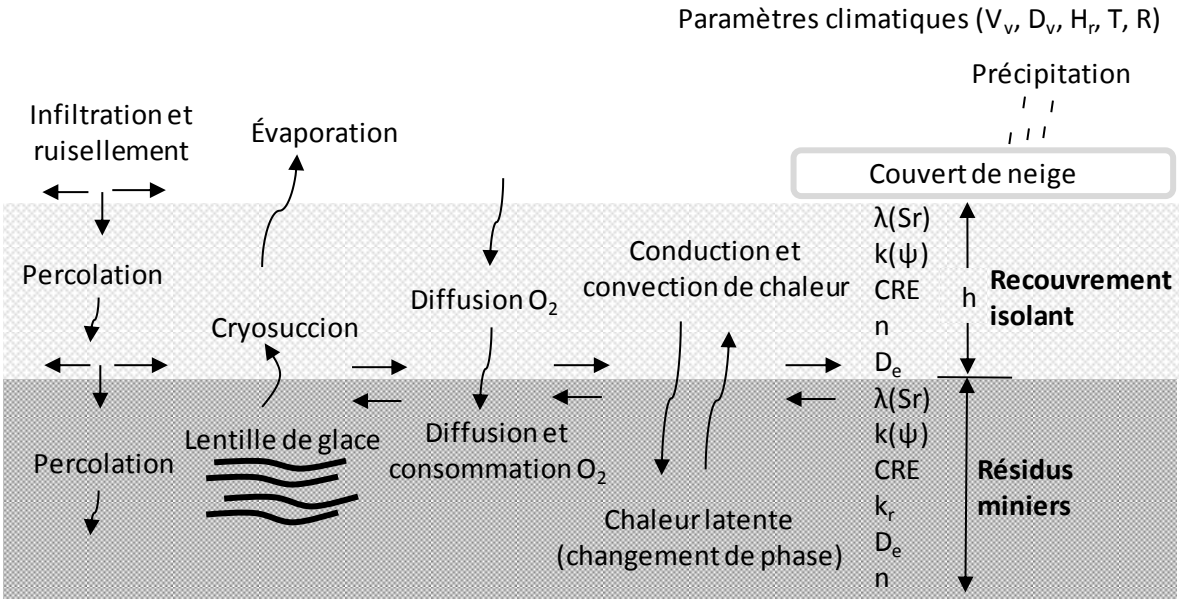


Figure 2-8 : Comportement général du système recouvrement isolant - résidus miniers

2.3 Comportement thermique et hydrique du sol en période de gel et de dégel

Afin d'évaluer l'impact d'un recouvrement isolant sur la réactivité des résidus miniers, il est important de bien comprendre les différents mécanismes de transfert d'eau et de chaleur prenant place dans le recouvrement isolant et dans les résidus en période de gel et de dégel. Il peut y avoir cohabitation de cinq éléments, soit la matrice de sol, la glace, l'eau liquide, la vapeur d'eau et l'air. Dans la section suivante, la structure d'un sol gelé ainsi que les mécanismes de transferts de chaleur et d'eau relié à la formation du gel sont présentés.

2.3.1 Structure d'un sol gelé

Un sol non saturé en période de gel peut être subdivisé en trois zones distinctes, soit la zone gelée, la frange gelée et la zone non gelée (Miller, 1972; Harlan, 1973), tel que présenté à la Figure 2-9, où il y a coexistence des cinq composantes mentionnées précédemment. La frange gelée est la zone située entre les lentilles de glace (si présentes) et le sol non gelé. Il y a possibilité de migration d'eau non gelée vers la zone gelée, où la succion est la plus forte, en passant au-travers de la frange gelée. Ce mouvement d'eau peut mener à la formation de lentilles de glace à l'extrémité supérieure de la frange gelée. La quantité d'eau qui migre vers les lentilles de glace sera fonction de la perméabilité du sol non gelé et de la frange gelée. Dans la zone gelée, le mouvement d'eau est minimal puisque la présence de lentilles de glace coupe l'apport en eau.

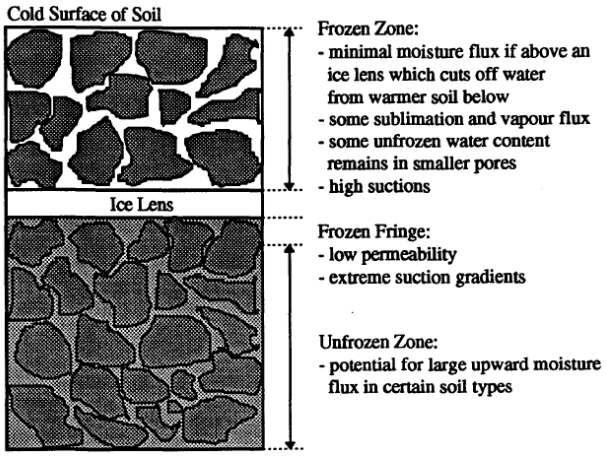


Figure 2-9 : Définition des différentes zones d'un sol gelé d'après Miller (1972) et Harlan (1973)

2.3.2 Processus liés au gel-dégel

En période de gel, la diminution de la température de l'air cause la diminution de la température du sol en surface. Un gradient thermique se développe entre la surface qui est plus froide et le sol sous-jacent, causant un transfert de chaleur par conduction et convection. Lorsque la température du sol diminue sous le point de congélation de l'eau interstitielle, une partie de cette eau gèle et relâche de la chaleur latente dans le système en raison du changement de phase. La quantité d'eau liquide qui diminue créé des pressions négatives dans le sol. Ces pressions négatives causent un déplacement de l'eau liquide des régions avoisinantes vers le front de gel, phénomène appelé cryosuccion. Cette eau gèle à son tour et relâche de la chaleur latente. Le relâchement de chaleur latente s'oppose au refroidissement du sol et cause le maintien de la température du sol aux alentours de 0°C pour une certaine période de temps. Pour permettre le refroidissement, une quantité importante de chaleur latente doit être enlevée du sol. Ce phénomène, appelé phase zéro, se produit proche du front de gel, dans la plupart des sols organique ou minéral, de partiellement saturés à saturés (Outcalt et al., 1990).

Lorsque le sol atteint une température de 0°C, une partie de l'eau gèle instantanément. Une autre partie de l'eau qui est adsorbée autour des particules du sol ou présente dans les pores suffisamment fins du sol reste sous forme liquide (Spaans et Baker, 1996). Une température plus basse est nécessaire pour faire geler l'eau contenue dans les pores fins où l'on retrouve de minces films d'eau adsorbée. Ce comportement de l'eau non gelée peut être représenté par la courbe de gel, qui décrit l'évolution de la teneur en eau volumique non gelée en fonction de la température. Des courbes de gel typique pour un sol grossier et pour un sol fin sont présentées à la Figure 2-10. Des travaux de Williams (1967), basés sur 4 types de sols, ont montrés qu'à -3°C, la teneur en eau volumique non gelée variait d'environ 0,03 dans un silt et jusqu'à 0,25 dans une argile. De son côté, Watanabe (2011) a trouvé que la majorité de l'eau dans un sable gèle à -1 °C, tandis qu'un loam et un loam silteux garde une teneur en eau volumique non gelée d'environ 0,1, même à des températures de -20°C (Watanabe et al., 2011). De plus, la présence de sel minéraux et d'ions dissous dans l'eau peut affecter la progression du gel dans le sol en abaissant le point de congélation (Davé et al., 1996). Elberling (2001) a mesuré des valeurs de teneur en eau non gelées à une profondeur de 20 cm dans des résidus miniers qui allaient jusqu'à une valeur de 0,10 à des températures de -10°C et des teneurs en eau volumique non gelées d'environ 0,05 ont été

mesurées pour des résidus miniers à des températures inférieures à -3 °C (MEND, 1998). Dans les deux cas, des ions dissous provenant de l'oxydation des sulfures étaient rencontrés dans les eaux interstitielles.

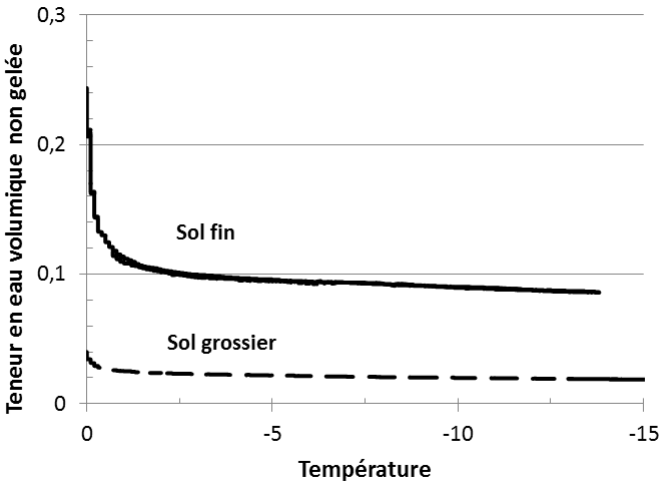


Figure 2-10 : Courbe de gel typique d'un sol fin et d'un sol grossier

Il peut également y avoir lors de la formation de la glace une expulsion des sels minéraux dissous, menant à une concentration de ces minéraux, phénomène appelé cryoconcentration (Banin et Anderson, 1974). Cette expulsion abaisse davantage la température de gel de l'eau liquide dans le sol.

2.4 Lois de comportement thermo-hydrique

Des lois existent afin de décrire le comportement thermique et hydrique des sols saturés et non saturés. Elles intègrent les propriétés thermiques et hydrogéologiques propres à chaque matériau. La section suivante présente quelques propriétés thermiques et hydrogéologiques influençant le comportement thermique et hydrique du recouvrement et des résidus. Ensuite, les équations décrivant l'écoulement de l'eau, le transfert de chaleur et le comportement couplé de transfert d'eau et de chaleur dans les sols saturés et non saturés pour les états non gelés et gelés seront abordées.

2.4.1 Propriétés des matériaux

Les paramètres thermiques et hydrogéologiques des résidus et des matériaux de recouvrement influencent la vitesse à laquelle les transferts d'eau et de chaleur se produisent dans le recouvrement et dans les résidus. Les propriétés thermiques influençant le transfert de chaleur dans le sol sont la conductivité thermique (λ), la chaleur spécifique (c), la diffusivité thermique (α) et la chaleur latente de fusion (L_f). Ces paramètres sont décrits plus en détails au Tableau 2.2. Différentes techniques existent pour déterminer la conductivité thermique des matériaux en laboratoire. Deux techniques sont utilisées dans ce travail et seront présentés au chapitre 3.

Tableau 2.2 : Propriétés thermiques des matériaux

Paramètres thermiques	**Définition**	**Équation**
Conductivité thermique (λ)	Quantité de chaleur qui passe au travers d'une section de matériau par unité de temps, sous l'effet d'un gradient de température (W/m°C)	$\lambda = \frac{qL}{(T_2 - T_1)}$ q = flux de chaleur (W/m^2) L = longueur de l'écoulement (m) T = température (°C)
Chaleur spécifique (c)	Quantité de chaleur requise pour faire augmenter la température d'une masse de sol de 1°C (J/g°C)	$c = \frac{1}{m}(c_s m_s + c_w m_w + c_i m_i + c_{\text{air}} m_{air})$ m = masse de sol (g) ; sol ; w = eau ; i = glace ; u = eau non gelée ; air = phase gazeuse c_s=1,8 J/g°C ; c_w = 4,18 J/g°C ; c_i = 2,1 J/g°C; c_a≈ 0 J/g°C
Diffusivité thermique (α)	Indice représentant la facilité relative avec laquelle un matériel peut changer de température (m^2/s)	$\alpha = \frac{\lambda}{c}$ λ = conductivité thermique (W/m°C) c = chaleur spécifique (J/g°C)
Chaleur latente de fusion (L_f) et de vaporisation (L_v)	Quantité d'énergie relâchée ou absorbée lors du changement de phase de l'eau solide à liquide (L_f) et de liquide à gazeux (L_v) (kJ/kg)	L_f = 333,7 kJ/kg L_v=2 375 kJ/kg

La conductivité thermique en fonction du degré de saturation peut être prédite par le modèle général de conductivité thermique de Côté et Konrad (2005). Ce modèle, présenté aux équations 2.8 à 2.11, prédit la conductivité thermique avec une erreur estimée à ± 20 %.

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})\lambda_r + \lambda_{dry} \quad [2.8]$$

Dans cette équation, les conductivités thermiques saturée (λ_{sat}), sèche (λ_{dry}) et normalisée (λ_r) sont décrites selon les équations 2.9 à 2.11. La teneur en eau volumique non gelée et la conductivité thermique des solides s'expriment par les symboles θ_u et λ_s.

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \times 2.24^{n-\theta_u} \times 0.6^{\theta_u} \quad [2.9]$$

$$\lambda_{dry} = \chi \times 10^{-\eta n} \quad [2.10]$$

$$\lambda_r = \frac{\kappa S_r}{1+(\kappa-1)S_r} \quad [2.11]$$

Les paramètres χ et η prennent en compte l'effet des particules sur la conductivité thermique. Un sol naturel aura des particules arrondis, un sol concassé des particules angulaires et un sol organique des particules fibreuses. Les valeurs des paramètres ont été déterminées avec une régression à partir de la relation entre la porosité et λ_r. Le paramètre empirique κ varie selon le type de sol (gravier et sable grossier, sable moyen et fin, sol silteux et argileux et les sols organique fibreux). Une régression utilisant l'équation 2.11 a permis de déterminer la valeur du paramètre κ pour les différents types de sol à l'état non gelé et gelé. Le Tableau 2.3 présente les valeurs des paramètres η, χ et κ pour différents types de sol pour le calcul de la conductivité thermique gelée (λ_f) et non gelée (λ_u). Plus détails sur la définition des paramètres peuvent être trouvés dans l'article de Côté et Konrad (2005a).

Tableau 2.3 : Paramètres utilisés pour le calcul de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation (d'après Côté et Konrad, 2005)

	η	χ	κ	
			Non gelé	gelé
Roches concassées et graviers	1,80	1,70		
Sol naturel minéral	1,20	0,75		
Sol organique fibreux	0,87	0,30	0,60	0,25
Gravier et sable grossier			4,60	1,70
Sable moyen et fin			3,55	0,85
Sol silteux et argileux			0,60	0,25

La conductivité thermique des solides (λ_s) peut être estimée avec la méthode de la moyenne géométrique généralisée (éq. 2.12) basée sur la minéralogie du matériel lorsque connue et sur la conductivité thermique des minéraux présents.

$$\lambda_s = \prod_{j=1}^{z} \lambda_{mj}^{x_j} \qquad [2.12]$$

Où $\prod$ est le produit des conductivités thermiques λ_m des minéraux de l'échantillon à la puissance de la proportion volumique du minéral (x_j), où la somme des proportions volumiques est égale à 1.

Ensuite, les propriétés hydrogéologiques affectant le mouvement de l'eau dans le sol sont la conductivité hydraulique (k_w) et la courbe de rétention d'eau (CRE). La conductivité hydraulique ainsi que la courbe de rétention d'eau peuvent être mesurées à l'aide d'essais en laboratoire, qui seront expliqués plus en détail au chapitre 3. Il existe des modèles prédictifs pour définir la conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) ainsi que la courbe de rétention d'eau basés sur les propriétés géotechniques de base des sols. Ils sont utilisés en première analyse et ils sont faciles d'utilisation, rapides et peu couteux. Il existe plusieurs modèles de prédiction pour évaluer k_{sat} (Hazen 1911; Kovacs, 1981; Hennings, 1996). Le modèle de Kozeny Carman modifié (KCM) est souvent utilisé pour déterminer la conductivité hydraulique saturée des résidus miniers (Mbonimpa et al., 2006). Ce modèle est présenté à l'équation 2.13 pour les sols pulvérulents, où C_U est le coefficient d'uniformité, γ_w est le poids volumique de l'eau et χ, C_p, C_G sont des constantes du modèle.

$$k_{sat} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_U^{1/3} D_{10}^2 \qquad [2.13]$$

Le modèle prédictif de Kovaks modifié (MK) peut être utilisé pour prédire la CRE des résidus miniers (Aubertin et al., 1998; Aubertin et al., 2003). Ce modèle utilise les propriétés géotechniques de base du matériel pour déterminer la CRE. Les équations de base du modèle sont présentées aux équations 2.14 à 2.19, où h_{C0} est la remontée capillaire équivalente, ψ est la succion matricielle et ψ_r la succion résiduelle, m est un coefficient de la distribution de taille des pores ($m=1/C_U$), $\psi_o = 10^7$ cm, $a_c = 0{,}01$, $\psi_n = 1$ cm, b est un paramètre du modèle et D_H est le diamètre équivalent des grains (éq. 2.5).

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \langle 1 - S_c \rangle \qquad [2.14]$$

$$S_a = a_c \left(1 - \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+\psi_0/\psi_r)}\right) \frac{\ln(h_{CO}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}} \qquad [2.15]$$

$$S_c = 1 - \left(\left(\frac{h_{CO}}{\psi}\right)^2 + 1\right)^m \exp\left(-m\left(\frac{h_{CO}}{\psi}\right)^2\right) \qquad [2.16]$$

$$h_{CO} = \frac{b}{eD_{10}} \qquad [2.17]$$

$$b = \frac{0{,}75\cos(\beta_d)}{1+1{,}17log(C_U)+1} \qquad [2.18]$$

$$\psi_r = \frac{0{,}42}{(eD_H)^{1{,}26}} \qquad [2.19]$$

La valeur du paramètre β_d est assumé également à 0 pour des sols en drainage dans l'article d'Aubertin et al. (2003). Il est connu que la relation entre la succion et la teneur en eau volumique (la CRE) n'est pas unique et peut dépendre des conditions du sol (mouillage ou drainage); ce phénomène est appelé effet d'hystérésis. Il est possible de prendre en compte l'effet d'hystérésis, en considérant l'effet de l'angle de contact β_d comme le principal mécanisme causant l'hystérésis (Maqsoud et al., 2012). Un angle de contact variant entre 30° et 80° est retrouvé dans la littérature pour les sols en mouillage. Un angle de contact de 60° semble approprié pour prédire les effets d'hystérésis pour le sable (Maqsoud et al., 2012).

Également, des modèles descriptifs permettent de tracer la CRE à partir des points de données ψ - θ_u obtenues sur le terrain ou en laboratoire. Le modèle de van Genuchten (1980) est de ceux les plus fréquemment utilisé, où m_v, n_v et α_v sont des constante d'ajustement du modèle.

$$\theta = \left[\frac{1}{1+(\alpha_v\psi)^{n_v}}\right]^{m_v} \qquad [2.20]$$

2.4.2 Équations d'écoulement d'eau

En milieu saturé, l'eau s'écoule en réponse au gradient hydraulique et proportionnellement à la conductivité hydraulique saturée. La loi de Darcy (éq. 2.21) décrit ce comportement (Fredlund et Rahardjo, 1993), où q_w exprime le débit spécifique d'eau et z la profondeur.

$$q_w = -k_{sat}\frac{\partial h_w}{\partial z} \qquad [2.21]$$

Cette loi peut être généralisée pour les écoulements en milieu partiellement saturé, avec la loi de Richard (éq. 2.22). Dans ce type de milieu, l'eau s'écoule selon le gradient hydraulique en place et selon la fonction de perméabilité $k_w(\psi)$. La fonction de perméabilité décrit la variation de la conductivité hydraulique en fonction de la succion *(ψ)* dans le sol non saturé. En effet, lorsqu'il y a présence d'air dans le sol, cela crée des obstacles à l'écoulement de l'eau, diminuant ainsi la conductivité hydraulique du sol. L'écoulement de l'eau est soumis aux lois de continuité et de conservation de la masse (éq. 2.23). Ainsi, la différence entre ce qui entre et ce qui sort du système correspond à la variation de l'emmagasinement d'eau dans le sol, qui affecte directement la teneur en eau volumique (Fredlund et Rahardjo, 1993).

$$q_w = -k_w(\psi)\frac{\partial h_w}{\partial z} \qquad [2.22]$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = -\nabla \cdot q_w \qquad [2.23]$$

L'équation de Richard combiné avec l'équation de conservation de masse donne une équation pour décrire l'écoulement de l'eau en milieu anisotrope non saturé en 3 dimensions (éq. 2.24) (Fredlund et Rahardjo, 1993).

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla(k_w(\psi)\nabla h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(k_{w,x}(\psi)\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{w,y}(\psi)\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{w,z}(\psi)\frac{\partial h}{\partial z}\right) \qquad [2.24]$$

En plus de l'écoulement de l'eau liquide dans le sol partiellement saturé, il peut y avoir des transferts de vapeur d'eau dans le sol. Ce type d'écoulement est contrôlé par le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau D_v, par un facteur de tortuosité Ω, par la teneur en air volumique θ_a et par la masse volumique de la vapeur d'eau ρ_v. La loi de Fick décrit le mouvement de la vapeur d'eau dans le sol (éq. 2.25), où q_v est le taux de transfert de vapeur d'eau dans le sol.

$$q_v = -D_v\Omega\theta_a\frac{d\rho_v}{dz} \qquad [2.25]$$

La masse volumique de la vapeur d'eau varie avec la température et avec la succion dans le sol. L'équation 2.26 peut donc être modifiée pour obtenir l'équation 2.31.

$$q_v = -D_v \Omega \theta_a \frac{\partial \rho_v}{\partial T}\frac{dT}{dz} - D_v \Omega \theta_a \frac{\partial \rho_v}{\partial \psi}\frac{d\psi}{dz} \qquad [2.26]$$

Joshi et al. (1993) ont présenté une équation pour les sols non saturés qui prend en compte le transfert de l'eau sous forme liquide causé par le gradient hydraulique et l'élévation ainsi que le transfert d'eau sous forme de vapeur d'eau par les gradients de température et de succion. La formulation de Joshi (1993) est présentée à l'équation 2.27. La variation de ρ_v selon la température et la succion est pris en compte dans cette équation avec les paramètres D_1 et D_2 du modèle.

$$m_2^w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_w \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\psi}{\rho_u g} + z\right)\right) + \frac{1}{\rho_u}\frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad [2.27]$$

Le paramètre m_2^w représente la pente de la courbe de rétention d'eau. D_1, D_2 sont définis par les équations 2.28 et 2.29, où P_v est la pression partielle due à la vapeur d'eau, D_v est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau, W est la masse molaire de l'eau (18 g/mole), h_r est l'humidité relative et ρ_w est la masse volumique de l'eau.

$$D_1(\mathrm{m^3 s/kg}) = \frac{1}{\rho_w} D_v \left(\frac{\rho_v W}{\rho_w R T}\right) \qquad [2.28]$$

$$D_2(\mathrm{m^2/°C \cdot s}) = \frac{1}{\rho_w} D_v \left(\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} h_r - \frac{\rho_v \psi W}{\rho_w R T^2}\right) \qquad [2.29]$$

Newman (1995) a modifié l'équation de Joshi et al. (1993) pour l'appliquer à des sols gelés ou partiellement gelés. Pour ce faire, il a utilisé l'équation de continuité de la phase aqueuse dans un sol partiellement gelé (éq. 2.30). A l'équation 2.30, le terme θ_u exprime la teneur en eau non gelée et θ_w exprime la teneur en eau totale.

$$\theta_w = \theta_u + \frac{\rho_i}{\rho_w}\theta_i \qquad [2.30]$$

L'équation de continuité représente le changement de la teneur en eau du sol, et peut être substituée dans le terme de gauche dans l'équation de transfert de masse (éq. 2.27). Ensuite, lorsque le sol est gelé, la teneur en eau non gelée peut être déterminée avec la courbe de gel du sol, correspondant à la variation de la teneur en eau non gelée selon la température du sol gelé. Le terme m^i_2, utilisé à l'équation 2.31, représente la pente de la courbe de gel du sol. Avec la pente

de la courbe de gel du sol et avec l'équation de continuité, l'équation 2.27 peut être réécrite sous la forme de l'équation 2.31.

$$m_2^i \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_w \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\psi}{\rho_w g} + z\right)\right) + \frac{1}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad [2.31]$$

L'équation 2.31 exprime le transfert d'eau dans un sol en période de gel. Le premier terme à droite de l'équation exprime l'écoulement de l'eau sous la force du gradient hydraulique et de l'élévation et le deuxième terme à droite exprime la diffusion de la vapeur d'eau causé par la pression et la température.

2.4.3 Équations de transfert de chaleur

Plusieurs mécanismes de transfert de chaleur sont présents dans les sols. Le principal est la conduction. La loi de Fourrier (éq. 2.32) décrit le flux de chaleur (q) généré sous l'influence d'un gradient thermique dans le sol comme étant le produit de la conductivité thermique et du gradient en régime permanent.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [2.32]$$

En régime transitoire, le transfert de chaleur par conduction est donné par l'équation 2.33, où le terme de gauche représente l'emmagasinent de chaleur dans le sol.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad [2.33]$$

Également, il existe plusieurs autres processus qui causent la migration de fluide dans les sols gelés et qui peuvent influencer le régime thermique de façon importante (Kane et al., 2001). Parmi ces processus, on retrouve les transferts de chaleur sensible par convection libre, engendrés par la différence de densité d'un fluide, et par convection forcée d'un fluide, causée par un gradient de pression. Également, on retrouve le transfert de chaleur latente causé par les changements de phase de l'eau entre l'état solide et liquide et causé par la vaporisation de l'eau. La plupart des analyses de transfert de chaleur considère que la conduction est le seul mécanisme de transfert de chaleur dans le sol, ce qui est souvent une hypothèse acceptable. Dans le présent travail, on présente l'équation de transfert de chaleur de Newman (1995) pour les sols non saturés (éq. 2.34), modifiée de l'équation de Joshi et al. (1993). Cette équation considère le transfert de

chaleur par conduction ainsi que l'effet de la chaleur latente causée par les changements de phase entre l'état liquide et solide de l'eau (L_f) et causé par la vaporisation de l'eau (L_v).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t}\right) - L_v \frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) + L_f \rho_w \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \qquad [2.34]$$

2.4.4 Équation couplée d'écoulement d'eau et de transfert de chaleur

Il existe deux approches de modélisation des sols gelés. La première est la modélisation de la température en posant comme hypothèse que l'eau est statique dans le sol. Il a été prouvé en laboratoire et sur le terrain que ce type de modélisation ne représente pas bien la température dans un sol partiellement gelé, puisque la migration de l'eau affecte la température dans le sol (Jame and Norum, 1980). Le deuxième type de modélisation est celui qui prend en considération simultanément les relations de transfert d'eau et de chaleur. Pour ce faire, il faut coupler les équations présentées précédemment afin d'obtenir une équation à résoudre numériquement. Il a été décidé de présenter dans ce travail les équations développées par Newman (1995) utilisés dans le logiciel SoilCover (NEDEM, 1993), puisqu'il utilise une approche différente des autres auteurs et qui peut être utilisé pour tous types de sol.

Les équations 2.31 et 2.34 de Newman (1995) expriment le mouvement de l'eau et de chaleur dans les sols gelés et partiellement gelés. Afin de relier les deux équations ensembles, l'équation de transfert d'eau (éq. 2.35) est réarrangée pour mettre en évidence le terme de la variation de la teneur en glace.

$$\frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_w \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\psi}{\rho_w g} + z\right)\right) + \frac{1}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) - m_2^i \frac{\partial T}{\partial t} \qquad [2.35]$$

Dans le but d'obtenir une seule équation exprimant le comportement thermo-hydrique du sol, l'équation 2.35 est insérée dans l'équation du transfert de chaleur en substituant le terme de la teneur en glace. La nouvelle équation est présentée ci-dessous à l'équation 2.36.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t}\right) - L_v \frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) + L_f \frac{{\rho_w}^2}{\rho_i}\frac{\partial}{\partial z}\left(k_w \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\psi}{\rho_w g} + z\right)\right)$$

$$+ L_f \frac{\rho_w}{\rho_i}\frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_2 \frac{\partial T}{\partial z}\right) - L_f \frac{{\rho_w}^2}{\rho_i} m_2^i \frac{\partial T}{\partial t} \qquad [2.36]$$

Cette équation contient 2 inconnues, soit la succion et la température. Afin de résoudre ce problème, Newman (1995) propose d'utiliser la courbe de gel et la courbe de rétention d'eau du sol lorsqu'elles sont connues. En divisant la pente de la courbe de gel avec la pente de la courbe de rétention d'eau (éq. 2.37), il est possible d'obtenir la relation entre la succion et la température pour tous types de sol en période de gel. G exprime le ratio entre le changement de succion et de température du sol gelé pour une teneur en eau donnée.

$$\frac{\partial\psi}{\partial T} = \frac{m_2^i}{m_2^w} = \frac{\partial\theta_u}{\partial T}\frac{\partial\psi}{\partial\theta_u} = G \qquad [2.37]$$

Avec ce ratio, il est possible d'éliminer la succion comme inconnue dans l'équation 2.36, ce qui donne l'équation 2.38, avec la température comme seule inconnue.

$$\frac{\partial T}{\partial t}\left(\rho c + L_f\frac{{\rho_w}^2}{\rho_i}m_2^i\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial t}\right) - \left(L_v - L_f\frac{\rho_w}{\rho_i}\right)\frac{\partial}{\partial z}\left(D_1 G\frac{\partial T}{\partial z} + D_2\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$+L_f\frac{{\rho_w}^2}{\rho_i}\frac{\partial}{\partial z}\left(k_w G\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{T}{\rho_w g} + z\right)\right) \qquad [2.38]$$

L'équation précédente exprime le comportement couplé de transfert d'eau et de chaleur dans un sol non saturé en période de gel. Le terme à gauche de l'équation exprime la chaleur spécifique apparente, prenant en compte les changements de phase dans le sol. Le premier terme à droite exprime le transfert de chaleur par conduction, le deuxième exprime la chaleur latente nette enlevée du système par les changements de phases de l'eau de liquide à vapeur et de liquide à solide. Le troisième terme exprime le dégagement de chaleur latente engendré par l'écoulement de l'eau dans le système.

2.5 Méthodes d'évaluation de la performance de recouvrement isolant

Pour évaluer la performance d'un recouvrement isolant, deux principales méthodes peuvent être utilisées : la méthode par profil de température et la méthode par tests de consommation d'oxygène. La méthode par profil de température est utilisée plus couramment, tandis que la méthode par consommation d'oxygène est en développement. Elle a cependant été fréquemment

utilisée pour évaluer la réactivité de résidus miniers non recouverts, autant en climat tempéré que nordique.

2.5.1 Méthode par profil de température

La technique par profil de température consiste à mesurer le profil de température *in situ* du recouvrement isolant et des résidus sur plus d'un an. Ce profil de température permet de vérifier l'évolution de la température et de vérifier la profondeur de dégel annuel. Le but étant de maintenir les résidus à une température inférieure à une certaine température donnée, variant selon les caractéristiques de chaque site, afin d'empêcher la réaction d'oxydation de se produire. La Figure 2-11 présente un exemple d'une évaluation de l'efficacité d'un recouvrement isolant basé sur le profil de température. On observe sur cette figure l'évolution du profil de température à chaque mois, de novembre 2001 à octobre 2002. Les résidus se sont maintenus à une température égale ou inférieure à 0°C. Basé sur le critère de 0°C, le recouvrement serait efficace. Par contre, il a été vu aux sections précédentes que les résidus miniers peuvent encore s'oxyder et générer du DMA à des températures sous 0°C. Si on prend le critère de température des résidus de -5°C, tel que proposé par Kyhn et Elberling (2001), le recouvrement ne serait pas considéré comme efficace pour limiter le DMA sur toute l'année.

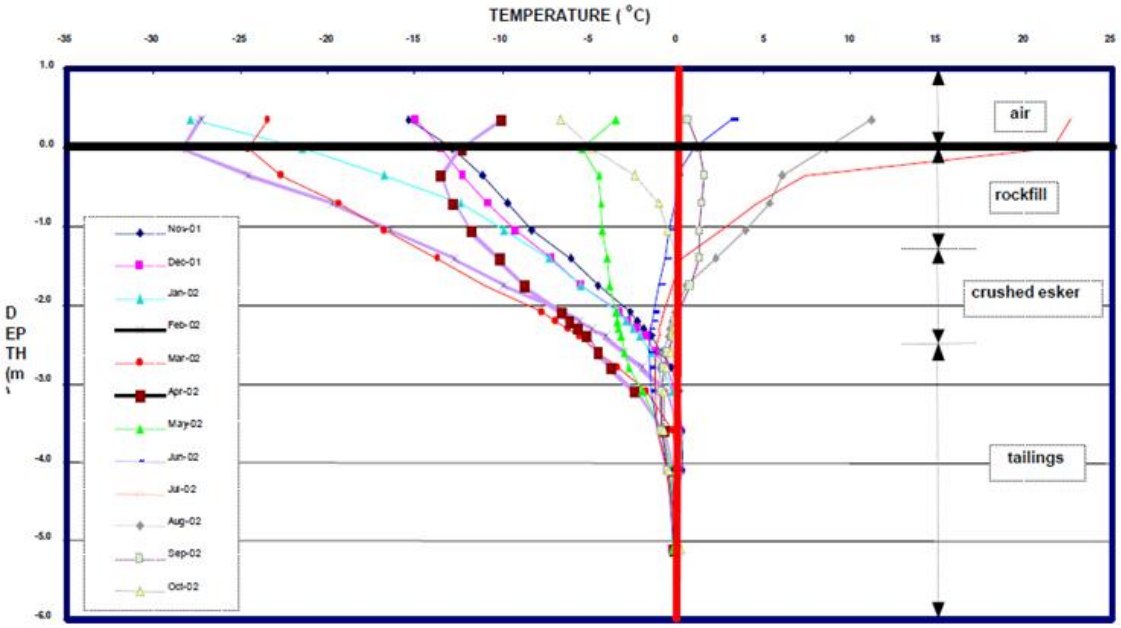


Figure 2-11 : Profil de température dans le recouvrement isolant et dans les résidus minier (tiré d'Holubec, 2004)

Afin de compléter l'évaluation par profil de température, l'étude est parfois appuyée par une modélisation thermique. Le modèle thermique, calibré à partir des données qui sont collectées sur le terrain, permet de tester différents scénarios de recouvrement et de choisir le meilleur scénario. Il permet également de prédire le comportement thermique à long terme et d'inclure les effets du réchauffement climatique. Les mines Rankin Inlet, Nanisivik et Raglan ont utilisés la méthode par profil de température pour évaluer l'efficacité de différents scénarios de recouvrement isolant. Les sites miniers ainsi que la méthodologie employée par ceux-ci pour évaluer la performance de recouvrement isolant sont présentés dans ce qui suit.

Mine Rankin Inlet

La mine de Rankin Inlet est située au Nunavut, Canada, à la hauteur du 62° parallèle, dans la zone de pergélisol continu. La température annuelle moyenne de l'air est de -11°C, la température annuelle moyenne du sol est de -7°C à -8°C et l'épaisseur de la couche active est évaluée en moyenne à 1,5 m d'épaisseur dans le gravier et le till (Meldrum et Jamieson, 2001). La mine a opéré de 1957 à 1962 afin d'extraire un minerai de nickel et de cuivre et des éléments du groupes platine. Durant ce temps, elle a produit 297 000 tonnes de résidus miniers qui ont été entreposés dans trois parcs à résidus. Les résidus de Rankin Inlet sont très réactifs avec un contenu en pyrrhotite variant de 5 à 20 % avec des traces de pyrite, de chalcopyrite et de pentlandite. Les résidus étaient fréquemment inondés vu la proximité de la baie d'Hudson et la faible élévation du site, ce qui a causé une augmentation de la salinité de l'eau interstitielle des résidus à 52 mg/l. Meldrum et Jamieson (2001) ont déterminé un abaissement du point de congélation des résidus de 4°C. Cette température correspond au point où la formation de glace est visible dans les résidus. Des travaux de restauration ont été menés entre 1992 et 1994. Les résidus ont été stockés dans un bassin appelé le Deep Pond et ont ensuite été recouverts de 1 m de gravier et de sable, afin de les rendre chimiquement inertes par leur encapsulation dans le pergélisol (Erickson, 1995).

Une étude débutée en 1997 a permis d'étudier le régime thermique et la progression du gel dans les résidus restaurés (Meldrum, 1998; Meldrum et Jamieson, 2001). En mars 1997, des câbles de thermistances ont été installés à divers endroits dans le Deep Pond. L'interprétation du profil de température dans les résidus a été effectuée sur la base de trois critères :

- 0°C représente le point de gel normal de l'eau;

- -2°C représente la température à laquelle une très faible réactivité des résidus est prévue (Meldrum et Jamieson, 2001);
- -4°C est la température à laquelle la formation de glace apparait.

Un profil de température mesuré dans les résidus au milieu du Deep Pond montre que les résidus à 11 m de profondeur, quatre ans après leur mise en place dans le Deep Pond, ont atteint une température de -1,7°C, température à laquelle il y a encore de l'oxydation potentielle. En effet, selon Meldrum et Jamieson (2001), l'oxydation des résidus est significativement réduite à partir de -2°C. Également, une modélisation thermique a été menée par Meldrum et Jamieson (2001) afin de prévoir l'évolution de la température dans les résidus. Selon cette simulation, les résidus dans la partie la plus profonde du parc à résidus auraient une température de -2°C, 7 ans après leur mise en place dans le Deep Pond et la température atteindrait -4 °C après 15 ans. Des mesures prises sur le terrain 4 ans après la mise en place des résidus montrent que le gel progresse plus vite que prédit par la simulation. La progression du gel plus rapide pourrait être expliquée par une teneur en eau réelle dans les résidus qui serait plus faible que celle assumée dans la modélisation.

Mine Nanisivik

La mine Nanisivik est localisée dans le nord de l'ile de Baffin, au Nunavut. La température moyenne de l'air annuelle y est de -15°C et les précipitations annuelles moyennes y sont de 280 mm (Cassie et al., 2009). La mine a opérée de 1976 à 2002 pour produire un concentré de zinc et de plomb. Les résidus sont potentiellement générateurs d'acide et contiennent environ 80% de pyrite et 20% de dolomite avec des traces de galène et de sphalérite. Les résidus ont été déposés sous l'eau dans le West Twin Lake jusqu'en 1991. Ensuite, une digue a été construite afin d'augmenter la capacité de stockage du parc à résidus. On retrouve le nouvel espace de stockage à l'ouest de la digue, appelé la Surface Cell. À l'est de la digue, on retrouve le Reservoir, où le niveau originel du lac est maintenu et qui peut servir de lieu de déposition d'urgence pour les résidus. La Surface Cell et le Reservoir forment le West Twin Disposal Area (WTDA). Un recouvrement permettant d'intégrer les résidus miniers au pergélisol a été proposé pour restaurer la Surface Cell. Afin de choisir la meilleure configuration de recouvrement, cinq types de recouvrement ont été étudié entre 1990 et 1997 à l'aide de parcelles expérimentales. L'évolution de la température dans les parcelles expérimentales était mesurée avec un câble de thermocouples

installé au milieu des parcelles. De plus, la profondeur de dégel (couche active) était mesurée dans les parcelles expérimentales à l'aide de jauge de gel. Les jauges de gel sont des tubes transparent de 2200 mm de long avec un diamètre extérieur de 20 mm, remplit avec un mélange d'eau et de bleu de méthylène. Le mélange devient incolore lorsqu'il est gelé. La jauge est installée dans un tubage en plastique de 25 mm diamètre. Il est possible de mesurer l'avancement du front de dégel en mesurant la longueur du mélange incolore gelé à la base de la jauge de gel. Plus de détails sur le programme expérimental sont disponibles dans le rapport de Holubec (2004). A la suite d'un suivi sur plusieurs années, il est apparu que le recouvrement où la plus faible couche active se développait (moins de 1 m) était le recouvrement composé de shale recouvert de 0,3 m de sable et gravier avec une zone saturée riche en glace à la base du recouvrement (Claypool et al., 2009). Les résultats du programme expérimental ont été intégrés dans un modèle thermique afin de développer un scénario de recouvrement optimal prenant en compte les changements climatiques. Les résultats de la modélisation ainsi que la performance des cellules expérimentales ont conduit au choix d'un scénario de restauration composé de 1 m de shale granulaire recouvert de 0,25 m de matériel granulaire grossier. Basé sur les résultats de la modélisation, ce recouvrement serait efficace pour une période de récurrence de chaleur extrême 1 :100 ans, pour une température de gel des résidus de 0°C.

Pour le même site, l'effet de trois différentes épaisseurs de recouvrement sur la température des résidus a été étudié (Kyhn et Elberling, 2001). Des épaisseurs de 1 m, 2 m et 3 m de shale ont été modélisés avec le logiciel WinSoil afin d'évaluer l'efficacité du recouvrement isolant proposé. La température des résidus visée était de -5°C afin d'empêcher l'oxydation des résidus. La simulation a montré que les trois épaisseurs de recouvrement ne permettraient pas de garder les résidus à une température inférieur à -5°C tout au long de l'année. Ainsi, selon cette méthode d'évaluation, le recouvrement ne serait pas efficace pour contrôler la réactivité des résidus en considérant qu'ils sont inertes à partir d'une température de -5°C. Cette étude a également montré qu'un couvert de neige d'une épaisseur de 5 cm sur le recouvrement isolant peut affecter de façon significative le profil thermique des résidus sous-jacents.

Le recouvrement a été mis en place en 2004 et 2005. Le site est actuellement suivi à l'aide de thermistances et de jauges de gel afin d'évaluer la performance du recouvrement installé. Les données mesurées en 2008, 3 ans après la mise en place du recouvrement, montrent que la couche active, basé sur une température de 0°C, pénètre de 1,1 m dans le recouvrement au début de

juillet, soit à 0,15 m au-dessus des résidus. Le recouvrement est complétement gelé à la fin du mois de septembre (Claypool et al., 2009). Également, un suivi de la qualité des eaux de ruissellement de la Surface Cell et de la sortie du Reservoir a été effectué. Une concentration plus élevé en zinc a été mesurée dans les deux années suivant la mise en place du recouvrement et ensuite la teneur en zinc est demeurée faible au déversoir de la Surface Cell, sous la valeur de 0,06 mg/L en 2007 et 2008. La teneur en zinc respecte la norme de la moyenne mensuelle de 0,25 mg/L à la sortie du Reservoir pour les années 2004 à 2008. Selon les données de qualité d'eau du site, le recouvrement isolant utilisé pour restaurer la Surface Cell semble efficace pour limiter la génération de drainage minier acide.

Mine Raglan

Le site Minier Raglan, localisé dans le nord du Québec, a débuté ses opérations en 1997 pour produire un concentré de nickel-cuivre. Les résidus miniers de ce site sont déposés sous forme de résidus filtrés dans le parc à résidus, selon la technique du *dry stack tailings* (Bussière, 2007; Davies, 2011). Plus de détails sur le site de Mine Raglan seront donnés au chapitre 3 de ce mémoire. Les résidus de la mine étant considérés comme potentiellement générateurs d'acide, il a été proposé d'intégrer les résidus dans le pergélisol comme méthode de contrôle du DMA. Dans le but de sélectionner un recouvrement isolant adéquat, une analyse thermique a été menée afin d'évaluer la hauteur maximale de la couche active pour différentes configurations et épaisseurs de recouvrement isolant. Une température des résidus de -0,5°C à l'interface recouvrement et résidus a été retenue pour la conception du recouvrement isolant. De plus, une analyse thermique a été effectuée pour sélectionner un recouvrement résistant à une période de récurrence d'un évènement de chaleur intense 1 :100 ans. Les résultats de la modélisation sont présentés au Tableau 2.4 pour 8 cas testés. Basé sur une interpolation des cas S-5 et S-7, un recouvrement d'une hauteur totale de 2,4 m, composé de 1,2 m d'esker et de 1,2 m de roche concassé, serait efficace pour maintenir la couche active dans le recouvrement pour un événement 1 :100 ans pour une température de gel de -0,5°C.

Tableau 2.4 : Modélisation thermique des différents scénarios de recouvrement du parc à résidus de Mine Raglan, tiré d'Holubec, 2004

Case	Layer Thickness, m		Total	Maximum Thaw, m	
	Esker	Rockfill	Cover, m	Avg. year	1:100 year
S-1	0.3	1.0	1.3	1.65	1.93
S-2	0.6	1.0	1.6	1.79	2.01
S-3	0.9	1.0	1.9	1.95	2.13
S-4	0.9	1.5	2.4	2.20	2.39
S-5	1.2	1.0	2.2	2.05	2.29
S-6	1.5	1.0	2.5	2.17	2.40
S-7	1.2	1.5	2.7	2.32	2.55
S-8	1.5	1.5	3.0	2.40	2.70

Afin de tester la performance du scénario de recouvrement proposé, une parcelle expérimentale de 40 m par 40 m a été construite sur le coin nord-est du parc à résidus de Mine Raglan en 2001. Le recouvrement testé est composé d'une première couche de 1,2 m de matériel 0-20 mm et d'une deuxième couche de 1,2 m de roche concassé 0-600 mm. Des thermistances ont été installées au milieu du recouvrement (T3 et T4) et aux quatre coins de la parcelle expérimentale. Les thermistances T3 et T4 mesurent la température jusqu'à une profondeur de 5,5 m. Deux thermistances de référence ont été installées, une pour mesurer les variations de température du sol naturel (T1148) et une pour mesurer les variations de température du sol naturel recouvert d'un chemin de gravier (BH1). Les mesures de température ont été prises fréquemment afin de voir l'évolution de la couche active durant l'été. L'évaluation de la hauteur de la couche active a été faite selon deux critères : la température de gel à 0°C et la température de gel à -0,5 °C (température d'abaissement du point de congélation). Basé sur un point de congélation de 0°C, la couche active moyenne, mesurée avec les données des thermistances T3 et T4, atteint une profondeur de 1,94 m en 2002 et de 1,90 m en 2003. Ensuite, basé sur un point de congélation de -0,5°C, la couche active atteint une profondeur moyenne de 2,75 m en 2002 et de 2,55 m en 2003. Ainsi, selon le critère de conception de -0,5°C, le front de dégel atteint les résidus pour l'été 2002 et 2003. Le recouvrement de 2,4 m ne permet donc pas de maintenir les résidus à une température suffisamment froide pour empêcher l'oxydation des sulfures en 2003 basé sur un critère de -0,5°C.

2.5.2 Méthode par tests de consommation d'oxygène

Sachant que l'oxydation des résidus miniers peut se produire à des températures inférieures à 0°C et ne connaissant pas la température où l'oxydation des résidus est nulle, il est préférable de ne pas se fier uniquement sur la température comme critère pour évaluer la performance d'un recouvrement isolant. C'est pourquoi une technique basée sur la mesure de la réactivité des résidus miniers *in situ* a été proposée récemment. Les détails de cette méthode sont expliqués plus en détails dans ce qui suit.

Théorie

Le flux d'oxygène passant au-travers des résidus (z=0) peut être obtenu en mesurant la diminution de la concentration en oxygène dans une chambre étanche au-dessus des résidus, en se basant sur les lois fondamentales de diffusion des gaz. Les détails de la technique du test standard de consommation d'oxygène (CO) et son interprétation sont disponibles dans les articles de Elberling et al. (1994), de Elberling et Nicholson (1996) et de Mbonimpa et al. (2011) . En résolvant la 2e loi de Fick exprimé avec un coefficient de réaction du 1er ordre en régime permanent ($\partial C/\partial t = 0$) et pour les conditions frontières $C(z = 0, t>0) = C_0$ and $C(z = \infty, t>0) = 0$, l'équation du flux d'oxygène est obtenue (équation 2.39 ; Elberling et al., 1994).

$$F_L = C_0 (K_r D_e)^{0,5} \qquad [2.39]$$

Dans cette équation, K_r est le coefficient de réaction du premier ordre pour le système (résidus), D_e est le coefficient de diffusion effectif de l'oxygène et C_0 est la concentration atmosphérique en oxygène. En résolvant l'équation de continuité de l'oxygène consommé dans la chambre étanche pour les conditions frontières $C(t=0) = C_0$, l'équation suivante est obtenue :

$$\ln(\frac{C}{C_0}) = -t(K_r D_e)^{0,5} \frac{A}{V} \qquad [2.40]$$

où A et V sont l'air et le volume de la chambre étanche, ayant une hauteur « h » appelée hauteur de dégagement. La pente de ln (C/C_0) selon le temps donne la valeur de $(K_r D_e)^{0.5}$, quand A/V est connue. Le terme $(K_r D_e)^{0.5}$ connue est insérée dans l'équation 2.39 pour évaluer le flux d'oxygène à travers de la surface des résidus. Un coefficient de corrélation R^2 peut être calculé pour déterminer si le paramètre $(K_r D_e)^{0.5}$ est fiable ou non. Un R^2 supérieur à 0,9000 est visé pour les tests. Cette technique d'interprétation analytique est applicable pour des tests de courtes durées

car le régime permanent est considéré avant et pendant le test. Une réduction de la concentration en oxygène dans le réservoir source de 2% à 3% est habituellement visée pour ce test (Tibble et Nicholson, 1997; Mbonimpa et al., 2011). On retrouve différentes hauteurs de dégagement dans la littérature : Elberling et Nicholson (1996) ont effectués des tests sur les résidus avec une hauteur de dégagement h de 2 cm pour une durée de 100 min ; Tibble et Nicholson (1997) ont menés des tests d'une durée de 1 à 2 heures avec h = 1 à 2 cm; Elberling et Langdahl (1998) ont menés des tests d'une durée de 1 h pour h = 2 cm.

Une étude récente de Mbonimpa et al. (2011) montre que l'interprétation analytique sous-estime toujours le flux d'oxygène réel. Dans son travail, Mbonimpa (2011) a calculé un ratio FR (%) qui permet de comparer les résultats de flux théorique avec les flux obtenus numériquement. Le ratio FR permet de voir si le flux d'oxygène est surestimé ou sous-estimé avec le test de CO interprété avec la méthode d'Elberling et al. (1994). Différents scénarios ont été testés en faisant varier la durée du test, le coefficient de réaction K_r, le degré de saturation et la hauteur de dégagement. Il a été démontré que ces paramètres influencent la précision du test. Les résultats présentés à la Figure 2-12 montrent que le coefficient de régression R^2 augmente avec la hauteur de dégagement. De son côté, la Figure 2-13 montre que le ratio FR augmente lorsque le degré de saturation augmente et pour une durée de test plus courte (1 h vs 4 h).

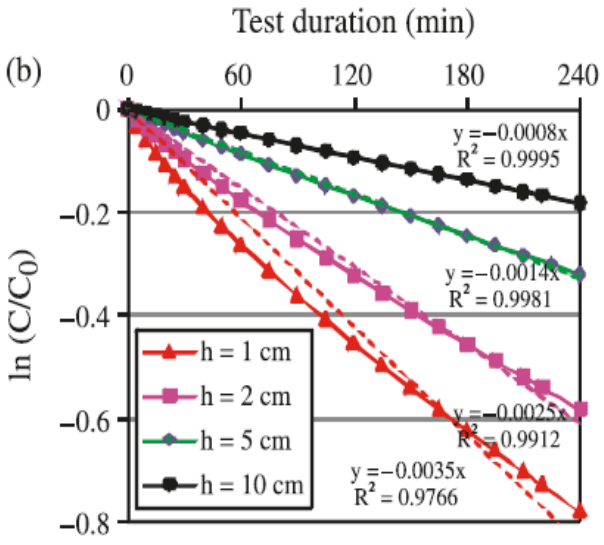


Figure 2-12 : Comparaison de différente hauteur de dégagement du réservoir source (1 cm, 2 cm, 5 cm et 10 cm (tiré de Mbonimpa et al., 2011)

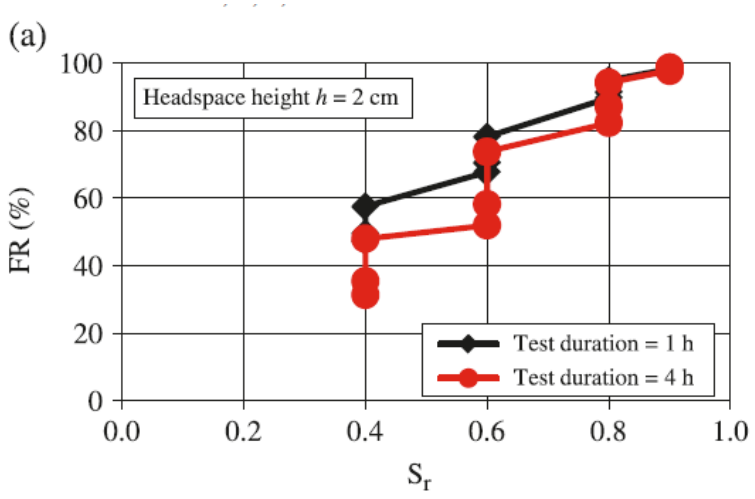


Figure 2-13 : Ratio FR pour h = 2 cm à différents degrés de saturation pour des tests d'une durée de 1 h et 4 h (tiré de Mbonimpa et al., 2011)

Le travail de Mbonimpa et al. (2011) peut être utilisé pour estimer la précision d'un test de consommation d'oxygène pour des conditions spécifiques et pour décider si l'interprétation analytique proposée par Elberling et al. (1994) est appropriée ou non.

Exemple d'utilisation de la technique

La Figure 2-14 présente le montage du test *in situ* de consommation d'oxygène de base. Le montage est composé d'un cylindre, habituellement en aluminium ou en acier inoxydable, de 15 cm de diamètre, que l'on insère dans les résidus. Un matériel non réactif est choisi pour la confection des cylindres car il ne doit pas s'oxyder et fausser le test de CO. La longueur des cylindres peut varier entre 15 et 60 cm. Des test de CO menés sur le parc à résidus de Mine Raglan par Archambault (2009) avec des cylindres de différentes longueurs (15, 30 et 45 cm) ont confirmé que l'utilisation d'un court cylindre de 15 cm ne fait pas de différence sur le résultat du test de CO et est suffisant pour empêcher l'infiltration d'oxygène par le côté du cylindre s'il est correctement installé dans le sol. Selon les travaux de Mbonimpa (Mbonimpa, 2011), la hauteur de dégagement optimale qui réduit l'erreur lors de l'interprétation analytique d'Elberling et al. (1994) est de 10 cm.

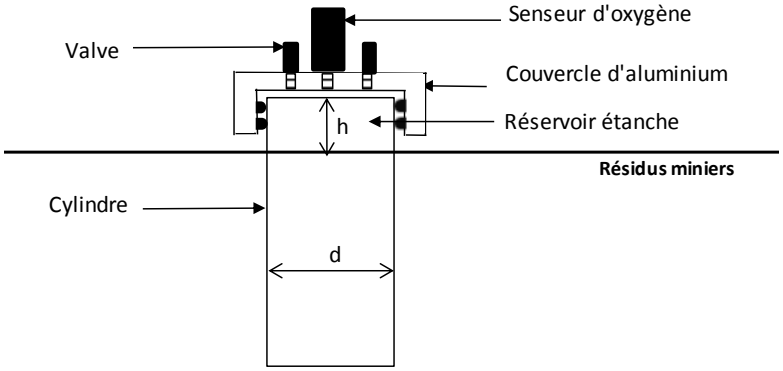


Figure 2-14 : Montage du test de consommation d'oxygène de base

Tel que mentionné auparavant, ce test a été utilisé pour évaluer la réactivité de résidus miniers par plusieurs auteurs autant en climat tempéré qu'en climat nordique. Tibble et Nicholson (1997) l'ont utilisé sur plusieurs parcs à résidus miniers afin d'évaluer la variabilité du test de consommation d'oxygène et pour monter une base de données. Le Tableau 2.5 présente les résultats obtenus pour différents sites situés au nord de l'Ontario, au nord du Québec et dans les Territoires du Nord-Ouest. Les résultats montrent une grande variabilité dans les mesures de consommation d'oxygène sur un même parc à résidus, principalement en raison des hétérogénéités géochimiques et hydrogéologiques.

Tableau 2.5: Résumé des résultats des tests de consommation d'oxygène en conditions climatiques tempérées (adapté de Tibble et Nicholson, 1997)

Site	Scénarios	Caractéristiques	Consommation d'oxygène (mol $O_2 \cdot m^{-2} \cdot year^{-1}$)	
			Gamme	Moyenne
Strathcona, Ont.	Teneur en sulfure (pyrrhotite)	1% S	16 - 21	18
		15 % S	157 - 696	426
		30% S	2178 - 4395	3440
Kidd Creek, Ont.	Temps d'exposition (25% pyrite)	< 2 ans	2 - 67	33
		3-4 ans	5 - 1617	273
		5-6 ans	1 - 518	192
		± 10 ans	17 - 328	81
Cullaton Lake, N.W.T	Recouvrement simple (8% pyrite)	Exposé	82 -128	105
		Recouvert	<1 - 33	10
LTA, Qc.	Recouvrement spécialisé	Exposé	228 - 836	517
		Recouvert	<1 - 30	7
Dona Lake, Ont.	Recouvrement avec nappe surélevé	Distant du bassin	75 - 326	204
		A côté du bassin	0 - 175	71

Pour étudier plus en détails la variabilité du test, Tibble et Nicholson (1997) ont mené 4 tests de consommation d'oxygène dans un rayon de 10 m (dans un climat tempéré). Les résultats montrent une erreur relative de 20% et 30% pour deux séries de mesure sur des résidus ayant une consommation d'oxygène entre 50 et 125 moles·m^{-2}·$year^{-1}$.

Des tests de consommation d'oxygène ont été effectués en milieu nordique afin d'évaluer le potentiel d'oxydation des résidus miniers. Le Tableau 2-6 présente des sites où le test de consommation d'oxygène a été utilisé. Des flux d'oxygène entre 44 et 730 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés aux différents sites (Elberling, 1998, 2001). En comparant ces valeurs de flux avec ceux en climat tempéré, il est possible de constater que les résidus en climat nordique peuvent s'oxyder au même taux que ceux en climat tempéré.

Tableau 2.6 : Tests de consommation d'oxygène sur des résidus miniers en climat nordique

Site	Date	Auteur	Caractéristiques	CO (moles·m^{-2}·an^{-1})
Nanisivik, NU	18-07-1998 au 28-09-1998	Elberling, 2001	Résidus bien drainés âgés de 6 ans	73 - 183
	11-1998 au 12-1998		Température des résidus entre -1 et -3°C	44 ± 7
	05-08-97 au 14-09-97	Elberling, 1998	Tests sur 30 sites sur le PAR, résidus de differentes âges	438 -730
Raglan, Qc	24-06-2009 au 29-06-2009	Archambault, 2009	Tests sur 4 sites différents	137 - 821
	23-08-2012 au 24-08-2012	Garneau, 2012	Tests sous recouvrement isolant partiel de 1,2 m	31 - 59
Cullaton lake, N.W.T	25-07-1996 au 31-07-1996	Tibble, 1997	Tests sous un recouvrement excavé	< 1-33

Test de consommation d'oxygène sous recouvrement

En condition nordique, les tests de consommation d'oxygène ont été réalisés principalement pour mesurer la réactivité des résidus miniers. Une nouvelle méthode utilisant le test de CO sous un recouvrement a été proposée pour en évaluer l'efficacité *in situ*. Cette technique a été développée et testée par Garneau (2012) sur le site de Xstrata Nickel Mine Raglan. Le montage du test de CO sous recouvrement, présenté à la Figure 2-15, est sensiblement le même que celui du test de CO de base. Quelques modifications y sont apportées afin de pouvoir mener le test de CO à partir de la surface du recouvrement et de protéger les éléments fragiles du montage. Le montage et ses composantes seront décrits en détails au chapitre 3.

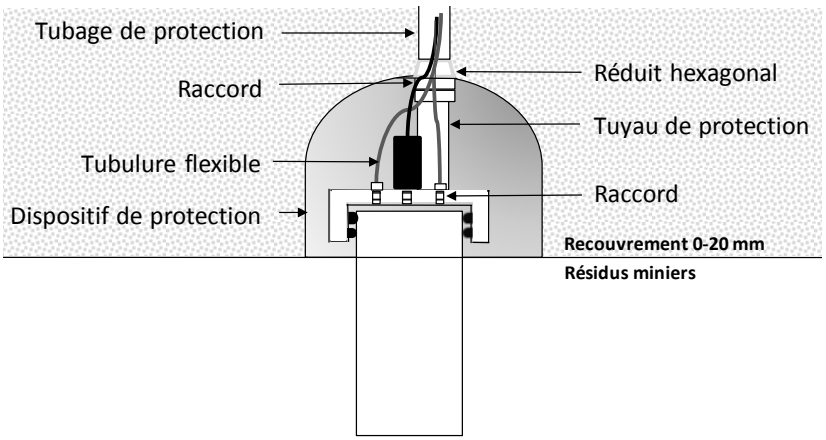


Figure 2-15 : Montage du test de consommation d'oxygène sous un recouvrement granulaire

Un test de CO a été installé sous un recouvrement isolant partiel de 1,2 m dans la partie sud-est du parc à résidus miniers (PAR) en août 2010 (Garneau, 2012). Quatre tests de CO ont été menés en deux jours ; les résultats obtenus était de 31, 50, 49 et 58 moles·m^{-2}·an^{-1} ($0,956 < R^2 < 0,998$). La température des résidus à l'interface recouvrement-résidus était constante à -0,2°C durant les tests de CO. Ces résultats montrent qu'une faible oxydation des résidus miniers est possible à une température proche du point de congélation. Ces résultats ont été comparés avec des résultats des flux d'oxygène mesurés en juin 2009 avec l'essai de CO sur les résidus non recouverts de Mine Raglan pour une localisation comparable ; les résultats pour les résidus non recouverts variaient de 242 à 326 moles·m^{-2}·an^{-1} ($0,993 < R^2 < 0,999$). Basé sur ces données, le recouvrement isolant partiel de 1,2 m a une efficacité de 82,9 % pour diminuer le flux d'oxygène consommé par les résidus miniers.

2.6 Besoin en recherche sur le comportement des résidus miniers en climat nordique et sur les recouvrements isolants

La revue de littérature présentée dans ce chapitre permet d'identifier les principaux besoins en recherche en ce qui concerne les recouvrements isolants :

- Identifier de façon plus précise la température cible qui permettra de contrôler l'oxydation des minéraux sulfureux;

- Comprendre les autres paramètres (que la température) qui vont contrôler l'oxydation des résidus miniers tels que les teneurs en eau volumiques (ou le degré de saturation) et les hétérogénéités en place;
- Évaluer directement et à l'aide d'outils numériques simultanément les conditions hydriques, thermiques et de les relier à la réactivité afin ultimement d'avoir des outils qui intègreraient l'ensemble des facteurs d'influence dans nos prédictions;
- Évaluer le comportement global de ce nouveau type de pergélisol (appelé parfois pergélisol industriel (Allard, 2012);
- Poursuivre le développement de techniques complémentaires pour évaluer la performance des recouvrements isolants (essais de consommation d'oxygène modifié);
- Évaluer l'impact des changements climatiques à long terme sur la performance des recouvrements isolants pour contrôler le DMA;
- Estimer l'influence des conditions de terrain sur la réactivité des résidus sulfureux et sur la performance de recouvrements isolants;
- Évaluer de façon plus précise l'influence des propriétés des matériaux et de la configuration (épaisseur des couches et types de matériaux) des recouvrements isolants sur leur performance pour des conditions normales et extrêmes;
- Identifier ce que devraient être ces conditions extrêmes;

Le présent mémoire vise à répondre (en partie) à ces défis reliés à l'utilisation des recouvrements isolants pour restaurer les parcs à résidus miniers générateurs de DMA en climat nordique.

CHAPITRE 3 SITE À L'ÉTUDE, DESCRIPTION DU DESIGN ET CONSTRUCTION DES STATIONS DE MESURE

3.1 Mise en contexte

Des études ont été réalisés dans le passé sur le parc à résidus (PAR) de Mine Raglan dans le but de vérifier la performance du recouvrement isolant à limiter la production de DMA provenant des résidus du concentrateur (voir section 2.5.1 du chapitre 2). Ces études se basent sur le maintien de la température des résidus à une valeur inférieure au point de congélation comme indicateur de performance du recouvrement isolant à contrôler le DMA (AMEC, 2007; Holubec, 2004). Par contre, pour que ce type de recouvrement soit efficace, il doit maintenir les résidus à une température suffisamment froide pour inhiber les réactions d'oxydation chimique et biologique. Il a été mentionné au chapitre précédent que même à des températures inférieures à 0°C, il y a présence d'oxydation chimique et biologique des sulfures (Elberling et Langdahl, 1998; Elberling et al., 2000; Godwaldt, 2001; Meldrum et Jamieson, 2001).

Dans cette étude, la performance de différentes configurations de recouvrement isolant partiels construits sur le PAR de Mine Raglan a été évaluée *in situ* avec la méthode par des mesures de température et par des tests de consommation d'oxygène. Pour se faire, des stations de mesures ont été installées dans le parc à résidus de Mine Raglan sur les résidus directement, dans les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m. De façon plus spécifique, ces stations mesurent le profil de température, de teneur en eau volumique et de succion dans les résidus et dans le recouvrement ainsi que la réactivité des résidus avec et sans recouvrement isolant partiel à l'aide des tests de consommation d'oxygène. Ces mesures permettent de mieux comprendre les facteurs influençant la performance des différentes configurations de recouvrement de Mine Raglan, tel que la température et le degré de saturation. L'avantage de ces stations de mesures *in situ* est de pouvoir suivre le comportement des résidus miniers sur une longue période dans les conditions réelles du terrain.

3.2 Description du site

Le site minier Raglan a été mis en production par Falconbridge, en 1997. Depuis 2006, le site est exploité par Xstrata Nickel, sous le nom de Xstrata Nickel Mine Raglan. La capacité annuelle de

l'usine de concentration du minerai est de 30 000 tonnes de nickel dans le concentré. On retrouve également d'autres métaux dans le concentré, notamment du cuivre et des traces de palladium, de platine, de rhodium et de cobalt. Ce concentré est transporté par camion sur une distance de 93 km jusqu'au port de mer de la Baie Déception, d'où il est acheminé par transport maritime et ferroviaire à destination de la fonderie Xstrata Nickel à Sudbury, au nord de l'Ontario, pour être fondu et coulé en matte. Ce nouveau produit est finalement expédié à l'affinerie Xstrata Nickel en Norvège dans la ville côtière de Kristiansand, où la matte est transformée en métaux de haute qualité.

Xstrata Nickel Mine Raglan est localisée au nord du 61e parallèle dans la péninsule de l'Ungava, au Nunavik. Il est situé entre les villages de Salluit et de Kangiqsujuak, à environ 1800 km au nord de Montréal (voir Figure 3-1). Le climat est de type arctique avec une température moyenne annuelle de l'air estimée à -10,3°C et des précipitations annuelles totales atteignant 560 mm (SNC Lavalin, 2000). Le pergélisol atteint une profondeur maximale de 586 m sous la surface du sol et la hauteur de la couche active est d'environ 1 m, dans la zone 5-8 du plateau Katinniq (Fortier, 2006).

Figure 3-1 : Localisation du site minier de Xstrata Nickel Mine Raglan (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2011)

3.2.1 Géologie et minéralogie

Le site Raglan est situé dans la fosse de l'Ungava, dans la partie Est de la ceinture du Cap Smith. Cette ceinture traverse la péninsule d'Ungava et sépare les provinces géologiques Supérieures et Churchill. La stratigraphie de la ceinture Cape Smith est divisée en trois couches. Une couche inférieure appartenant au groupe sédimentaire, une couche centrale de basalte et de sédiments tholéiitiques (le groupe Povungnituk) et une couche supérieure de basalte komatiitiques (le groupe Chukotat). Des coulées et filons-couches mafiques à ultramafiques sont abondants dans la portion centrale-est de la ceinture (Lesher, 2007; Xstrata Nickel - Mine Raglan, 2010).

La zone minéralisée se trouve à la base de séquences de roches ultramafiques, qui affleurent de manière discontinue le long de l'interface des groupes Povungnituk et Chukotat. Cette roche ultramafique est composée de péridotite, de pyroxénite, de gabbro et de basalte komatiitique. Une zone minéralisée à haute teneur se retrouve dans les lentilles de sulfures individuelles associées à des coulées ultramafiques. Ces lentilles sont composées de pyrrhotite hexagonale, de pentlandite, de chalcopyrite, de magnétite et de pyrite mineure dans une gangue de péridotite. Le cobalt et les éléments du groupe platine présents dans la gangue de péridotite sont associés aux sulfures. Le principal minerai de nickel exploité est la pentlandite.

Le complexe de production de nickel se compose principalement de 9 secteurs qui s'étendent sur 70 km d'est en ouest: Donaldson, West Boundary, 13-14, 5-8 (Qakimajurq, Akullik et Angiyurq), Katinniq, Mine 2, Mine 3, Kikialik et Cross Lake (voir Figure 3-2).

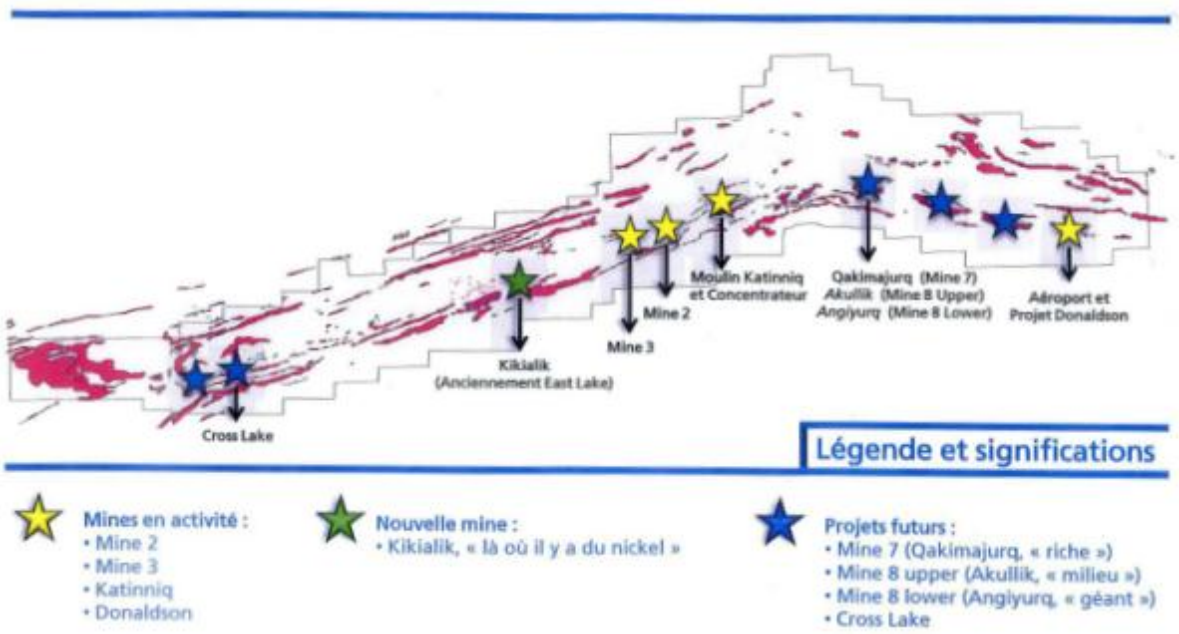


Figure 3-2 : Différents sites d'exploration et d'exploitation de la mine Raglan à l'hiver 2010 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2010).

3.2.2 Description du parc à résidus

Le minerai approvisionnant le concentrateur de Mine Raglan provient actuellement des mines souterraines Kikialik, Katinniq, Mine 2 et Mine 3. Le concentrateur traite 1,3 Mt de minerai par an. Les résidus provenant du circuit de flottation sont acheminés vers un épaississeur de 30,5 m de diamètre pour être amené à 60-65% solide (% poids). Ils sont par la suite acheminés vers des presses filtrantes pour les faire passer à environ 85% solide. Les résidus solides sont transportés par camion jusqu'au parc à résidus situé à 2 km au nord-est du concentrateur, où ils sont déposés sous forme de résidus filtrés (aussi appelé *dry stack tailings*; Bussière, 2007). Les résidus sont autoportants et l'usage de digues n'est pas nécessaire. Une photo aérienne de l'état du PAR en 2012 est présenté à la Figure 3-3. Ultimement, le PAR atteindra une hauteur finale de 30 m et une superficie de 76 hectares.

Figure 3-3 : Photo du PAR de la mine Raglan en 2012 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2012)

Le taux de production de résidus de concentrateur est estimé à 1,275 Mt/an pour l'an 2011 et pour les années suivantes (AMEC, 2009). La masse volumique sèche des résidus avant 2008 est estimée à 1 630 kg/m^3 par AMEC, basé sur le volume et la masse totale de résidus mis en place de 1997 à 2000. En 2008, une masse volumique *in situ* a été estimé à 1 880 kg/m^3, basé sur la somme et le volume total des résidus déposé dans le parc jusqu'à fin avril 2008 (AMEC, 2009). De leur côté, SNC Lavalin (2009) estime que la masse volumique sèche des résidus est comprise entre 1650 et 1700 kg/m^3, pour une teneur en eau massique moyenne (w) de 20,5%, avec une densité relative des solides de 2,93 et un degré de saturation variant de 75 à 85%. Dans ces conditions, les résidus dans le parc seraient compactés entre 90 et 93 % de l'optimum Proctor standard; cet essai suggère une masse volumique sèche maximale de 1832 kg/m^3 pour une teneur en eau optimale de 17,2 % (SNC Lavalin, 2009). Des mesures de teneur en eau massique prises dans le PAR sur des résidus de différents âges à des profondeurs entre 0 et 1 m donne une teneur en eau moyenne de 20,5 ± 3,8%, ce qui est supérieur à la valeur de 17,6 % à la sortie des filtres presses. D'après ces mesures, le degré de saturation des résidus en place dans le PAR augmente avec le temps.

Depuis 2002, l'eau de procédé est recirculée dans l'usine afin de diminuer la consommation d'eau fraiche par le concentrateur. Cette pratique, appelé « Zero Process Water Discharge

(ZPWD) » concentre l'eau de procédé et augmente sa teneur en sel et en thiosels (Golder Associés, 2008). La salinité totale calculé des résidus en place est de 30 à 40 g/L tandis que celle provenant des échantillons de l'usine est en moyenne de 26 g/L (SNC Lavalin, 2009). Cette concentration plus élevée en sel peut mener à un abaissement du point de congélation des résidus miniers, qu'il faut prendre en compte dans l'analyse de la performance de recouvrement isolant.

3.3 Restauration du parc à résidus de Mine Raglan

En 2002, Xstrata Nickel Mine Raglan a commencé la restauration progressive du parc à résidus avec un recouvrement de type couverture isolante, proposé par AMEC (AMEC, 2002). Le recouvrement isolant proposé vise à garder les résidus constamment gelés, sans risque de dégel pour une période de récurrence de 100 ans et pour une température annuelle moyenne de l'air de -8,8°C. La face externe du recouvrement est conçue pour résister à l'érosion hydrique causée par la pluie maximale probable. Également, lors de l'élaboration du plan de fermeture, le point de congélation des résidus était estimé à -0,5°C pour une concentration en sel dissous dans les résidus frais de 6 g/L. Basé sur ces critères, le recouvrement proposé est composé de deux couches de matériel granulaire. Une première couche de 1,2 m d'épaisseur constituée d'esker concassées de taille 0-20 mm contenant un minimum de 10 % de fines (passant le tamis #200) est posée directement sur les résidus. Un minimum de 10% de fines était visé pour obtenir une teneur en eau gravimétrique minimale de 7% pour le matériel 0-20 mm. À partir de 2006, le matériel d'esker utilisé a été remplacé par de la roche concassée contenant 6% de fines (AMEC, 2007c). La deuxième couche du recouvrement, également de 1,2 m d'épaisseur, est composée de tout-venant de carrière de taille 0-600 mm, servant à prévenir l'érosion du parc par le vent et par l'eau. La surface du recouvrement sera orientée vers le sud avec une pente de 3 à 5 % et les pentes externes auront une inclinaison de 5H : 1V afin que le PAR ait l'aspect d'une colline. Une modélisation thermique 1D de la couche active pour différents scénarios de recouvrement isolant a été menée avec le modèle thermique SIMTEMP de AMEC pour venir appuyer le scénario de restauration proposé. Les résultats de cette modélisation ont été présentés plus en détails à la section 2.5.1. Basé sur cette modélisation, pour une température de congélation des résidus de -1°C, le recouvrement de 2,4 m de hauteur proposé rencontre tous les critères pour les conditions climatiques actuelles.

Pour la mise en place du recouvrement, la couche de 0-20 mm est placée par couche successive de 40 cm et compacté par un minimum de 4 passes par couche de rouleau monocylindrique 10 tonnes muni d'un système de vibration. La couche de 0-600 mm doit être déposée en sous-couche de 60 cm et compacté par un minimum de 6 passes de rouleau monocylindrique 10 tonnes muni d'un système de vibration (AMEC, 2002a). La densité sèche sur le terrain du gravier 0-20 mm est estimée à 2250 kg/m^3 correspondant à une porosité de 0,25 (Xstrata Nickel Mine Raglan)

Dès le début des opérations de Mine Raglan, il a été prévu de procéder à une restauration progressive du PAR. Au départ il a été décidé de construire le recouvrement final dès que les résidus atteignaient leur hauteur finale afin de minimiser le temps d'exposition des résidus (AMEC, 2002b). Une première portion du recouvrement (1,2 m de 0-20 mm) a été mise en place sur la partie sud-est du parc à résidus ayant atteint son élévation finale. Pendant ce temps, l'efficacité du concept de restauration pour prévenir la contamination dans le contexte des changements climatique a été remise en question. Il a donc été décidé d'étudier plus en détails le concept final proposé avant de l'appliquer au complet à grande échelle (Garneau, 2012). Plus de détails sur l'étude du recouvrement final proposé de 2,4 m pour la restauration du parc à résidus seront donnés au Chapitre 6. En attendant les résultats de cette étude et d'études supplémentaires pour confirmer l'efficacité du concept du recouvrement isolant, les nouvelles zones du parc à résidus ayant atteintes l'élévation finale ont été recouvertes d'une couche de 0,4 m de 0-20 mm pour le contrôle de l'érosion éolienne. La Figure 3-4 présente l'avancement des travaux de restauration du PAR à Raglan pour l'année 2010. La zone verte représente le recouvrement partiel de 1,2 m de roche concassé 0-20 mm, la zone jaune le recouvrement partiel de 0,4 m de roche concassé 0-20 mm, la zone en rouge la surface de résidus non finale où il reste encore des résidus à déposer et la zone bleu la surface de résidus finale. Pour le moment, le concept de restauration n'est appliqué que partiellement; aucune section du PAR (à l'exception des cellules expérimentales) n'a encore été restaurée avec le recouvrement final de 2,4 m.

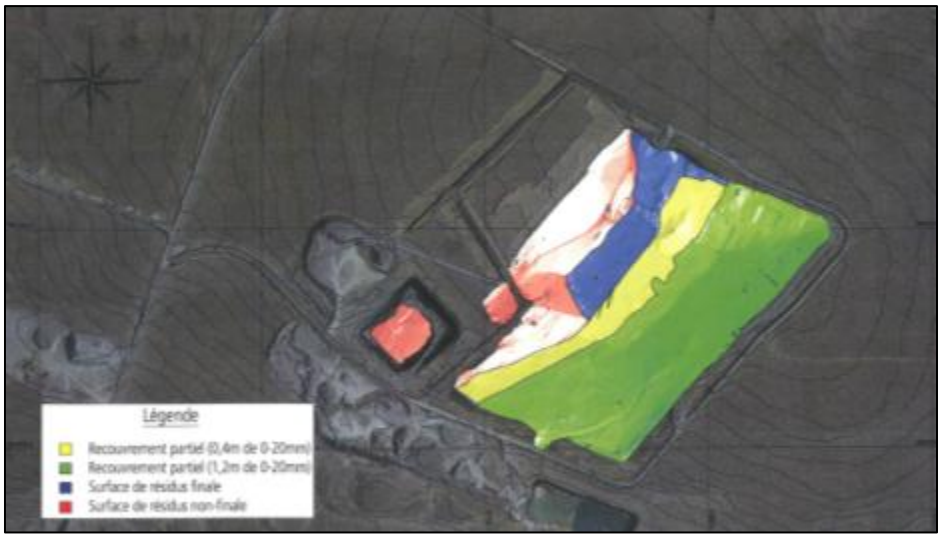


Figure 3-4 : État de la restauration progressive du PAR en 2010 (Xstrata Nickel Mine Raglan, 2010)

3.4 Localisation des stations de mesure

Au cours de l'été 2011, sept stations de mesure ont été installées dans le parc à résidus de Mine Raglan afin d'évaluer la performance des recouvrements isolants partiels installés sur le PAR. Elles sont représentées avec des icônes bleues sur la carte de la Figure 3-5. Les stations S1, S2 et S3 sont situées dans la zone des résidus non recouverts. Les stations S4, S5 et S6 sont situées dans la zone où le recouvrement atteint la moitié de la hauteur finale proposée, soit 1,2 m d'épaisseur. Les stations de mesures sont situées majoritairement en haut de pente afin de pouvoir y accéder facilement en camion et pour faciliter le transport de l'équipement. L'emplacement des stations de mesure sur les résidus non recouverts a été choisi en tenant compte du plan de déposition des résidus et de la restauration progressive du PAR. Lors de l'été 2011, la déposition des résidus était effectuée dans la carrière Q00 et sur la partie sud-ouest du PAR au nord de la carrière Q00. L'espace libre pour les stations de mesure sur les résidus était donc limité à la partie en pente au nord-ouest et au sud-ouest du PAR.

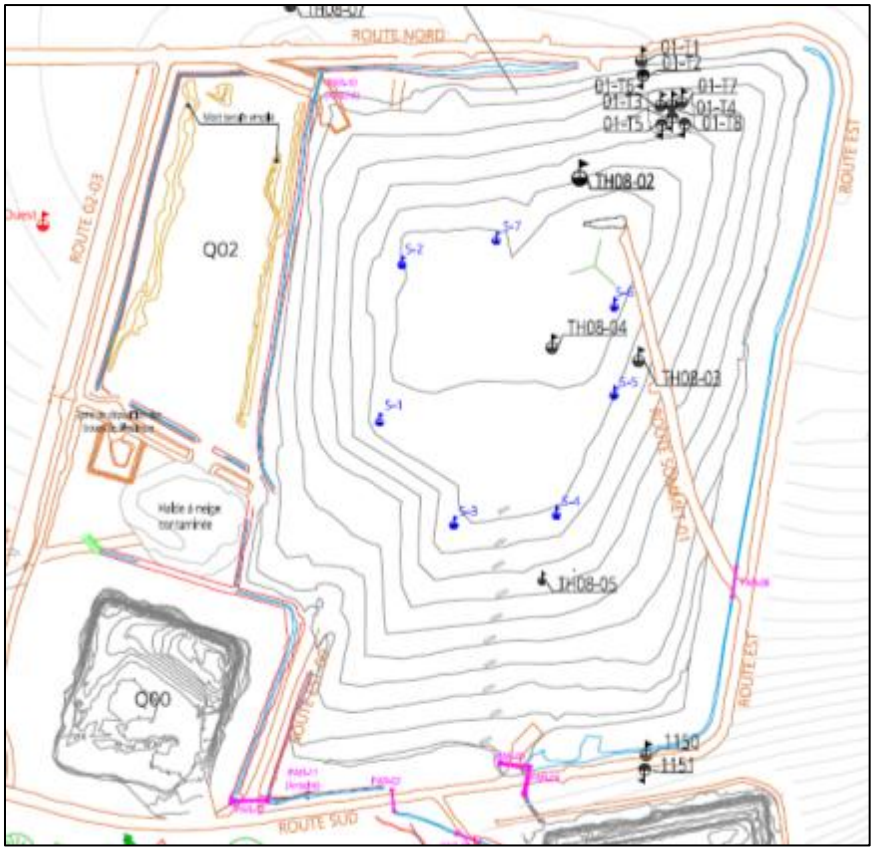


Figure 3-5: Localisation des stations de mesure (S1 à S7) sur le parc à résidus de Mine Raglan (Xstrata Nickel Mine Raglan)

La station S3 est localisée au sud-ouest en haut de pente, proche de la partie recouverte de 0,4 m de 0-20 mm. La station S2, installée au début du mois d'août 2011, est localisée dans la pente de la partie nord-ouest du PAR (voir Figure 3-5). Puisque les stations S2 et S3 sont localisées en pente et en haut de pente, il a été décidé d'installer la station S1 à l'ouest de la partie plate du PAR, qui doit être éventuellement recouverte de matériel 0-20 mm. Elle a été placée complètement à l'extrémité de la zone qui sera remblayée, de façon à garder la possibilité de la laisser à découvert lors des éventuels travaux de recouvrement. Pour les stations S4, S5 et S6 recouvertes de 1,2 m de matériel 0-20 mm, le choix de localisation des stations a été fait de manière à avoir un portrait général de la consommation d'oxygène par les résidus de concentrateur au PAR. Au départ il était prévue d'installer une station dans la partie nord du recouvrement de 1,2 m du PAR. Par contre, lorsque le recouvrement a été excavé, une couche de matériel grossier a été trouvée au lieu des résidus à 1,2 m de profondeur. Suite à cette découverte, il a été décidé de ne pas procéder à d'autres excavations dans le secteur nord au cas où cette

couche de matériel grossier se retrouverait sur la majorité de la partie nord du PAR. Les stations S4 à S6 ont donc été placés au sud et au sud-est du PAR. Les stations dans la partie sud et sud-est sont placées en haut de pente (S4 et S6) et en pente (S5). Lors de l'installation de la station S4, une accumulation d'eau à l'interface des résidus et du recouvrement a été observée. Une pompe a été utilisée pour vider l'eau de l'excavation. Une fois l'eau retiré, il a été possible de procéder à l'installation du montage du test de CO. Lors de l'installation des stations S5 et S6 au mois d'août, une faible accumulation d'eau a été observée à l'interface des résidus et du recouvrement de 1,2 m pour la station S6 seulement. Finalement, la station S7, recouverte de 0,4 m de matériel 0-20 mm, a été placée au nord du parc car l'espace au sud était réservé pour de futurs travaux. Cette station a été placée en haut de pente pour concorder avec l'emplacement des autres stations, majoritairement en haut de pente, et également pour faciliter son accès.

3.5 Description des différents tests de consommation d'oxygène

Pour évaluer la performance des différentes configurations de recouvrement que l'on retrouve au PAR de Mine Raglan, les stations de mesure S1 à S6 ont été installées sur le terrain. Les stations comportent des tests de consommation d'oxygène pour mesurer la réactivité des résidus ainsi que de l'instrumentation pour mesurer la température, la teneur en eau volumique et la succion des résidus et du recouvrement granulaire. La section 3.5.1 présente les détails du montage du test de CO de base. Ensuite, la section 3.5.2 décrit le montage du test de CO modifié pour une installation sous un recouvrement granulaire. A la section 3.5.3 on retrouve la description d'un troisième type de test de consommation d'oxygène, utilisé dans le recouvrement de 0,4 m. Plus d'informations sur la mise en place de ces essais sur le terrain seront présentés à la section 3.7.

3.5.1 Montage du test de consommation d'oxygène de base

Les tests de CO installés directement sur les résidus permettent de mesurer le taux d'oxydation potentiel des résidus miniers de la mine Raglan. La description générale du montage ainsi que les détails de la méthode d'interprétation analytique du test ont été abordés à la section 2.5.2. Pour cette étude, un cylindre en acier inoxydable d'une longueur de 30 cm et d'un diamètre de 15 cm a été choisi. Cette hauteur de cylindre a été sélectionnée en prenant en considération que l'épaisseur de dégel dans les résidus sous le recouvrement isolant partiel de 1,2 m serait faible lors de l'installation des cylindres au début de mois de juillet. L'acier inoxydable a été choisi

comme matériau, parce qu'il ne consomme pas d'oxygène et en raison de sa résistance. Une hauteur de dégagement « h» de 10 cm a été visée pour l'installation des cylindres. Cette hauteur de dégagement a été choisie en se basant sur les travaux de Mbonimpa et al. (2011), selon lesquels l'interprétation analytique du test de CO par la méthode d'Elberling et Nicholson (1996) est plus représentative lorsque h augmente pour une durée d'essai donnée. Le schéma du test de CO de base est présenté à la Figure 3-6.

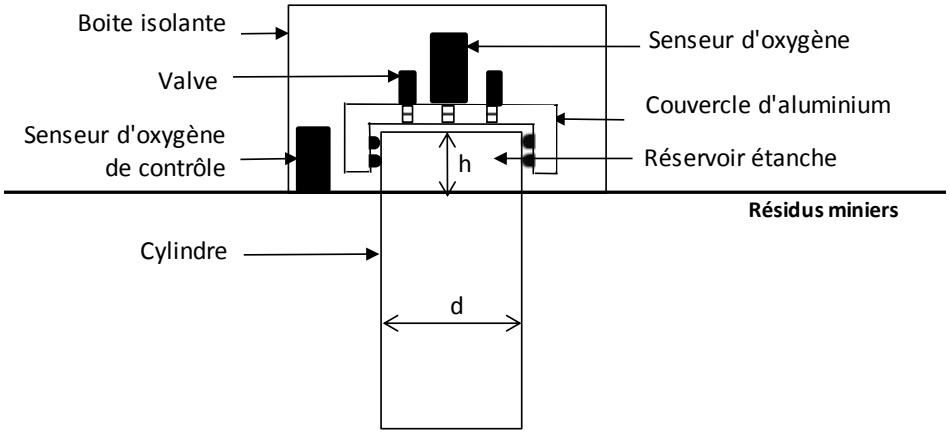


Figure 3-6 : Schéma du montage du test de consommation d'oxygène de base avec couvercle étanche

Un couvercle en aluminium est utilisé pour créer le réservoir étanche au-dessus du cylindre lors du test de consommation d'oxygène. Le couvercle est placé sur le cylindre, tel que schématisé à la Figure 3-6, pour la durée du test. Le reste du temps, les cylindres sont exposés aux conditions climatiques ambiantes. Deux valves vissées dans le couvercle permettent d'effectuer un échange d'air dans le réservoir au-dessus des résidus au début du test afin d'obtenir un pourcentage d'oxygène initial de 20,9%. Un capteur d'oxygène de marque Apogee type S0-110 se visse directement dans le couvercle d'aluminium et mesure l'évolution de la concentration en oxygène dans le gaz du réservoir au-dessus des résidus. Plus de détails sur ce senseur seront présentées au chapitre 4. Lors des tests de CO, une boite isolante est placée par-dessus le montage afin de diminuer les variations de lecture du senseur causées par les variations de température provenant de l'exposition solaire. Une sonde de contrôle, également de type Apogee SO-110, est utilisée pour mesurer les variations de concentration d'oxygène dans l'air ambiant lors des tests de CO

causées par les changements de température et de pression barométrique. Cette mesure est utilisée pour corriger la lecture de la sonde utilisée pour le test de CO.

3.5.2 Test de consommation d'oxygène sous recouvrement isolant partiel (1,2 m)

Le design du test de CO sous recouvrement isolant partiel de 1,2 m est basé sur les travaux de Garneau (2012). Le design de ce test est similaire à celui du test de CO de base présenté à la Figure 3-6. Par contre, puisque le montage est installé en permanence sous le recouvrement isolant partiel, quelques modifications ont dû y être apportées. Tout d'abord, le recouvrement doit être excavé, le montage du test de CO installé dans les résidus et le recouvrement remis en place, tel que présenté à la Figure 3-7. Ensuite, pour créer la chambre d'air étanche, le couvercle d'aluminium doit être inséré sur le cylindre lors de l'installation du montage et y reste.

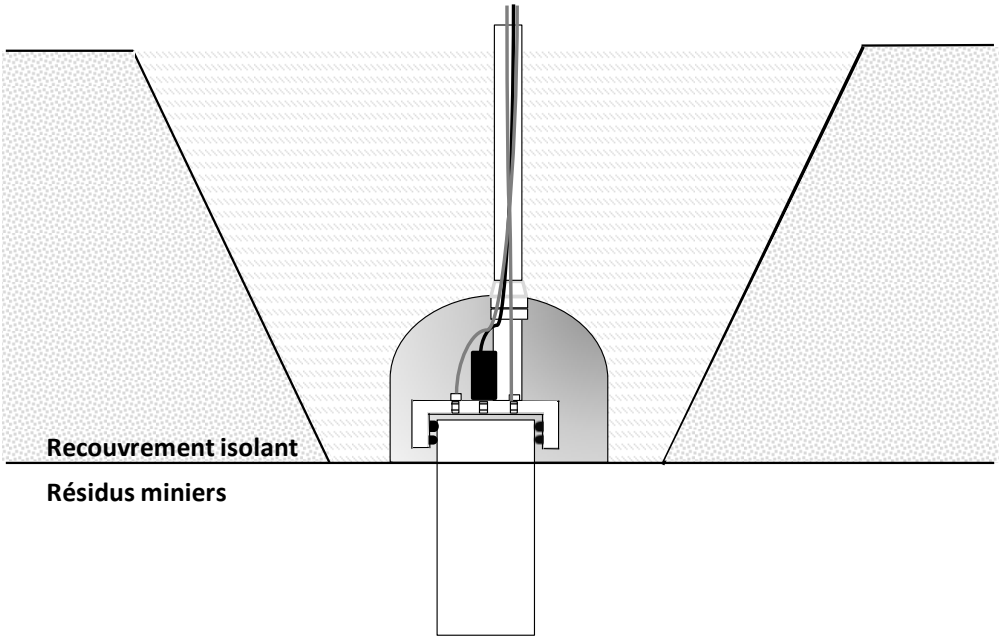


Figure 3-7 : Schéma du test de consommation d'oxygène modifié pour installation sous le recouvrement isolant partiel de 1,2 m

Ensuite, puisque le montage est recouvert en permanence sous le recouvrement, l'échange d'air dans le réservoir étanche au-dessus des résidus doit pouvoir se faire à partir de la surface. Pour permettre l'échange d'air, deux tubulures flexibles de 38 mm sont insérés dans le couvercle et remontent jusqu'à la surface du sol. À partir de la surface, il suffit de fermer l'extrémité des

tubulures pour créer la chambre d'air étanche ou de les ouvrir pour faire un échange d'air. Le montage du test de CO sous recouvrement est schématisé à la Figure 3-7. Le montage avec le dispositif de protection occupe un espace d'environ 20 cm de hauteur au-dessus de la surface des résidus.

Pour mener un test de consommation d'oxygène sous le recouvrement isolant partiel, il faut tout d'abord procéder à l'échange de l'air dans la chambre étanche afin de monter la concentration d'oxygène dans l'air à 20,9%. Cela se fait en introduisant de l'air dans une des tubulures soit à l'aide d'une pompe manuelle ou d'un petit compresseur. Ensuite, les tubulures sont bouchées à l'aide d'un raccord femelle-femelle 38 mm, ce qui permet de créer le réservoir d'air étanche. La diminution d'oxygène dans le réservoir est mesurée avec le capteur d'oxygène Apogee. Une sonde de contrôle est placée à l'intérieur du dispositif de protection d'un des tests de CO de la station S5 dans le recouvrement de 1,2 m. L'interprétation analytique d'Elberling et al (1994) est utilisé pour interpréter les tests.

3.5.3 Test de consommation d'oxygène modifié (0,4 m)

Le test de consommation d'oxygène modifié (CO_M) est une autre version du test de consommation d'oxygène de base pouvant être utilisé pour mesurer la réactivité des résidus sous une couverture. Il est utilisé pour évaluer la performance du recouvrement de 0,4 m du PAR de Mine Raglan. Cette méthode est utilisée en raison de la faible épaisseur de recouvrement à cet endroit (40 cm). Dans le montage du test de CO sous recouvrement isolant partiel, le dispositif utilisé pour protéger le montage prend l'espace du recouvrement sur environ 20 cm. Sur une hauteur de 40 cm, cela aurait modifié de façon importante les profils thermique et hydrique du recouvrement. Ce test utilise le même principe que le test de CO de base, mais le cylindre d'acier inoxydable utilisé est plus long (60 cm) et il est rempli de matériel de recouvrement. La Figure 3-8 présente le schéma du test de CO_M tel qu'installé sur le terrain.

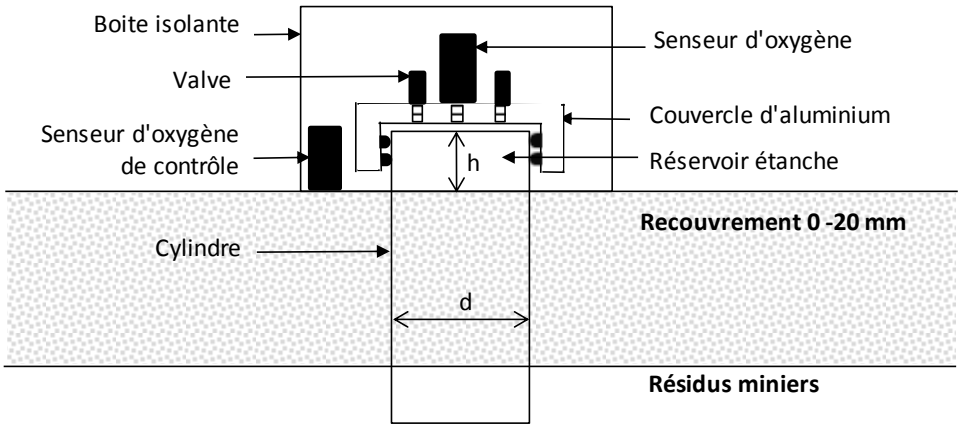


Figure 3-8 : Schéma du test de consommation d'oxygène modifié pour le recouvrement isolant partiel de 0,4 m

La même procédure et interprétation que pour le test de CO de base est utilisée pour mener ces tests de consommation d'oxygène (voir section 3.5.2). La hauteur de dégagement est calculée en additionnant la hauteur libre dans le haut des cylindres au volume d'air calculé selon la teneur en eau volumique et la porosité du sol. Une méthode similaire a été utilisé en laboratoire (Bussière et al., 2002; Demers et al., 2009; Dagenais et al., 2012) pour évaluer la performance de recouvrement à effet de barrière capillaire (CEBC).

3.6 Instrumentation des stations

Des sondes de température, de teneur en eau volumique et de succion ont été ajoutées aux tests de consommation d'oxygène à chaque station expérimentale dans le but d'étudier de façon simultanée les comportements thermique et hydrique du recouvrement isolant partiel et des résidus miniers. Ajouter ce type d'instrumentation permet de faire des liens entre la réactivité des résidus, la température et le degré de saturation des résidus. L'instrumentation a été choisie en se basant sur une revue des différentes techniques existantes pour la mesure de la teneur en eau volumique et la succion (Maqsoud et al., 2007). Pour la mesure de la teneur en eau volumique, les différentes techniques existantes sont présentées au Tableau 3.1. Ces techniques peuvent être regroupées en trois catégories; gravimétrique, émission d'énergie et méthodes diélectriques. Les techniques diélectriques sont plus accessibles car elles permettent d'acquérir des données en continu, contrairement aux deux autres méthodes. Également, elles sont non destructives et ne nécessitent pas la manipulation d'une source radioactive. Les techniques diélectriques se basent

sur la mesure de la permittivité du sol. À 20°C, la permittivité de l'air K_{air} est de 1, celle du sol sec K_{sol} se situe entre 2 et 5, et celle de l'eau K_{eau} est de 80,18. Ainsi, la permittivité totale du sol est principalement contrôlée par l'eau, ce qui permet en mesurant la permittivité du sol d'estimer la teneur en eau volumique du milieu.

Tableau 3.1 : Comparaison entre les différentes techniques utilisées pour la mesure de la teneur en eau volumique (adapté de Maqsoud et al., 2007)

	Précision (cm^3/cm^3)	**Installation**	**Acquisition**	**Remarques**	**Utilisé sur le terrain dans des recouvrements**
Gravimétrique	Forte	Temporaire	Non	Destructif	LTA (Bussière et al., 2006), Lorraine (Dagenais et al., 2005)
Sonde à neutron	0,005	Tube d'accès	Non	Difficile à insérer	Equity (O'Kane et al., 1998)
Rayon gamma	0,02	2 tubes d'accès	Non	Non recommandé pour les sols avec une salinité élevée, haute teneur en sulphures et pour les sols argileux	Handfor (Albright et al., 2002)
Time domain reflectometry (TDR)	0,01	Permament ou inséré	Oui	Non recommandé pour les sables, les sols grossiers, gonflants et avec une salinité élevée	LTA (Ricard et al., 1997, 1999; Bussière et al., 2006), Lorraine (Dagenais et al., 2005), Health Steele (Yanful et al., 1993)
Frequency domain (FD)	0,01	Permanent ou tube d'accès	Oui		LTA (Bussière et al., 2006), Kidston (Williams et al., 2003)
Amplitude domain reflectometry (ADR)	0,01 - 0,05	Permament ou inséré	Oui		
Phase transmission (PT)	0,01	Permanente	Oui		
Time domain Transmission (TDT)	0,05	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sols denses, organiques, avec une forte salinité et argileux	

Les techniques TDR (Time Domain Reflectometry) et FD (Frequency Domain) ont été utilisées préalablement par l'équipe de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et de l'École Polytechnique de Montréal dans des projets de restauration de sites miniers (sites LTA et

Lorraine) pour suivre le comportement de couvertures à effet de barrière capillaire (CEBC). Ces techniques ont donné de bons résultats, c'est pourquoi il a été décidé de choisir une de ces deux techniques. La sonde 5TM de la compagnie Decagon utilisant la technologie FD a été retenue pour ce projet. Cette sonde mesure la température du milieu dans laquelle elle est insérée en même temps que la teneur en eau volumique. La sonde 5TM peut donner avec précision la teneur en eau volumique de n'importe quelle type de sol poreux, en autant qu'elle soit calibrée pour le milieu en question. Plus de détails sur la sonde 5TM de Decagon seront présentées à la section suivante. Les différentes techniques pour la mesure de la succion sont présentées au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Comparaison entre les différentes techniques utilisées pour la mesure de la succion (adapté de Maqsoud et al., 2007)

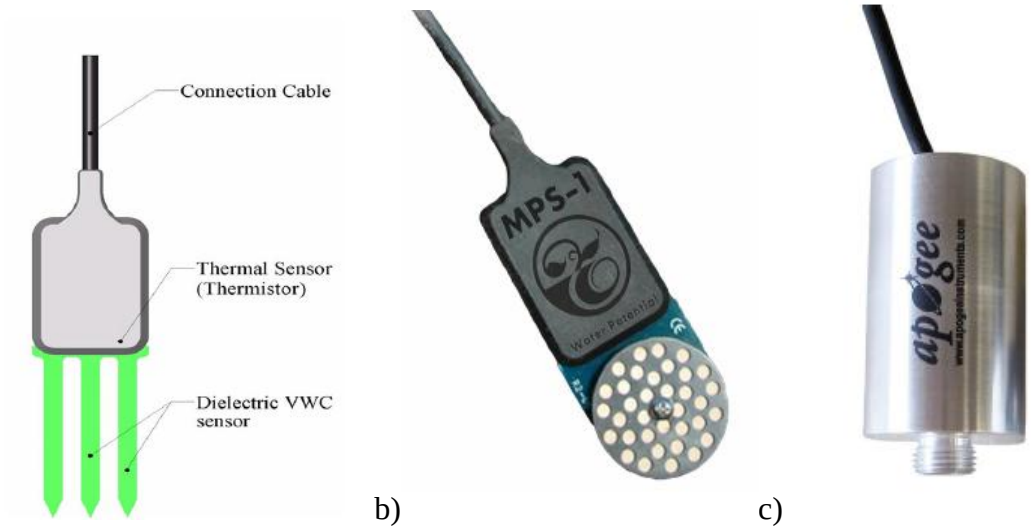
	Gamme de mesure	Précision	Installation	Acquisition	Remarques	Utilisé sur le terrain dans des recouvrements
Tensiomètre	0 - 80 kPa	1 kPa	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sables et pour les sols grossier; doit remplir les tubes d'eau	LTA (Bussière et al., 2006)
Bloc gypse	30 - 1000 kPa	1 kPa	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sables, les sols grossiers, gonflants et avec une salinité élevée	Health Steele (Yanful et al., 1993)
Senseur à matrice granulaire	10 - 200 kPa	1 kPa	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sables, les sols grossiers, gonflants et avec une salinité élevé	LTA (Ricard et al., 1997, 1999; Bussière et al., 2006), Lorraine (Dagenais et al., 2005)
Senseur dissipateur de chaleur	10 - 1000 kPa		Permanente	Oui	Non recommandé pour les sols grossiers	Equity (O'Kane et al., 1998); Health Steele (Yanful et al., 1993)
Psychromètre	50 - 3000 kPa	20 kPa	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sols grossiers et les sols avec une salinité élevée	
Potentiomètre WP4	0 - 40000 kPa	100 kPa	Manuelle	Non		
Equitensiometre	2 -1500 kPa	10 kPa	Permanente	Oui	Non recommandé pour les sables, pour les sols grossiers et les sols avec une salinité élevé	

En raison de leur faible précision, le psychromètre, le potentiomètre et l'équitensiomètre ont été éliminés. Le tensiomètre a également été éliminé en raison de la maintenance nécessaire au bon fonctionnement de l'équipement et à sa fragilité en conditions froides. Parmi toutes ces techniques, la plus intéressante est celle du senseur à matrice granulaire. Cette technique consiste à insérer un matériau avec une matrice granulaire connue dans le sol et le laisser s'équilibrer avec le milieu. Puisque le senseur est en équilibre avec le sol, mesurer la succion du senseur donne également la succion dans le sol. Certains senseurs utilisent la conductivité thermique (senseur à dissipation de chaleur) ou la conductivité électrique de la matrice granulaire pour déterminer la succion dans le sol. Le senseur MPS-1 de Decagon mesure la permittivité diélectrique d'une matrice solide, soit des disques poreux en céramique, pour déterminer la succion dans le sol. La permittivité diélectrique des disques céramiques étant fortement reliée à la quantité d'eau présente, il est possible de déterminer la teneur en eau volumique des disques. Finalement, la quantité d'eau dans les disques céramiques et la succion sont reliées par une relation unique, qui permet d'avoir une courbe de calibrage standard pour tous les types de sol. Plus de détails sur la sonde MPS-1 de Decagon seront donnés à la section suivante.

Le senseur Apogee S0-110 a été sélectionné pour mesurer la diminution de la consommation d'oxygène lors des tests de CO car il est fonctionnel sur une gamme de température allant de -20°C à 60°C. Cela permettra de faire des tests de consommation d'oxygène même en période hivernale. Ce senseur à cellule galvanique génère un signal en millivolt proportionnel à la concentration en oxygène du milieu.

3.6.1 Information supplémentaire sur les instruments sélectionnés

Les sondes 5TM, MPS-1 de Decagon ont été choisies pour mesurer la teneur en eau volumique, la température et la succion dans les résidus et dans le recouvrement isolant partiel. La sonde 5TM de Decagon permet de mesurer simultanément la température et la teneur en eau volumique en utilisant la technique Frequency Domain (FD). Elle peut mesurer la température sur une gamme de -40°C à 50°C avec une précision de ± 1°C et une résolution de 0,1°C. La teneur en eau volumique est déterminée par une onde oscillant à 70 MHz qui mesure la permittivité diélectrique du sol (ε_a air =1, ε_a eau = 80). La sonde donne des valeurs précises à ± 0,02 m^3/m^3 sur une gamme de 0 à 100 % pour une calibration propre au matériel.



a) b) c)

Figure 3-9 : Schéma et images des sondes utilisées dans les stations de mesure : a) Decagon 5TM (tiré de Decagon Devices Inc., 2010); b) Decagon MPS-1 (tiré de Decagon Devices, 2008-2009); c) Apogee SO-110 (tiré de Apogee instruments inc.,)

La sonde MPS-1 de Decagon a été sélectionnée pour mesurer la succion matricielle. Cette sonde peut mesurer la succion entre 10 kPa et 500 kPa, avec une précision de ± 5 kPa et une résolution de 1 kPa pour les valeurs entre 10 et 50 kPa, et avec une précision de ± 20% de la lecture et 4 kPa de résolution pour une succion entre 50 à 500 kPa. Elle opère pour des gammes de température de 0°C à 50°C mais tolère des températures jusqu'à -40°C. La sonde MPS-1 fonctionne en mesurant la permittivité diélectrique des disques de céramique poreux constituant la sonde. Puisque la constante diélectrique de l'eau est nettement différente de celle de la glace, la sonde ne peut pas fonctionner convenablement dans un sol gelé. Par contre, selon le fournisseur, les disques de céramique de la sonde ne sont pas affectés par les cycles de gel et de dégel répétés. Le système d'acquisition de données choisit pour les sondes 5TM et MPS-1 est le EM50 de Decagon à 5 canaux. Il est fonctionnel pour des températures allant de -40°C jusqu'à 60°C. Le senseur Apogee à cellule galvanique est fonctionnel sur une gamme de température allant de -20°C à 60°C et pour une humidité relative de 0 à 100%. Le système d'acquisition de données choisi pour la lecture des sondes Apogee est le OM-CP-Quadvolt 100 mV-AC de Omega. Ce système à 4 canaux fonctionne pour des températures variant de -40°C à 80°C. Le Tableau 3.3 résume les caractéristiques de l'instrumentation choisie pour le projet.

Tableau 3.3 : Caractéristiques de l'instrumentation choisie pour le projet

Appareils	5TM		MPS-1	SO-110
	T	TEV		
Mesure	Température et teneur en eau volumique		Succion	Concentration en oxygène
Technologie	Frequency domain		Matrice granulaire	Cellule galvanique
Temps de réponse	150 ms		10 ms	60 s
Gamme d'opération	-40 à 50 °C		> 0°C	-20 à 60 °C 0 à 100 h_r
Gamme	-40 à 50 °C	1 à 80 ε_a	-10 à -500 kPa	0 à 100 % O_2
Résolution	0,1 °C	0,08	1 kPa de -10 à -100 kPa 4 kPa de -100 à -500 kPa	
Précision	± 1°C	0,01-0,02	± 40% de la lecture	±0,02% O_2

3.6.2 Facteurs influençant la lecture de l'instrumentation

Teneur en eau volumique et température – 5TM

La précision avec laquelle la sonde 5TM mesure la permittivité diélectrique du sol est un des facteurs principaux qui influence la précision avec laquelle la sonde va mesurer la teneur en eau volumique dans le sol. Des études ont montrés que la température du sol affecte la mesure des sondes TDR (Robinson et al., 2003). La constante diélectrique apparente de l'eau diminue d'une valeur de 88 à 0°C à une valeur de 70 pour une température de 50°C. Dans une étude de Kahimba et Sri Ranjan (2007), la teneur en eau volumique mesurée par une sonde TDR était surestimée jusqu'à 0,10 m^3/m^3 pour un sol avec une température variant entre 2,3°C à 6,5°C versus les valeurs mesurés avec une sonde à neutron. Les auteurs ont développé une courbe de correction de la permittivité diélectrique pour des températures supérieure à 0°C. Une fois la correction appliquée, la différence entre la lecture des deux sondes était négligeable. Selon des tests menés par le fournisseur, la sensibilité maximale de la sonde serait de 0,003 m^3/m^3 par °C. D'autres tests effectués par Decagon sur cinq types de sol montrent que la dépendance à la température dans les sols grossiers (sable et sable silteux) est faible, peu importe la teneur en eau volumique. Dans les sols fins (loam silteux et loam argileux) la dépendance à la température augmente. Ensuite, selon le fournisseur, pour une conductivité électrique correspondant à une salinité de 10 dS/m, la sonde présente une sensibilité de moins de 3% sur les résultats avec la calibration de Topp et al. (1980). Dans une étude portant sur les sondes de la famille ECH_2O (EC-5 et ECH_2O-TE), une erreur sur

la teneur en eau volumique de 2% était obtenue jusqu'à une conductivité électrique correspondant à une salinité de 12 dS/m (Kizito et al., 2008). Des travaux menés sur les sondes utilisant les technique TDR et FD ont montré que la présence de minéraux ferreux tels que l'hématite, la goethite et la magnétite influence la lecture de ces sondes (Robinson et al., 1994). En effet, les méthodes diélectriques mesurant la teneur en eau volumique des sols se basent sur la variation de la constante diélectrique du sol. Les résultats de ces travaux ont montrés que les minéraux ferreux présents dans le sol ont une influence importante sur la constante diélectrique du sol mesuré par les sondes TRD et FD. Ainsi la calibration du fournisseur donne des résultats erronés si elle est utilisée pour des sols avec une forte teneur en minéraux ferreux.

Succion matricielle – MPS-1

La sonde MPS-1 est peu influencée par la salinité du sol. Pour une salinité correspondant à une conductivité électrique variant entre 0,01 dS/m et 10 dS/m, la sonde présente une sensibilité de moins de 2% sur les résultats. Pour ce qui est de l'influence de la température, la sonde présente une certaine sensibilité aux variations de température. Cela est principalement causé par les changements de permittivité diélectrique de l'eau et de la plaque céramique provenant de changement de température. Selon le fournisseur, pour les applications de terrain, c'est-à-dire pour les sondes installées à une profondeur de plus de 15 cm dans le sol, cette sensibilité à la température peut être considérées comme négligeable. Par contre, lorsque la sonde est installée à des profondeurs de moins de 15 cm, une correction pour la température est préférable. De plus, une autre étude menée sur la sonde MPS-1 conclut que la sensibilité à la température de la sonde est très faible (Malazian et al., 2011). La sensibilité de la sonde à la température a été évaluée en laboratoire en immergeant la sonde et un loam silteux dans un bain à température contrôlé. La succion était maintenue à 25 kPa durant le test. La lecture de la sonde était enregistrée pour des températures variant de 5 à 30°C, avec un incrément de 5°C. Les résultats de l'expérience ont montré que l'augmentation de la température de 5 à 30°C par pallier de 5°C n'affecte pas la lecture du senseur de façon significative. Par contre la diminution de température de 30°C à 5°C a réduit la lecture de toutes les sondes de 4 mV (≈2 kPa).

Concentration en oxygène – SO-110

Le circuit électronique du senseur SO-110 d'Apogee montre une légère dépendance à la température. Également, la concentration en oxygène change avec la température, la pression

barométrique et l'humidité relative modifiant la lecture de la sonde en mV correspondant à une teneur en oxygène de 20,9%. Des équations fournies par Apogee permettent de calibrer le senseur afin de limiter les variations de lectures causées par ces facteurs. Dans le cadre de cette étude, la sonde Apogee est utilisée pour mesurer la diminution d'oxygène lors du test de consommation d'oxygène (durée typique de 3 à 5 heures). Les équations de calibrage du fournisseur ne sont pas utilisées lors de l'analyse des tests de CO car on pose comme hypothèse que la sortie de la sonde en mV est équivalente à une concentration en oxygène relative de 20,9%. En revanche, une correction est appliquée pour corriger la concentration en oxygène initiale absolue dans l'air (C_0) utilisée lors de l'interprétation du test de CO (éq 2.44). En plus, une sonde de contrôle est utilisée lorsque des tests de consommation d'oxygène sont menés sur le terrain dans le but de corriger les variations de lectures de la sonde causées par les changements de température, de pression barométrique et d'humidité relative.

3.6.3 Calibration de la sonde de teneur en eau volumique

Après quelques semaines de lecture de la teneur en eau volumique sur le terrain avec la sonde 5TM, il est apparu que la calibration du fournisseur, basé sur les travaux de Topp et al. (1980), n'est pas adéquate pour les résidus miniers testés qui ont une forte teneur en pyrrothite (voir Chapitre 4). Il a été décidé de procéder à la calibration de la sonde 5TM en laboratoire pour ce matériau. Une courbe de calibrage a également été déterminé pour le gravier, afin d'obtenir des valeurs de teneur en eau volumique plus précise.

La sonde 5TM a été calibrée à 20°C au laboratoire de l'UQAT selon le protocole suivant. Premièrement, un échantillon de sol avec une certaine teneur en eau est placé dans un moule de 7,8 cm de diamètre et 15 cm de hauteur pour les résidus et de 10,3 cm de diamètre et 20,4 cm de hauteur pour le gravier. Le sol est placé en plusieurs minces couches et compacté afin d'obtenir une porosité représentative de celle sur le terrain; l'objectif était de $n=0,43$ pour les résidus et $n=0,25$ pour le gravier. La sonde est insérée dans le moule en même temps que le sol de manière à ce qu'elle soit bien entourée par le sol. Une fois le sol et la sonde mis en place, le moule et la sonde sont pesés afin de déterminer la teneur en eau et la porosité du sol testé, et des lectures sont prises avec la sonde 5TM durant plusieurs minutes afin d'obtenir la valeur brute lue par la sonde. Cette valeur brute est donnée en permittivité diélectrique x 50 (ε_a x 50). Finalement, une analyse de teneur en eau gravimétrique est réalisée sur l'échantillon afin de pouvoir calculer la teneur en

eau volumique réelle grâce aux relations poids-volume. Ces étapes sont refaites pour au minimum quatre teneurs en eau différentes afin d'obtenir une courbe de calibrage des valeurs brutes lues par la sonde selon la teneur en eau volumique du milieu. Les résultats de la calibration sont présentés à la Figure 3-10 pour le gravier et pour les résidus miniers. Il a été difficile d'atteindre une porosité de 0,25 au laboratoire pour le matériel de recouvrement 0-20 mm, et la courbe de calibrage a donc été déterminée pour une porosité de 0,40.

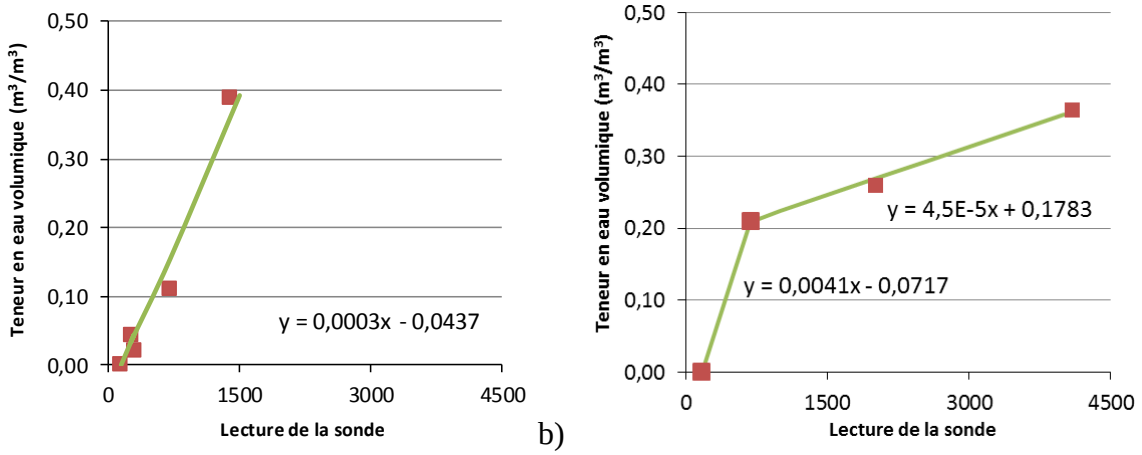


Figure 3-10 : Courbe de calibration de la sonde 5TM à 21°C : a) pour le gravier; b) pour les résidus miniers

3.7 Construction des stations de mesure

La construction des stations de mesure s'est effectuée en deux séjours sur le terrain. Le premier séjour a eu lieu du 28 juin au 7 juillet 2011 et le deuxième du 28 juillet au 4 août 2011. Lors du premier séjour, les stations non recouvertes S1, S2 et S3, la station S4 dans le recouvrement de 1,2 m et la station S7 dans le recouvrement de 0,4 m ont été construites. Les stations S5 et S6 dans le recouvrement de 1,2 m ont été construites lors du deuxième séjour. Les différentes étapes de construction menant à l'installation des stations de mesure S1 à S3 situées directement sur les résidus sont présentées à la section 3.6.1. Les étapes supplémentaires pour l'installation des stations de mesures situées dans le recouvrement isolant partiel de 1,2 m sont présentées à la section 3.6.2. Pour ce qui est de l'étude du concept de restauration final de 2,4 m, une cellule expérimentale a été construite en novembre 2012 dans le cadre d'une étude menée par Mine Raglan. Une description préliminaire du design de la cellule expérimentale ainsi que des résultats préliminaires seront présentés au chapitre 6.

3.7.1 Stations non recouvertes

La construction des stations de mesure sur les résidus non recouverts est relativement simple. Il s'agit d'insérer les cylindres servant au test de CO dans les résidus, de placer l'instrumentation dans les résidus, de faire le branchement au système d'acquisition de données et finalement de protéger les fils des senseurs.

Insertion des cylindres

À chaque station de mesure, trois montages de test de CO sont installés afin de mesurer la variabilité locale de la consommation d'oxygène des résidus ainsi que pour la validation des résultats. Les cylindres en acier inoxydable utilisés pour les tests doivent être insérés dans les résidus de manière à avoir une hauteur de dégagement d'environ 10 cm. Il est nécessaire d'appliquer une certaine force pour réussir à insérer les cylindres dans les résidus compactés. Pour ce faire, une masse de 12 livres et un madrier sont utilisés pour enfoncer les cylindres (voir Figure 3-11). Cette méthode a été utilisée pour l'insertion des cylindres sur les résidus sans recouvrement. De cette façon, des hauteurs de dégagement moyen de 10,2 cm pour S1 et de 10,6 cm pour S2 ont été obtenus. Pour la station S3, il a été plus difficile d'insérer les cylindres avec cette méthode car les résidus étaient fortement compactés, et peut-être encore gelés en profondeur. La hauteur de dégagement pour cette station est donc supérieure au deux autres stations non recouvertes, soit de 13,8 cm.

Figure 3-11 : Insertion des cylindres à l'aide d'une masse et d'un madrier

Installation de l'instrumentation

Il a été décidé de placer les appareils de mesure proche de la surface des résidus, soit dans les premiers 30 cm. En effet, cette zone est la plus intéressante pour notre étude puisque la réaction d'oxydation des résidus est une réaction qui se produit surtout en surface. Ainsi, les sondes de teneur en eau volumique et de température 5TM et les sondes de succion MPS-1 ont été installées dans les résidus miniers à des profondeurs de 25 cm, 15 cm et 5 cm. Par contre, moins de sondes MPS-1 que prévu étaient disponibles à cause d'un problème d'approvisionnement. Ainsi, la station S1 n'a pas de sonde de succion à la profondeur de 25 cm sous la surface des résidus. La Figure 3-12 présente l'emplacement de l'instrumentation placée dans les stations S1, S2 et S3 directement sur les résidus. Seulement un cylindre de test de CO est présenté par schéma pour fin de simplification.

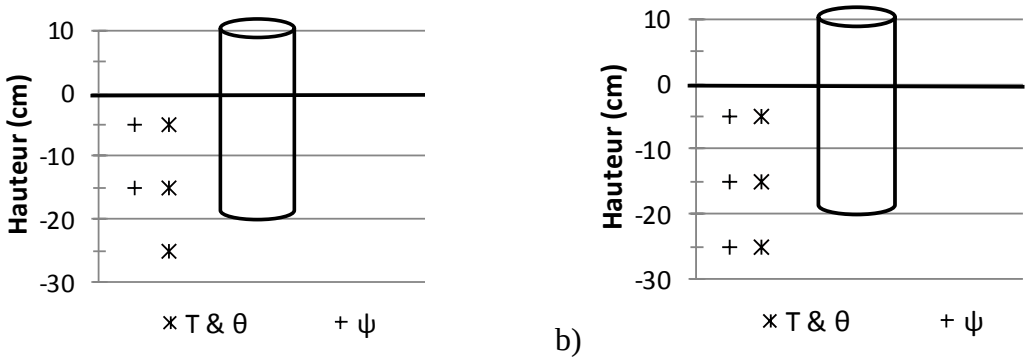


Figure 3-12 : Emplacement de l'instrumentation sur les résidus non recouverts : a) pour la station S1; b) pour les stations S2 et S3 (T =température, θ = teneur en eau volumique, ψ = succion)

La sonde 5TM a été installée verticalement dans le sol (voir Figure 3-18) afin d'éviter une potentielle accumulation d'eau sur la sonde lorsque placée à l'horizontal. Pour l'insertion des sondes dans les résidus miniers, une excavation était faite dans le sol et les dents de la sonde étaient insérées dans une des parois de l'excavation. Les sondes 5TM ont été installées à une certaine distance des cylindres de consommation d'oxygène afin d'éviter l'atténuation du champ électromagnétique du senseur et la modification de la lecture (recommandations du fabricant). Pour l'installation des sondes MPS-1, des résidus humides ont été placés autour de la sonde, en s'assurant que toute la surface de la sonde soit recouverte de matériel humide. Ensuite, de la même façon que pour la sonde 5TM, la sonde MPS-1 était placée dans les parois de l'excavation.

Une fois toutes les sondes placées dans la paroi de l'excavation, cette dernière a été remblayée en compactant le plus possible le sol autour des sondes manuellement.

Protection des fils et installation finale

La Figure 3-13 présente la station S1 sur les résidus non recouverts une fois l'installation terminée. La Figure 3-13 a) présente les trois cylindres servant au test de CO et le système d'acquisition de données EM50. Les fils des sondes sont enterrés sous les résidus afin d'être protégés des renards qui peuvent abimer les fils. Également, la portion des fils qui se connectent au système d'enregistrement de données ont été insérés dans un tuyau en PVC pour les protéger des bris potentiels causés par les animaux. La Figure 3-13 b) présente les cylindres de la station S3 avec les boites isolantes durant un test de consommation d'oxygène.

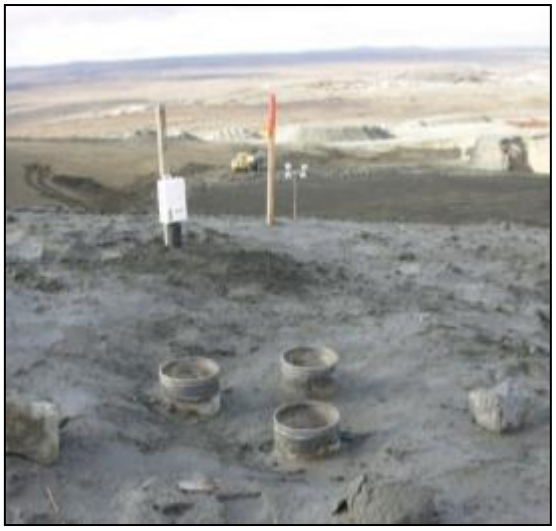
a)  b)

Figure 3-13 : Montage sur le terrain des tests de consommation d'oxygène : a) cylindres en triplicata servant au test de consommation d'oxygène; b) lors d'un test, avec les boites isolantes sur les cylindres

3.7.2 Stations recouvertes (1,2 m)

Afin d'installer les stations sous le recouvrement de 1,2 m, les étapes expliquées à la section 3.6.1 ont été répétées, suivies de quelques autres étapes. Les étapes supplémentaires sont l'excavation du recouvrement, l'installation permanente des couvercles sur les cylindres, la protection du montage sous le recouvrement, le remblayage de l'excavation et finalement la protection des fils en surface. Ces étapes sont expliquées en détail plus bas.

Excavation du recouvrement

Pour l'installation du montage du test de consommation d'oxygène modifié, une pelle excavatrice de marque Kubota a été utilisée pour excaver le recouvrement granulaire 0-20 mm afin d'atteindre les résidus miniers (voir Figure 3-14a). Lors du premier séjour de terrain, au début du mois de juillet, le sol était encore trop gelé pour pouvoir excaver le recouvrement jusqu'aux résidus miniers (Figure 3-14b). Afin d'installer les équipements avant la fin du séjour terrain, il a fallu laisser l'excavation ouverte et laisser dégeler le recouvrement, pour ensuite retourner excaver la hauteur de recouvrement dégelé jusqu'aux résidus. A cause du gel, il a été impossible d'installer les 3 stations expérimentales dans le 1,2 m lors du premier séjour. Lors du deuxième séjour, cette fois fin juillet et début août, le recouvrement était davantage dégelé, mais pas encore suffisamment pour atteindre les résidus. Il a donc fallu encore une fois laisser dégeler le recouvrement pendant quelques jours avant d'atteindre les résidus.

a) b)

Figure 3-14 : a) excavation du recouvrement isolant partiel afin d'atteindre les résidus pour l'installation des stations de mesure; b) présence de glace sous dans le recouvrement empêchant l'excavation

Insertion des cylindres

Pour les stations placées dans le recouvrement de 1,2 m, il était impossible d'insérer les cylindres servant au test de CO assez profondément pour obtenir une hauteur de dégagement de 10 cm, avec la masse comme outil. En effet, pour la station S4, seulement la masse a été utilisée et les une hauteur de dégagement moyenne de 22,0 cm a été obtenue. Ainsi, pour les stations S5 et S6, la pelle mécanique Kubota a été utilisée pour pousser les cylindres dans les résidus. De cette façon, il a été possible d'obtenir une hauteur de dégagement plus convenable, soit 11,6 cm pour

la station S5. Par contre, pour ce qui est de la station S6, les résidus étaient encore trop gelés pour enfoncer le cylindre suffisamment, même à l'aide de la pelle excavatrice. Une hauteur de dégagement moyenne de 19,6 cm a donc été obtenue pour la station S6.

Installation des couvercles

Pour créer le réservoir étanche pour le test de CO, les couvercles en aluminium, équipés du capteur d'oxygène, sont installés sur les cylindres, tel que présenté à la Figure 3-15. Ensuite, 2 tubulures par couvercles sont fixées dans le couvercle (Figure 3-15). Les tubulures doivent être d'une longueur suffisante pour atteindre la surface. Dans ce cas-ci, la longueur sélectionnée est de 2 m. De la graisse de silicone est ajoutée aux endroits du cylindre où il pourrait potentiellement se produire une infiltration d'air, soit à l'interface entre le cylindre et le couvercle et à la périphérie du capteur d'oxygène et des raccords. Une fois les cylindres enfoncés le plus possible dans les résidus, de la bentonite est mise autour des cylindres pour les stations S4, S5 et S6, afin d'empêcher toute infiltration d'air le long des parois des cylindres et sous le cylindre. Cette mesure a été prise afin de respecter l'hypothèse à la base de l'interprétation analytique du test de CO à la manière d'Elberling et Nicholson (1996), où la concentration en oxygène à l'infini dans les résidus doit être égale à 0 % ($C(\infty) = 0$).

Figure 3-15 : Cylindres avec couvercle, capteur d'oxygène et la bentonite à la base des cylindres

Protection du senseur

Puisque les tests de CO sont installés dans un recouvrement composé de roches concassées angulaires qui pourraient abimer le montage, les tubulures ainsi que le capteur et son fil sont protégés par un tubage de protection en polychlorure de vinyle (PVC) rigide de 25,4 mm de

diamètre. Le tubage est raccordé à un récipient en acier inoxydable inversé qui sert à la protection du senseur du recouvrement granulaire. Un tuyau ABS de 38,0 mm de diamètre sert de pilier entre le couvercle et le récipient protecteur. Le tubage en PVC et le pilier sont fixé au récipient grâce à un système de raccordement composé d'un réduit hexagonal et d'un raccord de 38,0 mm. La Figure 3-16 montre les raccords servant à fixer le tubage de protection 25,4 mm et le pilier ABS 38,0 mm au récipient en acier inoxydable.

a) b)

Figure 3-16 : Dispositif de protection du senseur : a) raccord se fixant au récipient de protection et tuyaux ABS servant de pilier entre le récipient et le couvercle; b) réduit hexagonal se fixant au récipient de protection et raccord male servant à maintenir le tubage en place

Une fois les raccords assemblés sur le récipient, les fils et les tubulures sont insérés dans le tubage de protection. L'extrémité du pilier ABS est refermé à l'aide de ruban adhésif afin d'empêcher que la silice emplissant le tubage de protection ne s'écoule à l'extérieur de celui-ci (voir Figure 3-17a). L'assemblage final du montage de protection du test de consommation d'oxygène modifié est visible à la Figure 3-17 b). Le tubage présent dans l'excavation à gauche des tests de CO contient des thermistances servant à un autre projet de recherche.

a) b)

Figure 3-17 : dispositif de protection : a) tous les morceaux assemblés avec le fil du capteur d'oxygène, le fil du capteur d'oxygène de contrôle et les tubulures; b) assemblage final du dispositif de protection

Instrumentation

Une fois le montage des tests de CO assemblé, l'étape subséquente est la pose de l'instrumentation. Les sondes ont été installées dans les résidus de la même façon que présenté à la section précédent. Pour installer les sondes dans le recouvrement granulaire de 0-20 mm, il n'est pas possible d'insérer les sondes dans la paroi sans les abimer, vue la nature et le degré de compactage du matériel. Pour l'installation, les sondes sont placées à la hauteur désirée et recouverte de matériel en compactant le plus possible, comme il est montré à la Figure 3-18. La sonde MPS-1 a été saturée avant la mise en place (recommandation du fabriquant).

Figure 3-18 : Installation d'un capteur 5TM dans le recouvrement granulaire

La Figure 3-19 présente l'emplacement de l'instrumentation pour les stations S4 à S6. Au début du projet, il était prévu d'installer les sondes 5TM à des hauteurs de 10 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm et 110 cm dans le recouvrement afin d'obtenir le profil thermique et hydrique sur tout l'épaisseur du recouvrement. Les sondes de succions MPS-1, disponibles en moins grande quantité, sont installées à 10 cm, 30 cm, 60 cm dans le recouvrement. Finalement, pour comprendre ce qui se passe à l'interface des résidus-recouvrement, une sonde 5TM et une sonde MPS-1 sont installées dans les résidus, à 5 cm de profondeur sous la surface des résidus. La sonde MPS-1 à la hauteur de 60 cm à la station S6 n'a pas été installée dans le recouvrement, car cette sonde était défectueuse. Ensuite, la sonde 5TM qui devait être installée à 10 cm dans le recouvrement de la station S5 a été installé à 90 cm et une sonde disponible en surplus a été installée dans les résidus à -15 cm. Ainsi, à cette station, il est possible de mesurer l'évolution du comportement thermo-hydrique de la partie supérieure du recouvrement et celui plus en profondeur dans les résidus sous le recouvrement. Finalement, pour la station S6, une sonde 5TM disponible en surplus a été placée à 90 cm dans le recouvrement.

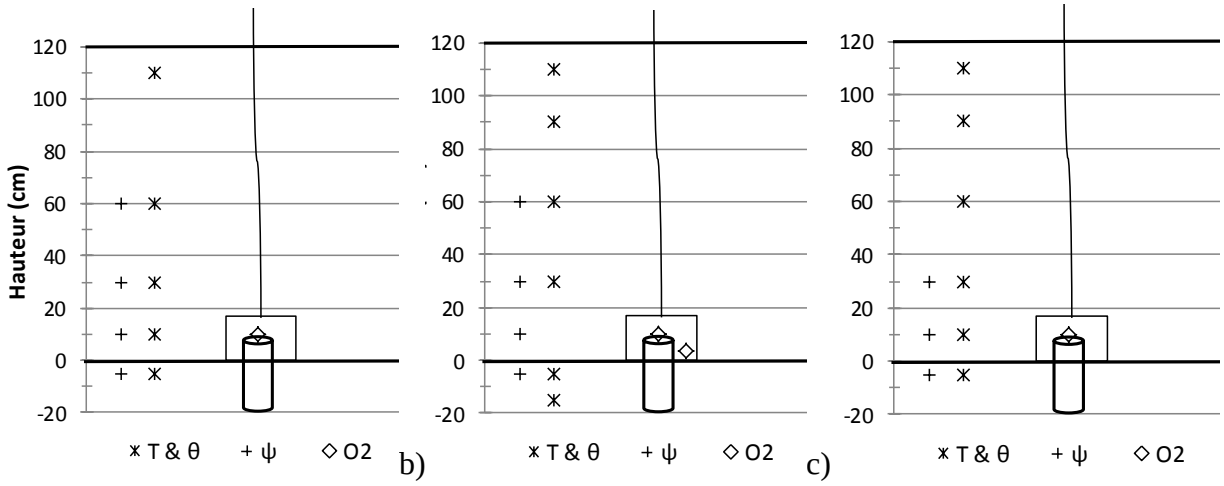


Figure 3-19 : Emplacement de l'instrumentation dans le recouvrement de 1,2 m : a) station S4; b) station S5; c) station S6

Remblayage et protection

Une fois l'installation de l'instrumentation terminée, on procède au remblayage de l'excavation. Le remblayage est fait à l'aide de la pelle excavatrice Kubota (Figure 3-20). Après le remblaiement de l'excavation, les tubages sont remplis de sable de silice pour limiter le passage de l'air et de l'eau.

Figure 3-20 : Remblayage de l'excavation à l'aide de la pelle mécanique

Finalement**,** les fils des capteurs d'oxygène et les tubulures qui dépassent à la surface du sol doivent être protégés des renards et des intempéries. Pour ce faire, des tubages en PVC de 50,8 mm de diamètre avec des bouchons sont insérés par-dessus les tubages protecteurs de 25,4 mm du montage de test de CO modifié (Figure 3-21 a).

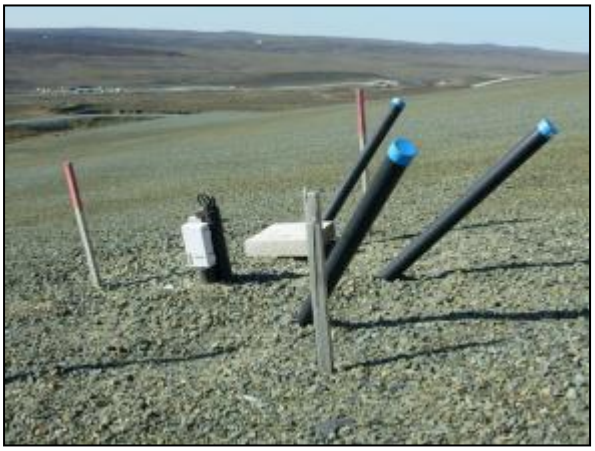
a)  b)

Figure 3-21 : Station S5 sur le recouvrement isolant partiel de 1,2 m: a) installation finale avec les différentes tubages de protection; b) capteur d'oxygène protégés par le tubage fixé à côté du système d'acquisition de données Em50

Les bouchons des tubages empêchent les précipitations d'entrer dans le tubage et de faire geler les raccords permettant d'ouvrir et de fermer les tubulures durant l'hiver. Les fils des capteurs d'oxygène sortant des tubages sont enterrés sous le recouvrement et ressortent à côté du système d'acquisition de donnée Em50. Ces fils sont protégés à l'aide d'un petit morceau de tubage, fixé à côté du système d'acquisition Em50, tel que montré à la Figure 3-21 b). Lors d'un test de consommation d'oxygène, les fils sont sortis du tubage pour être connectés au système d'acquisition de données Omega OM-CP quadvolt. En dehors des tests, les fils des capteurs sont repliés sur eux-mêmes à l'intérieur du tubage et celui-ci est fermé avec un bouchon pour protéger le système de connexion des sondes.

3.7.3 Stations recouvertes (0,4 m)

Pour installer le montage de la station S7 avec recouvrement de 0,4 m, les cylindres servant au test de CO_M sont mis en place, ensuite l'instrumentation est installée et finalement l'excavation est remblayée et l'installation protégée en surface.

Installation des cylindres

Pour installer le montage du test de CO_M, le recouvrement de 0,4 m est d'abord excavé. Une fois les résidus découverts, il est possible d'enfoncer les cylindres dans les résidus non gelés assez facilement sur 10 cm de profondeur. Ensuite, les cylindres sont remplis de gravier 0-20 mm provenant du matériel excavé en laissant une hauteur libre en surface des cylindres; pour les trois cylindres insérés, des valeurs de 5,6 cm, 6,3 cm et 7,3 cm ont été obtenues. Les trois cylindres de 60 cm de hauteur du montage de CO_M insérés dans les résidus et remplis de gravier sont présentés à la Figure 3-22. La masse volumique totale calculée avec la masse de gravier humide remis en place dans les cylindres est de 2020 kg/m^3 pour une teneur en eau massique du matériel de 2,5 %. Cette teneur en eau correspond à la teneur en eau mesurée dans le recouvrement dans le cadre de ce projet de maitrise. La porosité du matériel à l'intérieur des cylindres calculée est de 0,34, ce qui est supérieur à la porosité de 0,25 assumé sur le terrain pour le gravier. A partir de ces données, le volume des vides a été calculé et converti en hauteur équivalente, qui a été additionné à la hauteur libre en surface des cylindres. Les hauteurs de dégagements obtenus (qui intègre le volume des vides du sol), utilisés pour l'interprétation des tests de CO_M avec la méthode d'Elberling et al. (1994), sont de de 20,2 cm, 20,6 cm et 20,8 cm.

Figure 3-22 : Cylindre servant au test du CO_M dans le recouvrement de 0,4 m

Installation de l'instrumentation

La Figure 3-23 présente l'instrumentation à la station S7 recouverte de 0,4 m de gravier. Des sondes de succion, de température et de teneur en eau volumique ont été installées à 5 cm de profondeur dans les résidus et à 10 cm, 20 cm et 30 cm dans le recouvrement. Les sondes ont été installées dans les résidus et dans le gravier selon la procédure présenté dans les sections 3.7.1 et 3.7.2.

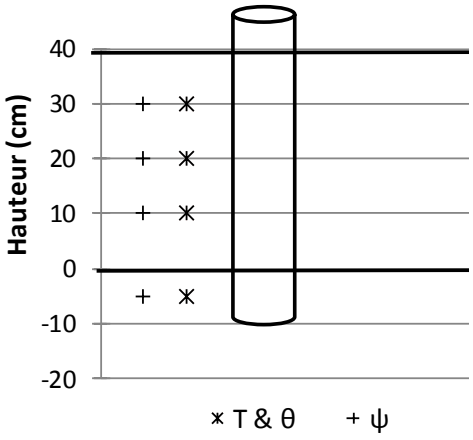


Figure 3-23 : Emplacement de l'instrumentation à la station S7 dans le recouvrement de 0,4 m

Remblayage et protection de l'installation

Une fois les trois montages de test de CO_M et l'instrumentation installés, l'excavation a été remblayée manuellement à la pelle. La Figure 3-24 présente une photo du remblayage en a) et en b) on y voit l'installation finale. Les fils des senseurs sont enterrés sous le recouvrement et ceux

sortant en surface vers le système d'enregistrement de données sont insérés dans un tuyau de PVC, dans le but de les protéger des dommages pouvant être causés par les animaux.

a) b)

Figure 3-24 : a) remblayage de la station S7; b) Allure finale de la station S7 en surface du recouvrement

3.7.4 Caractéristiques générales des stations

Le Tableau 3.4 présente les caractéristiques des stations expérimentales S1 à S7 installées sur le PAR de Mine Raglan dans le cadre de ce projet de recherche. Le niveau de compaction a été estimé visuellement durant la mise en place par comparaison entre les différentes stations de mesure. Également, l'âge des résidus est estimé selon les plans de déposition des résidus conçus par l'opérateur minier.

Tableau 3.4 : Tableau résumé des caractéristiques des stations expérimentales installées sur le PAR de Mine Raglan

Stations de mesures	**Description des stations**						**hauteur de dégagement (cm)**	
	Cylindre	$H_{couvert}$ (cm)	Installation	Année depuis la déposition	Compaction	Topographie	Par station	Moyen
S1	**A**	0	2011-07-05	1	+	Plat	9,6	10,2
	B						10,1	
	C						10,7	
S2	**A**	0	2011-08-04	1	+	Pente	10,7	10,6
	B						10,2	
	C						10,8	
S3	**A**	0	2011-07-05	4	+++	Pente	13,9	13,8
	B						13,3	
	C						14,2	
S4	**A**	120	2011-07-07	4	+	haut de pente	22,2	21,9
	B						20,6	
	C						22,9	
S5	**A**	120	2011-08-02	6	++	mi-pente	12,8	11,5
	B						11,0	
	C						10,7	
S6	**A**	120	2011-08-03	8	++	haut de pente	18,6	19,3
	B						21,7	
	C						17,5	
S7	**A**	40	2011-07-03	4	++	Haut de pente	20,2	20,5
	B						20,6	
	C						20,8	

CHAPITRE 4 MATÉRIAUX, MÉTHODES ET RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION

Dans cette étude, la détermination des différentes propriétés des matériaux impliqués est une étape importante pour la compréhension du comportement thermo-hydrique des recouvrements isolants partiels et des résidus sous-jacents. Une campagne de caractérisation des propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, hydrogéologiques et thermiques des résidus et du matériel de recouvrement 0-20 mm a donc été menée. Les méthodes employées ainsi que les résultats de cette caractérisation sont présentés dans ce chapitre.

4.1 Méthodes de caractérisation des propriétés des matériaux

Les sections suivantes traitent des méthodes employées pour caractériser les principales propriétés des échantillons de résidus miniers et du matériel de recouvrement 0-20 mm.

4.1.1 Caractérisation physique

Dans le cadre de la caractérisation physique des matériaux, une analyse granulométrique et la mesure de la densité des grains (D_r) ont été effectués sur des échantillons de résidus et du matériau de recouvrement.

Distribution granulométrique

La distribution granulométrique des résidus miniers a été déterminée à l'aide d'un granulomètre au laser de type Mastersizer S de Malvern Instruments (Lee Black et al., 1996). Cet appareil mesure le diamètre des particules sur une gamme de 0,05 µm à 879 µm, avec une précision de ±2% sur le diamètre des particules. Les particules contenues dans la solution aqueuse font dévier le faisceau laser émit avec un angle relié à la taille des particules présentes. L'intensité du rayon dévié permet de déterminer la quantité de particule d'une même classe de taille présente dans l'échantillon. De son côté, la granulométrie de la roche concassé 0-20 mm a été déterminée à l'aide d'une analyse granulométrique par tamisage pour les particules ayant un diamètre supérieur à 300 µm. Inspiré de la norme ASTM E-11-87, les tamis avec les dimensions de mailles suivant ont été utilisés : 22,4 ; 19,0 ; 16,0 ; 13,2 ; 11,2 ; 9,5 ; 8,0 ; 6,7 ; 5,6 ; 4,75 ; 4,0 ; 3,35 ; 2,8 ; 2,36 ; 2,0 ; 1,4 ; 1,18 ; 0,85 ; 0,71 ; 0,60 ; 0,50 ; 0,425 ; 0,355 ; 0,30 mm. Le granulomètre laser a été utilisé pour compléter la distribution granulométrique des particules plus fines que 0,30 mm.

Densité relative des grains (D_r)

La densité relative des grains des résidus miniers et du matériau de recouvrement 0-20 mm a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à hélium de marque Micromeritics Accupyc 1330, selon la norme ASTM D854-91. L'erreur absolue sur le résultat est de ±0,01. Afin de mesurer la densité relative des grains, une masse d'échantillon connue est introduite dans un récipient de volume connu. De l'hélium est ensuite injecté au travers de l'échantillon et l'appareil mesure la pression d'hélium qui a été injecté dans le récipient. Le volume de l'échantillon est déterminé en soustrayant la pression d'hélium, converti en volume par la loi des gaz parfait, au volume du récipient connu. Avec la masse et le volume de l'échantillon, la densité relative des grains peut être déterminée. La roche 0-20 mm a été broyée à une taille de particule inférieure à 500 µm afin d'être analysée avec le pycnomètre.

4.1.2 Caractérisation minéralogique et chimique

Les analyses par diffraction des rayons X (DRX), par spectrométrie d'émission atomique au plasma à couplage inductif (ICP-AES) et par la fournaise à induction ont été effectuées afin de connaitre la minéralogie et la composition élémentaire des échantillons. En combinant ces trois méthodes et en procédant à un calcul minéralogique, il est possible d'estimer la composition minéralogique des échantillons de façon relativement précise.

Diffraction des rayons X (DRX)

La composition minéralogique des échantillons de résidus et du recouvrement est déterminée par une analyse par diffraction des rayons X (DRX) avec l'appareil Bruker A.X.S. Advance D8. Afin d'analyser la roche de recouvrement 0-20 mm au DRX, cette dernière a dû être broyée finement à l'aide d'un pulvérisateur McCrone Micronizing Mill permettant d'atteindre une granulométrie où 90% des particules ont une taille inférieure à 10 µm. Lors de l'analyse DRX, l'échantillon est bombardé par des rayons X sous différents angles incidents variant de 5 à 70° avec le mode θ/2θ (Lee Black et al., 1996). L'identification des minéraux présents dans l'échantillon est possible grâce à leur capacité à diffracter le rayon incident avec un angle précis, selon leur cristallographie. L'intensité du rayon réfléchi permet de quantifier les minéraux avec une précision de ± 1% massique (Bouzahzah et al., 2008). Le logiciel EVA est utilisé pour

l'identification des minéraux alors que le logiciel TOPAS utilisant l'analyse Rietveld (Taylor et Hinczak, 2001) a été utilisé pour quantifier les minéraux présents.

Composition élémentaire par ICP – AES

Afin de connaitre la composition élémentaire des échantillons solides de résidus et du matériau de recouvrement, une analyse par spectrométrie d'émission atomique au plasma à couplage inductif (ICP-AES) a été effectuée (Skoog et Leary, 1992). Le principe de l'ICP-AES consiste à atomiser et exciter des éléments contenus dans une solution à l'aide d'un plasma d'argon. Lorsqu'un élément excité retrouve son état fondamental, il y a libération d'énergie sous forme de radiations électromagnétiques à des longueurs d'ondes qui sont propres à l'élément. L'intensité de ces radiations est directement proportionnelle à la concentration de l'élément dans la solution analysée. L'appareil interprète ces informations pour donner des concentrations élémentaires. Pour ces analyses, une digestion des échantillons doit d'abord être effectuée avec de l'acide nitrique concentré (HNO_3), du brome liquide (BR_2), de l'acide fluorhydrique concentré (HF) et de l'acide chlorhydrique (HCl). En tout, vingt-six éléments sont analysés : l'aluminium (Al), l'argent (Ag), l'arsenic (As), le bismuth (Bi), le calcium (Ca), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le potassium (K), le lithium (Li), le magnésium (Mg), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le sodium (Na), le nickel (Ni), le phosphore (P), le plomb (Pb), l'antimoine (Sb), l'étain (Sn), le tantale (Ta), le titane (Ti), le vanadium (V), le zinc (Zn) et le zirconium (Zr).

Fournaise à induction

La fournaise à induction permet de quantifier le soufre et le carbone totaux présents dans les échantillons. Ces informations s'ajoutent à celle fournies par l'analyse élémentaire avec l'ICP-AES. La fournaise utilisée est de marque Eltra CS-2000 *Carbon/Sulfur determinator*. Pour déterminer la teneur en carbone et le soufre total, une combustion de l'échantillon est effectuée grâce au four à induction à haute fréquence de l'appareil. Le sulfure et le carbone présents sont oxydés pour former du SO_2 et du CO_2, qui sont récupérés et analysés. La concentration en SO_2 et CO_2 est déterminée par absorption des radiations infrarouges de longueurs d'ondes caractéristiques des gaz analysés. Ces concentrations permettent d'évaluer les quantités totales de SO_2 et de CO_2 produit lors de la combustion qui sont ensuite rapportées par rapport à la masse initiale de l'échantillon pour obtenir la teneur en soufre et en carbone avec une précision de ±

0,5%. D'autres gaz formés lors de la combustion telle que le SO_3, le CO et la vapeur d'eau peuvent interférer avec l'analyse infrarouge. Les gaz récupérés doivent donc passer au travers de divers catalyseurs, trappes et filtres pour éliminer les gaz pouvant nuire à l'interprétation.

4.1.3 Caractérisation hydrogéologique

Conductivité hydraulique saturé

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des résidus miniers a été mesurée avec un essai de perméabilité à charge variable, selon la norme ASTM D-5084. Lors de cet essai, la charge hydraulique est mesurée et la différence de charge permet de calculer la conductivité hydraulique de l'échantillon. Le perméamètre utilisé a un diamètre de 10,0 cm et une hauteur de 15,5 cm. La conductivité hydraulique saturée de la roche 0-20 mm a été mesurée avec un essai de perméabilité à charge constante, mené selon la norme ASTM 2434. Cet essai, utilisé pour les sols plus perméables ($k_w > 10^{-3}$ cm/s), consiste à mesurer le débit d'eau évacué de l'échantillon pour une alimentation en eau continue et pour une différence de charge constante entre l'entrée et la sortie du perméamètre (Aubertin et al., 2003). L'échantillon testé avait 22,9 cm de hauteur et un diamètre de 24 cm, avec une distance entre les deux manomètres sur le perméamètre de 17,9 cm. Le sol a été mis en place en plusieurs fines couches et compacté à l'aide d'un marteau Proctor à une masse volumique sèche de 2202 kg/m^3 pour une porosité de 0,27. Neuf essais à plusieurs débits ont été réalisés. Pour ces essais, 3 débits ont été utilisés, soit un débit faible (<1 mL/s), un intermédiaire (2,7 mL/s < débit < 3,7 mL/s) et un fort (5,5 mL/s).

Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau des résidus miniers est mesurée en laboratoire avec la cellule de pression. C'est une méthode fréquemment utilisée pour les matériaux fins (inspiré de la norme ASTM D3152-72). Pour tracer la courbe de rétention d'eau en drainage d'un matériau, un échantillon est placé sur une plaque de céramique poreuse dans une cellule de pression. Dans cette étude, la pression d'entrée d'air de la pierre céramique utilisée est de 1 500 kPa et sa conductivité hydraulique saturée est de 2,59 x 10^{-11} m/s. L'échantillon est soumis à une pression d'azote (l'azote est utilisé pour éviter les réactions d'oxydation des minéraux sulfureux) tandis que l'eau de sortie subit une pression équivalente à la pression atmosphérique. La pression appliquée dans la cellule entraîne l'écoulement de l'eau de l'échantillon, à travers la pierre

poreuse, via un tube d'écoulement jusqu'à l'extérieur de la cellule. Lorsque la teneur en eau volumique du sol est en équilibre avec la pression appliquée, l'écoulement de l'eau cesse et la pression appliquée est considérée équivalente à la succion matricielle du sol. En procédant par palier de pression et en mesurant chaque fois la quantité d'eau évacuée, on peut déterminer la courbe de rétention d'eau. Dans les essais de succion sur les résidus miniers, on assume habituellement que la variation de volume des échantillons durant les essais est négligeable.

Figure 4-1: Montage de l'essai à la cellule de pression pour déterminer la CRE des résidus miniers

L'essai en colonne a été utilisé afin de déterminer la courbe de rétention d'eau en drainage du gravier. Cet essai est mené dans une colonne de 14 cm de diamètre et de 50 cm de hauteur. La colonne est remplit de gravier; des sondes 5TM (pour mesurer la teneur en eau volumique) et des tensiomètres (pour mesurer la succion) sont placées à 15 et 30 cm lors du placement du matériel dans la colonne (voir Figure 4-2). Le tensiomètre mesure la succion matricielle à des valeurs plus faible (0-80 kPa) que la technologie à matrice granulaire (10 à 200 kPa). Cet instrument est donc plus adapté pour déterminer la CRE du gravier. Une fois le matériel en place, la colonne est saturée par le bas à faible débit afin d'évacuer l'air présent dans les pores du matériel. Ensuite, la colonne est drainée à faible débit afin d'obtenir la CRE en drainage. Durant le drainage de la colonne, les données mesurées de succion et de teneur en eau volumique sont enregistrées en

continu par un système d'acquisition de données. Les points ψ et θ pris simultanément permettent de tracer la CRE du matériel.

Figure 4-2 : Colonne instrumentée utilisée pour déterminer la CRE du gravier en laboratoire

4.1.4 Caractérisation thermique

La conductivité thermique des matériaux à l'étude a été déterminée au laboratoire de géotechnique du Département de génie civil et des eaux de l'Université Laval. Les techniques de la sonde à aiguille et du fluxmètre ont été utilisées pour déterminer la conductivité thermique gelée et non gelée des résidus miniers et du gravier.

Sonde à aiguille

Une technique utilisant une sonde à aiguille a été utilisée pour déterminer la conductivité thermique gelée et non gelée des résidus miniers. Cette technique a déjà été utilisée par Nixon et al. (2000) pour déterminer la conductivité thermique des résidus de Raglan. La sonde à aiguille TP08 de Hukseflux Thermal Sensors a été utilisée pour faire les tests (voir Figure 4-3). L'aiguille (4) est équipée d'un élément chauffant (2), pouvant fournir une source de chaleur constante, d'un thermocouple (3) et d'un senseur de température (1) localisé dans la base (6) de l'aiguille pouvant mesurer la température.

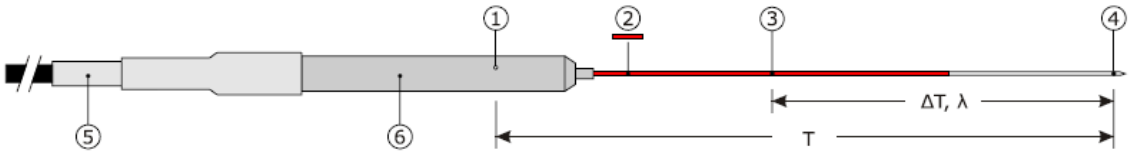


Figure 4-3 : Sonde à aiguille TP08 utilisé pour la mesure de la conductivité thermique des résidus (tiré d'Hukseflux Thermal Sensor)

L'aiguille est insérée dans le milieu à analyser et un flux de chaleur (Q) est imposé à l'échantillon causant une augmentation de la température (ΔT), qui dépend de la conductivité thermique de l'échantillon. La conductivité thermique est déterminée avec l'équation 4.1, à partir de deux mesures de température, à des temps t_1 et t_2, supérieurs à 30 secondes.

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\Delta T} ln\left(\frac{t2}{t1}\right) \qquad [4.1]$$

La conductivité thermique du milieu est déterminée quand l'échantillon est en état transitoire, soit lorsque la température de l'échantillon n'est pas encore stable. Cette méthode a été standardisée par la norme ASTM D 5334-00. La technique est valable entre autre pour les sols granulaires ayant un diamètre des particules inférieur à 0,5 mm avec une précision de ± (3% + 0,02) W/m°C pour les milieux homogènes ayant un bon contact avec la sonde. La sonde peut mesurer des conductivités thermiques entre 0,1 et 6 W/m°C. La conductivité thermique non gelée des résidus de concentrateur a été déterminée à température ambiante du laboratoire, soit environ 21°C, pour des taux de saturation autour de 50, 60, 75, 90 et 100%. La conductivité thermique gelée a été déterminée à -4 °C dans une chambre froide à température contrôlée, et ce pour des taux de saturation de 60, 75, 90 et 100%. La porosité de l'échantillon testé est de 0,44 pour les différents essais. Les résultats ont permis de tracer la courbe de la conductivité thermique selon le taux de saturation pour l'état gelé et non gelé.

Fluxmètre

Le fluxmètre est utilisé pour déterminer la conductivité thermique gelée et non gelée du gravier. Cette technique a donné de bons résultats pour déterminer la conductivité thermique de matériaux de fondation ainsi que des échantillons de roche solide (Côté et Konrad, 2005b, 2007). Le montage expérimental tel qu'utilisé dans les travaux de Côté et Konrad (2005b) est présenté à la Figure 4-4.

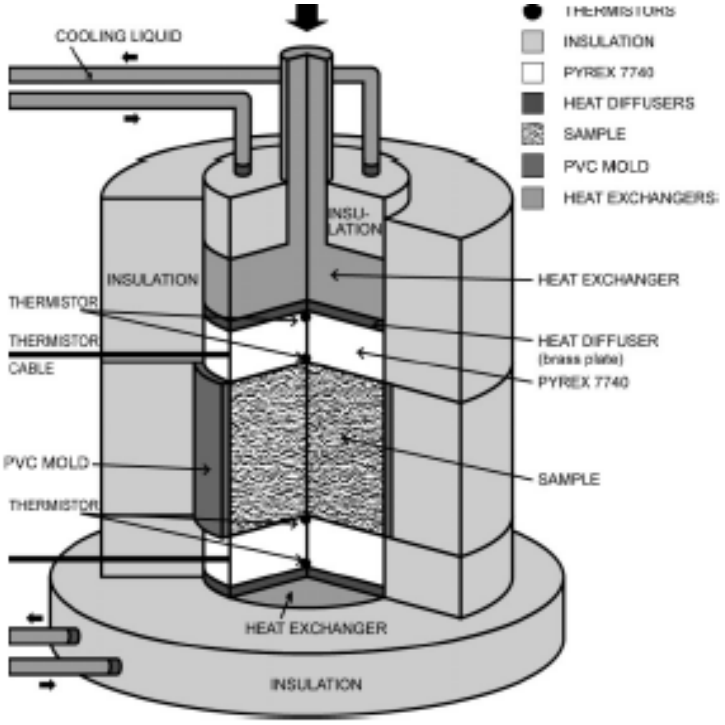


Figure 4-4 : Montage du fluxmètre tel que présenté dans les travaux de Côté et Konrad (2005b)

Une version plus récente du montage présenté à la Figure 4-4 est utilisée pour déterminer la conductivité thermique du gravier. L'échantillon de sol est d'abord compacté dans un moule cylindrique de 8,07 cm de hauteur par 10,2 cm de diamètre s'il s'agit d'un sol ou taillé selon ces mesures s'il s'agit de roc. L'échantillon est ensuite placé dans une chambre à température contrôlée, elle-même située à l'intérieur d'une grande chambre froide maintenue à une température de -15°C. Deux fluxmètres en cuivre instrumentés avec 5 thermistances sont placés aux deux extrémités de l'échantillon. Les fluxmètres en cuivre remplacent les rondelles de pyrex équipées de thermistances de la Figure 4-4. Des rondelles d'étain sont ajoutées pour faciliter l'échange thermique entre les fluxmètres et l'échantillon. La température aux fluxmètres est maintenue constante par deux systèmes d'échange de chaleur indépendants pour créer un flux de chaleur vertical constant à travers de l'échantillon. Le montage est isolé par de la laine isolante pour limiter les pertes de chaleur radiales. Une différence de température d'environ 8°C est imposée à l'échantillon grâce aux échangeurs de chaleur. La chambre contrôlée est maintenue à la moyenne des températures appliquées aux deux extrémités de l'échantillon. Lorsque la température et le flux de chaleur enregistrés aux fluxmètres sont constants, le régime permanent est atteint dans l'échantillon et la conductivité thermique peut être calculée selon l'équation 4.2,

où Δh est la hauteur de l'échantillon en mètre, ΔT est la différence de température entre les deux extrémités de l'échantillon en °C, q_u et q_l est le flux de chaleur mesuré aux deux extrémités de l'échantillon en W/m^2.

$$\lambda = \frac{q_u + q_l}{2} \frac{\Delta h}{\Delta T} \qquad [4.2]$$

L'erreur relative sur la conductivité thermique mesurée au fluxmètre est de ± 5%. Plus de détails sur cette technique sont disponibles dans Côté et Konrad (2005b). Le test au fluxmètre a été mené sur le même échantillon dans l'état gelé et non gelé. La température visée pour les fluxmètres était de -9°C et -1°C à l'état gelé et de 1°C et 9°C à l'état non gelé. Pour le test, l'échantillon a été compacté en trois couches égales avec un système de compaction par vibration. Un échantillon avec une porosité de n = 0,25 a été testé pour les différents taux de saturation de 4 %, 7 %, 19 %, 27 % et 57 % pour l'état non gelé et de 19 %, 27 % et 57 % pour l'état gelé. Cela correspond aux valeurs attendu sur le terrain (0,01< θ < 0,15) pour une porosité de n = 0,25.

4.1.5 Détermination de la réactivité des résidus miniers

Des tests de consommation d'oxygène ont été réalisés en laboratoire afin de déterminer la capacité d'oxydation des résidus miniers étudiés en conditions de température de la pièce. Pour ce faire, des tests ont été menés à porosité constante, pour différents degrés de saturation. Les tests de CO ont été menés dans une colonne ayant un diamètre de 14 cm et 29 cm de hauteur. Un couvercle permet de créer une chambre d'air étanche au-dessus des résidus dans la colonne et un senseur Apogee SO-110 fixé au couvercle permet de mesurer la diminution d'oxygène dans la colonne (voir Figure 4-5). Pour la mise en place du sol dans la colonne, les résidus ont été déposés en trois couches égales et compactées à l'aide d'un marteau Proctor à chaque couche. Une diminution d'oxygène d'un maximum de 3% en 3 h à 5 h est visée pour ces tests, selon la méthode décrite précédemment au Chapitre 2. La hauteur de dégagement a varié entre 10 et 20 cm afin d'obtenir la baisse de concentration en oxygène dans le temps désiré. L'interprétation des résultats a été faite selon la méthode analytique d'Elberling et al. (1994)

.

Figure 4-5 : Montage utilisé pour mesurer la réactivité des résidus miniers en laboratoire

4.2 Résultats de la caractérisation des matériaux

L'évaluation des propriétés physiques, minéralogiques et chimiques par les méthodes décrites à la section 4.1 a été effectuée sur six échantillons de résidus miniers (T-S1 à T-S5 et T-S7) et sur quatre échantillons de gravier (C-S4 à C-S7). Ces échantillons ont été prélevés sur le terrain lors de l'installation des stations de mesures, à l'été 2011, à l'emplacement des stations de mesure S1 à S7. De plus, des résidus frais et du gravier supplémentaire ont été transportés au laboratoire pour faire les analyses des propriétés thermiques et hydrogéologiques.

4.2.1 Résultats de la caractérisation physique

Distribution granulométrique

Les principales caractéristiques granulométriques des échantillons T-S1 à T-S7 et C-S4 à C-S7 sont résumées au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : principales caractéristiques granulométriques des échantillons analysés

Propriété	D_{10} (µm)	D_{30} (µm)	D_{50} (µm)	D_{60} (µm)	C_C (-)	C_U (-)
T-S1	1,5	6,1	14,4	22,9	1,1	14,8
T-S2	1,7	6,7	17,4	28,7	0,9	16,4
T-S3	2,0	8,3	21,0	32,3	1,1	16,5
T-S4	1,7	6,6	16,5	26,5	1,0	15,7
T-S5	1,6	6,7	16,4	25,1	1,1	15,4
T-S7	1,7	6,8	17,2	27,2	1,0	16,3
C-S4	200	2100	6200	8000	2,8	40,0
C-S5	400	4200	8000	9800	4,5	24,5
C-S6	400	3800	7000	8000	4,5	20,0
C-S7	20	1200	4200	6400	11,3	320,0

La distribution granulométrique des résidus miniers est similaire d'un échantillon à l'autre avec un coefficient de courbure ($C_C=D_{30}^2/(D_{60}*D_{10})$) variant entre 0,9 et 1,1 et un coefficient d'uniformité ($C_U=D_{60}/D_{10}$) variant entre 14,8 et 16,5. Le D_{50} des échantillons T-S1 à T-S7 varie entre 14,4 µm et 21 µm et le pourcentage des particules fines (passant 80 µm) est de 83%, 79%, 80%, 81%, 84% et 81% respectivement. De son côté, le gravier présente une plus grande variation d'un échantillon à l'autre avec un C_C qui varie de 2,8 à 11,3 et un C_U entre 20,0 et 320,0. Le D_{50} des échantillons C-S4 à C-S7 varie entre 4200 et 8000 µm et le pourcentage de particules fines est de 9 %, 6%, 7% et 14,5 % pour C-S4, C-S5, C-S6 et C-S7 respectivement. Les échantillons ont tous un minimum de 6% de particules fines tel que spécifié par AMEC (AMEC, 2007c) pour le matériel de construction du recouvrement. L'échantillon C-S7 diffère des autres avec une teneur en particules fines plus élevée. En utilisant la classification USCS (Unified Soil Classification System; McCarthy, 2008), les résidus miniers de Mine Raglan sont catégorisés comme un silt de faible plasticité (ML). De son côté, le gravier est classé comme un gravier bien étalé (GW). Les courbes granulométriques des échantillons ainsi que la objectifs granulométriques du gravier pour la construction du recouvrement (AMEC, 2007a) sont présentés à la Figure 4-6.

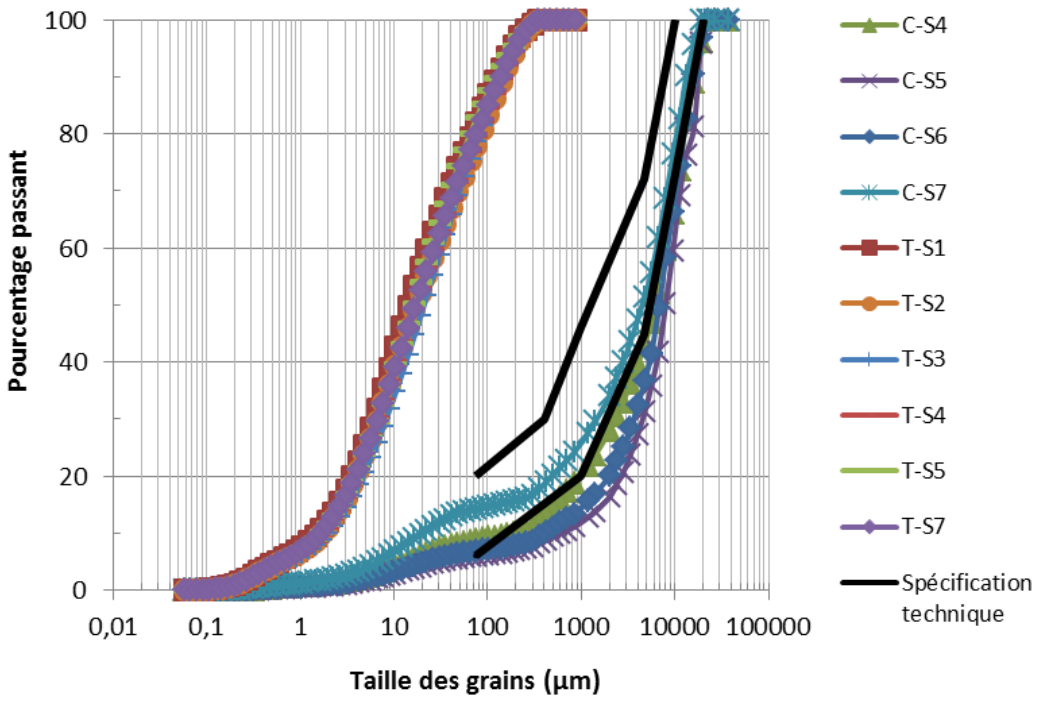


Figure 4-6 : Distribution granulométrique des échantillons de gravier (C-S4 à C-S7) et de résidus miniers (T-S1 à T-S7); les objectifs granulométriques du concepteur du recouvrement sont également indiqués dans la figure

On remarque sur la Figure 4-6 que la granulométrie des échantillons de gravier se situe majoritairement sous la limite inférieure des objectifs granulométriques pour la fraction grossière et moyenne, à l'exception de l'échantillon C-S7. Les objectifs granulométriques sont respectés pour la portion fine des quatre échantillons. Des contrôles de qualité sont effectués sur le matériel mis en place lors des travaux de recouvrement du parc à résidus. Lors des travaux de 2008 et 2010, la distribution des particules grossières et moyennes était légèrement en dessous de la limite minimale et les particules fines respectaient les fuseaux (AMEC, 2008, 2010) tandis que les particules grossières étaient légèrement sous la limite maximale et les particules fines et moyennes respectaient le fuseau des objectifs granulométriques (AMEC, 2007d).

Densité relative des grains (D_r)

La densité relative des grains mesurée en laboratoire est présentée au Tableau 4.2 pour les résidus et pour le gravier. Le D_r moyen mesuré pour les résidus est de 2,907, avec des valeurs variant de 2,862 à 2,942. Ces valeurs concordent bien avec la valeur de D_r de 2,930 mentionnées dans le rapport de SNC Lavalin (2009). Le D_r mesuré moyen du matériau 0-20 mm est de 3,008 avec des

valeurs variant entre 3,000 et 3,017, ce qui correspond bien aux valeurs trouvées dans les études précédentes. En effet, une étude portant sur 10 180 échantillons de roche stérile de Mine Raglan ayant un contenu en nickel inférieur à 0,1% mentionne des valeurs de D_r moyenne de 3,010 pour la roche volcanique (Nemcsok, 2009). De plus, des analyses de la densité relative des grains faites sur de la roche volcanique de tailles de 0 à 7 cm en provenance d'une carrière proche du PAR de Mine Raglan (Ethier, 2011) montrait un D_r moyen de 2,983.

Tableau 4.2 : Densité relative des grains des résidus et du gravier

	Densité relative des grains (-)	
	Résidus	**Gravier**
S1	2,931	
S2	2,930	
S3	2,895	
S4	2,942	3,000
S5	2,878	3,017
S6	-	3,000
S7	2,862	3,014
Moyenne	2,907	3,008

4.2.2 Résultats de la caractérisation minéralogique et chimique

Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée sur les échantillons T-S1 à T-S7 et C-S4 à C-S7. Les résultats sont présentés au Tableau 4.3 pour le gravier et au Tableau 4.4 pour les résidus.

Tableau 4.3 : Composition minéralogique des échantillons de gravier

Minéral	Formule chimique	Composition minéralogique (% p/p)			
		C-S4	**C-S5**	**C-S6**	**C-S7**
Actinolite	$Ca_2(Mg,Fe{++})_5Si_8O_{22}(OH)_2$	33,6	36,8	40,2	42,2
Albite	$NaAlSi_3O_8$	14,4	15,3	12,8	9,6
Anorthite	$CaAl_2Si_2O_8$	11,2	10,2	7,0	12,5
Calcite	$CaCO_3$			4,5	1,8
Chlorite	$(Mg, Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	14,7	11,9	20,0	16,5
Épidote	$Ca_2(Fe,Al)Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$	17,5	19,5	10,9	11,8
Quartz	SiO_2	8,3	6,0	4,1	4,7
Rutile	TiO_2	0,5	0,3	0,5	0,9

Tableau 4.4 : Composition minéralogique des échantillons de résidus miniers

Minéral	Formule chimique	Composition minéralogique (% p/p)					
		T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S7
Actinolite	$Ca_2(Mg,Fe{++})_5Si_8O_{22}(OH)_2$				4,0	3,9	
Calcite	$CaCO_3$	0,8	1,0	0,6	3,0	1,5	2,2
Chlorite	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	12,8	9,2	12,2		12,9	13,9
Gypse	$CaSO_4 \cdot 2(H_2O)$						1,5
Hornblende	$Ca_2[Mg_4(Al,Fe)]Si_7AlO_{22}(OH)_2$	9,7	9,2	10,8	7,9	13,7	11,9
Lizardite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	40,9	38,4	51,5	50,9	46,9	49,2
Magnétite	Fe_3O_4	7,7	8,5	12,4	14,6	10,5	9,9
Pentlandite	$(Fe,Ni)_9S_8$	0,9	1,4	0,4	0,6	0,8	
Pyrite	FeS_2				0,4		
Pyrrhotite	Fe(1-x)S	10,4	13,2	12,1	18,7	10,0	11,5
Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	16,9	19,2				

Les résidus miniers sont majoritairement composés de lizardite, de magnétite, de chlorite et d'hornblende. Le principal sulfure présent est la pyrrhotite en quantité variant de 10 à 18,7%. De son côté, le gravier est majoritairement composé d'actinolite, et ensuite d'épidote, d'albite et d'anorthite.

Composition élémentaire par ICP – AES

Les résultats d'ICP-AES sont présentés en partie par million (ppm) au Tableau 4-5 pour les échantillons de résidus miniers T-S1 à T-S7 et au Tableau 4-6 pour les échantillons de gravier C-S4 à C-S7. Les éléments dont la concentration est inférieure à la limite de détection n'ont pas été présentés dans les tableaux. Les principaux éléments qui se retrouvent dans les résidus sont l'aluminium, le calcium, le fer et le manganèse. Les principaux éléments présents dans les échantillons de gravier sont l'aluminium, le calcium, le fer, le manganèse et le sodium. Ces résultats concordent bien avec la minéralogie analysée à la DRX. En effet, ces éléments sont présents dans les minéraux majeurs composant les résidus et le gravier (voir les formules chimiques dans les tableaux 4-3 et 4-4).

Tableau 4.5 : Résultats de l'analyse ICP-AES pour le gravier

Éléments	Limite de détection	Composition chimique (ppm)			
		C-S4	C-S5	C-S6	C-S7
Al	250	65300	64700	53900	57000
As	10	<10	10	40	<10
Ca	100	64900	66600	70600	64200
Co	10	50	40	50	50
Cr	10	180	170	430	360
Cu	10	170	160	130	150
Fe	500	72900	72700	72300	71800
Li	5	12	10	13	13
Mg	50	41200	42800	62300	59700
Mn	10	1080	1010	1190	1120
Na	100	10700	11900	10200	11100
Ni	10	170	160	370	350
Ti	20	4290	4390	3670	3960
V	5	237	245	209	216
Zn	10	70	80	70	80
Zr	10	30	30	30	30

Tableau 4.6 : Résultats de l'analyse ICP-AES pour les résidus miniers

Éléments	Limite de détection	Composition chimique (ppm)					
		T-S1	T-S2	T-S3	T-S4	T-S5	T-S7
Al	250	19400	19300	18500	16400	18900	18600
Ca	100	18900	18300	14100	15000	15700	15800
Co	10	70	70	60	90	80	50
Cr	10	910	880	960	920	900	880
Cu	10	1370	1480	1300	2010	1790	1160
Fe	500	137064	143233	148655	159054	137184	136228
Mg	50	159458	154801	156411	154690	166348	148218
Mn	10	1190	1180	1030	1140	1070	1120
Na	100	900	1600	2500	1000	900	4200
Ni	10	3420	3290	3120	4430	4270	2530
Ti	20	1330	1340	1160	1140	1280	1210
V	5	95	95	84	87	90	85
Zn	10	80	80	70	90	70	100

Fournaise à induction

Les résultats de soufre et carbone pour les échantillons de résidus et de gravier sont présentés au Tableau 4.7. Les échantillons de gravier ne contiennent presque pas de soufre, tandis que les résidus en contiennent en moyenne 4,93% p/p.

Tableau 4.7 : Résultats de l'analyse soufre-carbone par la fournaise à induction

	Soufre (% p/p)		Carbone (% p/p)	
	Résidus	Gravier	Résidus	Gravier
S1	4,38		0,294	
S2	4,95		0,264	
S3	4,69		0,185	
S4	6,28	0,053	0,216	0,176
S5	-	0,033	-	0,120
S6	4,12	0,071	0,215	0,718
S7	5,19	0,094	0,254	0,263

Il est possible de comparer les résultats obtenus par DRX avec ceux obtenus avec les analyses de S-C par fournaise à induction afin de valider la minéralogie et la quantification trouvée par l'analyse DRX. Pour se faire, la teneur en soufre et en carbone ($X_{éléments}$) associée aux différents minéraux présents est calculée à partir du pourcentage en poids du minéral en question (X_i) donné par l'analyse DRX et à partir de la teneur de l'élément dans le minéral selon sa stœchiométrie ($M_{éléments}$) (éq. 4.3).

$$X_{éléments} = \frac{X_i}{100} \cdot M_{éléments} \qquad [4.3]$$

Un calcul minéralogique a été effectué pour vérifier les résultats de la DRX avec ceux donnés par la fournaise à induction pour le souffre et le carbone totaux. Les résultats de ces calculs sont présentés au Tableau 4.8. On observe que la teneur en soufre et en carbone calculée à partir des résultats de la DRX donne des résultats semblables à ceux obtenus pour les analyses par la fournaise à induction pour les deux matériaux, ce qui confirme les résultats de la caractérisation minéralogique. Il faut noter qu'il y a une erreur d'environ 1% sur la quantification des matériaux au DRX et de 0,5% sur l'analyse du soufre et du carbone à la fournaise à induction.

Tableau 4.8 : Tableau comparatif du S et C selon les calculs minéralogique et les analyses S-C à la fournaise à induction

	% S (DRX)	%S (S-C)	% C (DRX)	% C (S-C)
T-S1	4,20	4,38	0,10	0,29
T-S2	5,44	4,95	0,11	0,26
T-S3	4,68	4,69	0,08	0,18
T-S4	7,43	6,28	0,36	0,22
T-S5	4,02	4,12	0,18	0,22
T-S7	4,32	5,19	0,26	0,25
C-S4	0,00	0,05	0,00	0,18
C-S5	0,00	0,03	0,00	0,12
C-S6	0,00	0,07	0,54	0,72
C-S7	0,00	0,09	0,21	0,26

4.2.3 Résultats de la caractérisation hydrogéologique

Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée du matériel 0-20 mm a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à charge constante. Les résultats sont présentés au Tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Résultats de l'essai à charge constante pour le matériel 0-20 mm

Essai no	Charge (cm)	V (cm3)	temps (s)	Débit (ml/s)	k_{sat} (cm/s)
1	0,2	70	338	0,21	4,1E-02
2	0,2	344	492	0,70	1,4E-01
3	0,4	214	82	2,62	2,6E-01
4	0,4	191	71	2,70	2,7E-01
5	0,4	587	162	3,63	3,6E-01
6	0,5	455	125	3,64	2,9E-01
7	0,4	259	71	3,64	3,6E-01
8	0,5	241	66	3,65	2,9E-01
9	0,7	193	35	5,51	3,1E-01
				Moyenne	2,6E-01
				Écart-type	1,0E-01

La conductivité hydraulique moyenne saturée obtenue pour les 9 essais est de 2,6 x 10^{-1} cm/s avec un écart-type de 1,0 x 10^{-1} cm/s. Le k_{sat} calculé avec le modèle prédictif KCM de Mbonimpa et al. (2002) pour les sols granulaires pour une porosité pour un d_{10} de 0,04 cm et C_U de 20 donne

une valeur de 2,2 x 10^{-2} cm/s. Le modèle prédit un k_{sat} plus faible d'un ordre de grandeur par rapport à celui mesuré avec le test à charge constante. Selon les travaux de Peregoedova (2012), le k_{sat} des stériles miniers est toujours sous-estimé de 1 à 2 ordres de grandeur avec le modèle KCM versus les valeurs obtenues en laboratoire, principalement en raison de la nature hétérogène des stériles. Le matériel testé étant un matériel hétérogène à granulométrie étalée, les observations de Peregoedova (2012) pourraient expliquer la différence observée entre les résultats de laboratoire et ceux obtenus avec le modèle KCM.

La conductivité hydraulique saturée des résidus miniers est mesurée avec le test de perméabilité à charge variable. Quatre essais ont été menés sur les résidus pour un échantillon ayant une porosité entre 0,41 et 0,43. Les résultats du test de perméabilité et du modèle KCM sont présentés au Tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Résultats des essais de perméabilité à charge variable et résultat du modèle KCM pour les résidus miniers

Essai	k_{sat} (cm/s)	k_{sat} KCM (cm/s)	porosité (-)
1	6,2E-05	6,8E-06	0,41
2	3,6E-05	6,8E-06	0,41
3	1,7E-05	6,8E-06	0,41
4	2,5E-05	9,9E-06	0,43
Moyenne	3,5E-05	7,6E-06	0,42

La conductivité hydraulique saturée moyenne obtenue est de 3,5 x 10^{-5} cm/s, pour une porosité variant entre 0,41 et 0,43. Le modèle de KCM pour les sols sans cohésion donne un k_{sat} moyen de 7,6 x 10^{-6} cm/s (n = 0,42). Dans le cas des résidus miniers, le modèle de KCM prédit des valeurs qui se situent à l'intérieur d'un ordre de grandeur de celles mesurées.

Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention en drainage du matériel 0-20 mm a été obtenue à partir de deux essais en colonne sur un échantillon ayant une porosité de n = 0,38. Le résultat de l'essai est présenté à la Figure 4-7 pour les sondes placées dans le bas de la colonne (15 cm) avec la CRE lissée avec le modèle de VG (éq. 2.20) à l'aide du code RETC (van Genuchten et al., 1991). Les résultats à 30 cm sont équivalents à ceux obtenus à 15 cm. À partir de la méthode des tangentes pour la courbe VG (Fredlund et Rahardjo, 1993), la pression d'entrée d'air (ψ_a) est de 5 cm et la valeur

résiduelle (ψ_r) est de 70 cm pour une teneur en eau à saturation (θ_s) de 0,38 et une teneur en eau résiduelle (θ_r) de 0,02.

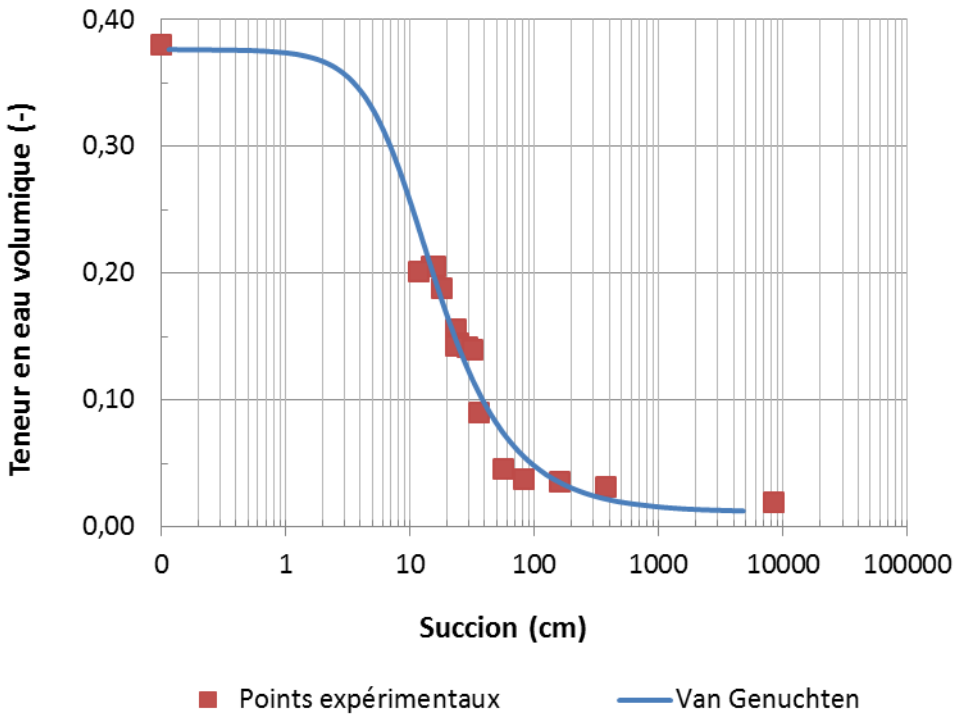


Figure 4-7 : Courbe de rétention d'eau du gravier 0-20 mm obtenue en laboratoire et lissée avec le modèle de Van Genutchen et CRE

Pour les résidus, les résultats de l'essai à la cellule à pression C2 (n=0,40) et C4 (n=0,41), la CRE lissée avec le code RETC pour le modèle de VG à partir des données de laboratoire sont présentés à la Figure 4-8. L'essai C2 à mieux fonctionné que l'essai C4, où la courbe de rétention d'eau n'est pas constante. Il semble y avoir eu un problème dans le drainage vers des valeurs de succion de 3000 cm. À partir de la méthode des tangentes pour la courbe VG de C2, la succion ψ_a est de 300 cm et le ψ_r est de 10 000 cm pour une teneur en eau volumique à la saturation de 0,39 et une teneur en eau résiduelle de 0,04. Pour l'essai C4, la succion ψ_a est de 260 cm et ψ_r est d'environ 16 000 cm pour une teneur en eau volumique à saturation de 0,39 et une teneur en eau résiduelle de 0,6. Ces résultats sont typiques des résidus miniers catégorisés comme des silts à faible plasticité (ML) qui ont des valeurs de ψ_a entre 100 et 700 cm et des valeurs de ψ_r entre 5500 et 8000 cm (Bussière, 2007). Les paramètres utilisés pour le lissage des courbes de rétention d'eau avec le modèle de VG sont présentés au Tableau 4.11 pour les deux matériaux.

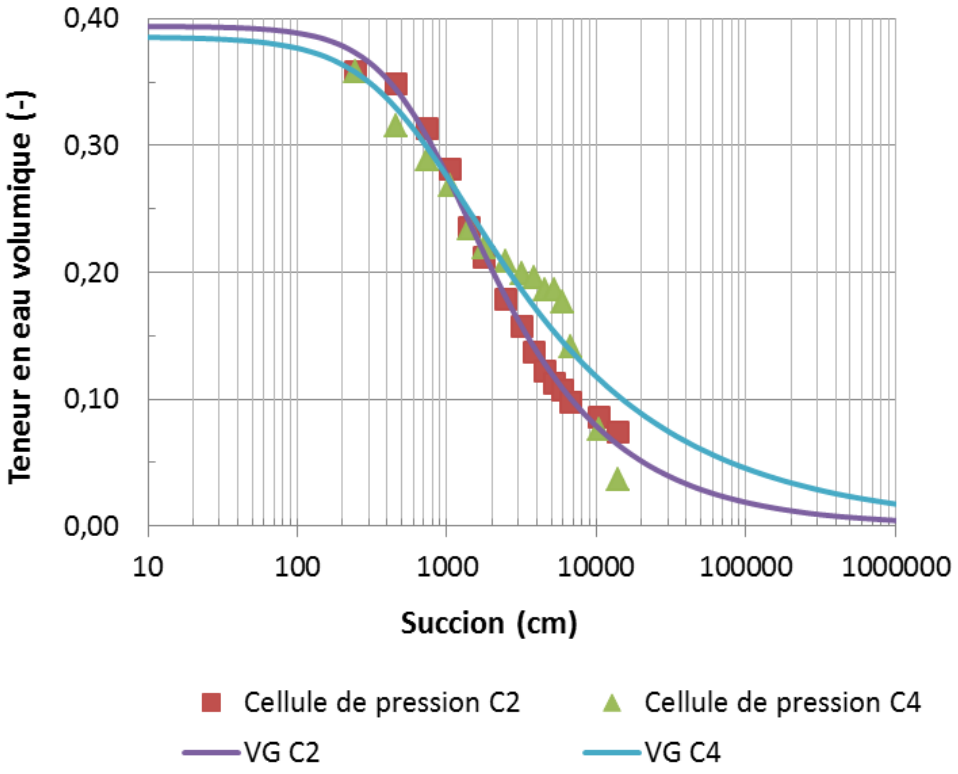


Figure 4-8 : Courbe de rétention d'eau des résidus pour les essais à la cellule à pression en laboratoire et courbe lissées selon le modèle de van Genutchen.

Tableau 4.11 : Paramètres du modèle de van Genuchten (1980) obtenus avec le code RETC

Paramètres	Gravier	Résidus C2	Résidus C4
θ_r	0,0114	0,0000	0,0000
θ_s	0,3764	0,3939	0,3855
α_v	0,1124	0,0013	0,0171
n_v	1,9494	1,6277	1,4156
m_v	0,4870	0,3856	0,2936

4.2.4 Résultats de la caractérisation thermique

Sonde à aiguille

Les courbes de conductivité thermique en fonction du degré de saturation pour les résidus miniers non gelés et gelés ont été déterminées au laboratoire de l'Université Laval en 2012. Pour la conductivité thermique non gelée, les tests ont été effectués à des porosités variant entre 0,44 et 0,46 avec un ρ_d variant de 1571 et 1626 kg/m^3, tandis que pour la conductivité thermique gelée,

les tests ont été menés à des porosités variant entre 0,41 et 0,46 pour un ρ_d variant entre 1570 et 1704 kg/m^3. Les caractéristiques des mélanges et la conductivité thermique obtenue sont présentées au Tableau 4.12.

Tableau 4.12 : Conductivité thermique non gelée et gelée des résidus miniers à différents degrés de saturation

	Essais	S_r (%)	w (%)	n (-)	ρ_d (kg/m^3)	T (°C)	λ (W/m°C)
Résidus non gelés	1	0	0,0	0,46	1576	20,0	0,25
	2	58	17,0	0,46	1571	4,0	1,33
	3	93	25,3	0,44	1619	3,6	1,52
	4	93	25,3	0,44	1619	12,5	1,55
	5	94	25,9	0,44	1626	12,0	1,44
Résidus gelés	1	58	15,2	0,43	1653	-10,0	1,61
	2	65	16,5	0,43	1673	-4,0	2,05
	3	82	24,0	0,46	1570	-4,0	2,15
	4	86	20,9	0,41	1704	-4,0	2,19
	5	93	25,1	0,44	1630	-4,5	2,24

Le modèle prédictif de Côté et Konrad (2005) est utilisé pour voir si les données expérimentales concordent avec ce modèle prédictif. S'il y a concordance, ce modèle pourrait être utilisé dans une éventuelle modélisation thermique. Pour utiliser le modèle, la conductivité thermique des solides λ_s est calculée avec la méthode de la moyenne géométrique (éq. 2.12). Une valeur de 3,24 W/m°C est trouvée pour les échantillons de résidus T-S1 et T-S2. Ces échantillons sont considérés représentatifs de celui utilisé pour le test de conductivité thermique. Les détails du calcul sont présentés au Tableau 4-13.

Tableau 4.13 : Calcul de la conductivité thermique des solides des résidus miniers avec la méthode de la moyenne géométrique

	Teneur volumique x_j (%)		λ_{sj}	λ_{sj}^{xj}	
	T-S1	T-S2		T-S1	T-S2
Pyrite	0,00	0,00	19,21	1,00	1,00
Pyrrhotite	6,69	8,69	1,89	1,04	1,06
Pentlandite	0,57	0,90	4,50	1,01	1,01
Calcite	0,90	1,06	3,59	1,01	1,01
Lizardite	46,69	44,74	2,34	1,49	1,46
Talc	17,86	20,76	6,10	1,38	1,46
Chlorite	13,78	10,12	5,15	1,25	1,18
Hornblende	9,06	8,73	2,81	1,10	1,09
Magnétite	4,45	5,00	5,10	1,08	1,08
gypse	0,00	0,00	1,26	1,00	1,00
Actinolite	0,00	0,00	3,48	1,00	1,00
Total	100,00	100,00		**3,24**	**3,24**

Les données de laboratoire ainsi que les courbes λ-S_r obtenues avec le modèle sont présentées à la Figure 4-9 pour les résidus miniers gelés et non gelés, pour une teneur en eau volumique non gelée de 0 et 0,08. La courbe de la conductivité thermique en fonction du degré de saturation est calculée avec les paramètres $\kappa = 1,9$ $\chi = 0,75$ et $\eta = 1,2$ et $n = 0,45$ pour l'état non gelé et $\kappa = 0,85$ $\chi = 0,75$ et $\eta = 1,2$, $n = 0,43$ pour l'état gelé. Les paramètres ont été choisis pour un sol de type naturel aux particules arrondies avec une distribution granulométrique correspondant au silt et au sol argileux. La porosité de 0,43 correspond à celle obtenue en laboratoire lors de l'essai et θ_u a été déterminé en faisant varier sa valeur afin d'obtenir la meilleure concordance possible entre la courbe obtenue à partir du modèle de Côté et Konrad (2005) et les valeurs obtenues en laboratoire. La prédiction du modèle se rapproche plus des données de laboratoire à un degré de saturation supérieur à 80% pour une teneur en eau non gelée de 0,08 (voir Figure 4-9) .

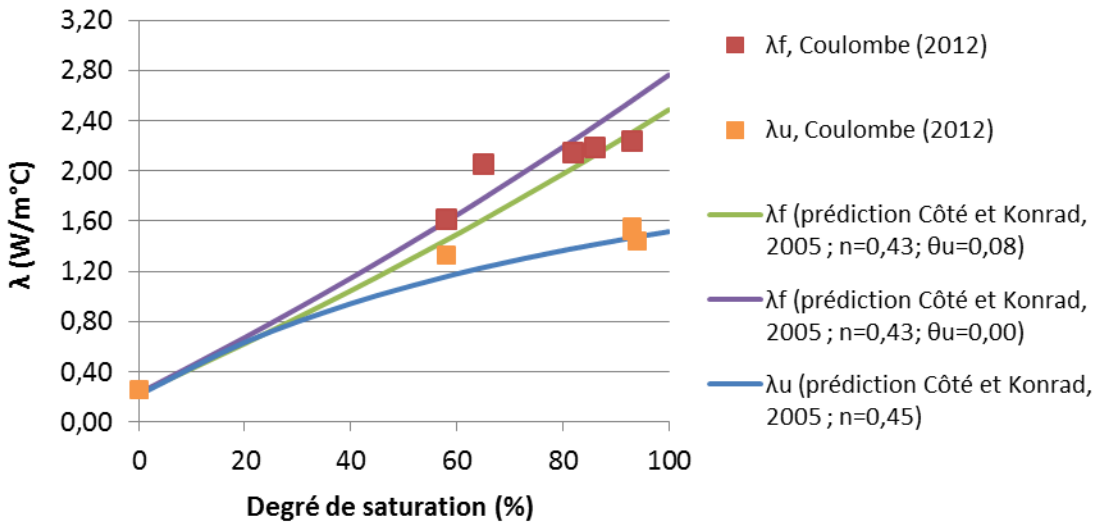


Figure 4-9 : Conductivité thermique gelée (λ_f) et non gelée (λ_u) des résidus miniers en fonction du degré de saturation et prédictions avec le modèle de Côté et Konrad (2005)

Les valeurs expérimentales (Coulombe, 2012) donnent des résultats de conductivité thermique qui sont bien représentées par le modèle de Côté et Konrad (2005). L'écart entre le modèle et les valeurs expérimentales varie entre 2,0 et 14,7% pour l'état non gelé et de 2,6% à 11,0%, à l'exception d'une valeur au degré de saturation de 65% qui donne un écart de 27,3%, pour l'état gelé. On peut donc conclure que le modèle de Côté et Konrad (2005) peut prédire de façon relativement précise le comportement de la conductivité thermique des résidus miniers.

Fluxmètre

Le fluxmètre a été utilisé pour déterminer la conductivité thermique non gelée et gelée du matériel de recouvrement 0-20 mm. Un échantillon ayant une porosité de 0,25 a été utilisé pour mesurer la conductivité thermique à l'état gelé et non gelé pour différents taux de saturation. Les résultats sont présentés au Tableau 4.14. De la même façon que pour les résidus miniers, le modèle de Côté et Konrad (2005) a aussi été utilisé à titre comparatif pour le matériel 0-20 mm gelé et non gelé.

Tableau 4.14 : Résultats des tests de conductivité thermique non gelée et gelée à différents degré de saturation pour le matériel de recouvrement 0-20 mm.

	Essais	Sr (%)	w (%)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	λ (W/m°C)
0-20 mm non gelé	**1**	4	0,5	0,9	7,7	0,68
	2	7	0,8	0,3	8,2	0,81
	3	19	2,1	1,3	9,2	1,16
	4	27	3,1	2,4	10,1	1,54
	5	57	6,5	0,5	9,2	2,10
0-20 mm gelé	**1**	19	2,1	-2,0	-9,7	1,17
	2	27	3,1	-1,4	-9,9	1,65
	3	57	6,5	-1,4	-9,0	2,22

Un λ_s moyen de 3,26 basé sur la minéralogie des 4 échantillons C-S4 à C-S7 du matériel 0-20 mm a été calculé. Les détails du calcul sont présentés au Tableau 4.15.

Tableau 4.15 : Calcul de la conductivité thermique des solides du gravier avec la méthode de la moyenne géométrique

	Teneur volumique x_j (%)				λ_{sj}	λ_{sj}^{xj}			
	C-S4	C-S5	C-S6	C-S7		C-S4	C-S5	C-S6	C-S7
Actinolite	32,00	35,33	37,97	40,27	3,48	1,49	1,55	1,61	1,65
Albite	15,92	17,09	14,02	10,69	1,96	1,11	1,12	1,10	1,07
Anorthite	11,76	10,86	7,33	13,16	1,68	1,06	1,06	1,04	1,07
Calcite			4,85	1,91	3,59	1,00	1,00	1,06	1,02
Chlorite	16,16	13,21	21,83	18,19	5,15	1,30	1,24	1,43	1,35
Epidotite	14,76	16,64	9,17	9,96	2,83	1,17	1,19	1,10	1,11
Quartz	9,09	6,69	4,50	5,20	7,69	1,20	1,15	1,10	1,11
Rutile	0,31	0,18	0,33	0,63	9,00	1,01	1,00	1,01	1,01
Total	100,0	100,0	100,0	100,0		**3,25**	**3,13**	**3,39**	**3,28**

Les paramètres utilisés dans le modèle sont $\kappa = 4{,}6$, $\chi = 1{,}7$ et $\eta = 1{,}8$ pour l'état non gelé et $\kappa = 1{,}7$, $\chi = 1{,}7$ et $\eta = 1{,}8$ pour l'état gelé (n=0,25). Les paramètres ont été choisis pour un matériau grossier aux particules anguleuses et la porosité de 0,25 correspond à celle obtenue en laboratoire lors de l'essai au fluxmètre. La Figure 4-10 présente les résultats de conductivité thermique obtenus au laboratoire ainsi que le modèle de Côté et Konrad (2005) pour l'état non gelé et gelé.

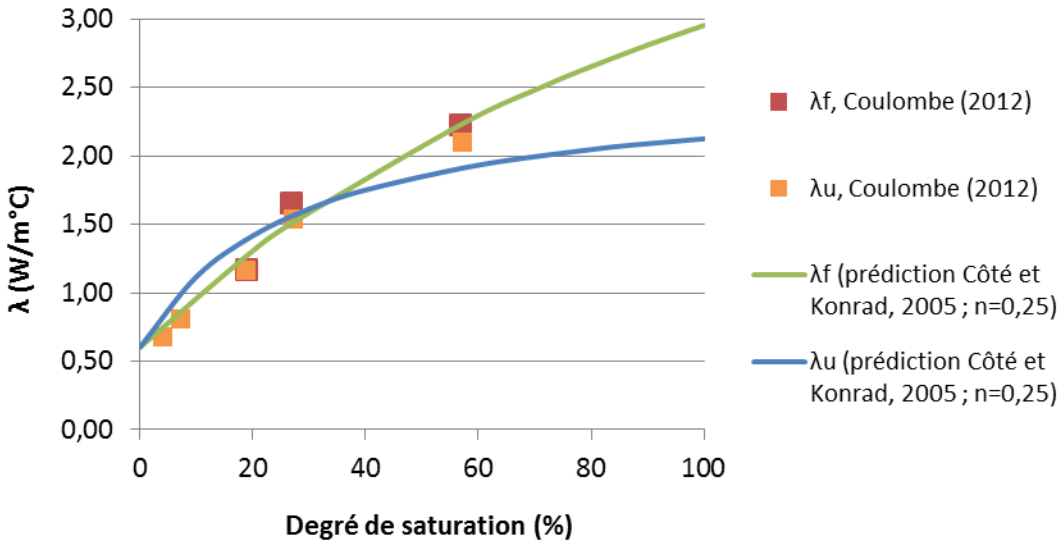


Figure 4-10 : Conductivité thermique gelée (λ_f) et non gelée (λ_u) du matériel de recouvrement 0-20 mm en fonction du degré de saturation et prédictions avec le modèle de Côté et Konrad (2005)

On remarque que le modèle général de conductivité thermique de Côté et Konrad (2005) décrit bien les données de laboratoire pour l'état gelé avec des écarts de 0,4% à 9,0% entre les valeurs du modèle et les valeurs expérimentales. Pour l'état non gelé, l'écart entre le modèle et les mesures est plus important, avec des valeurs variant de 1,3 % à 20,4 %. En général, on peut dire que le modèle de Côté et Konrad (2005) représente bien les valeurs expérimentales pour les résidus et pour le matériel de recouvrement 0-20 mm.

Des valeurs de conductivité thermique ont été mesurés dans le passé sur les résidus de Mine Raglan avec la méthode de la sonde à aiguille (Nixon, 2000). Des tests en triplicata ont été fait aux températures de 20°C, -4°C et -8°C pour des porosités de 0,41, 0,42 et 0,48. Les valeurs moyennes des triplicatas obtenus par Nixon (2002) ainsi que les écarts au modèle théorique sont présentés au Tableau 4.16. Les écarts au modèle varient entre 1,7% et 15,1% (voir Tableau 4-16).

Tableau 4.16 : Écart des valeurs conductivité thermique de Nixon (2000) par rapport au modèle théorique de conductivité thermique de Côté et Konrad (2005).

Sr (%)	n (-)	t(°C)	λ (W/m°C) Nixon (2000)	λ (W/m°C) Côté et Konrad (2005)	Ecart au modèle (%)
62	0,41	20	1,39	1,29	7,8
62	0,42	20	1,45	1,26	15,1
48	0,48	20	1,12	0,99	13,1
47	0,48	20	1,10	0,98	12,2
62	0,41	-4	1,61	1,56	3,2
62	0,42	-4	1,61	1,55	3,9
48	0,48	-4	1,24	1,19	4,2
47	0,48	-4	1,14	1,16	1,7
62	0,41	-8	1,63	1,56	4,5
62	0,42	-8	1,68	1,55	8,4
48	0,48	-8	1,28	1,19	7,6
47	0,48	-8	1,23	1,16	6,0

4.2.5 Courbe de réactivité des résidus miniers

Des tests de consommation d'oxygène ont été menés en laboratoire (à température de la pièce) sur les résidus à des degrés de saturation variant de 29 à 74% pour une porosité variant entre 0,37 et 0,43 et des hauteurs de dégagement variant entre 10,2 et 21,0 cm. La teneur en pyrrhotite de l'échantillon est évaluée entre 10,4% et 13,2% puisqu'il a été échantillonné proche des stations S1 et S2. La consommation d'oxygène en fonction du degré de saturation est présentée à la Figure 4-11.

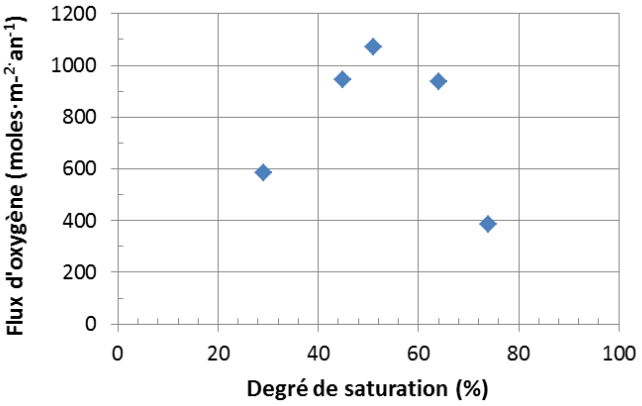


Figure 4-11 : Essai de consommation d'oxygène sur les résidus selon le degré de saturation à 21°C

On remarque à la Figure 4-11 que la consommation d'oxygène est maximale pour des degrés de saturation près de 50 %, avec une valeur de 1073 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lorsque le degré de saturation chute à des valeurs de près de 20 % ou augmentent à des valeurs près de 75 %, la réactivité diminue significativement. Ces résultats concordent avec ce qui est observé dans la littérature; la diffusion d'un gaz dans un milieu poreux est négligeable lorsque le degré de saturation est élevé (Aubertin et al., 1999; Aachib et al., 2002) et la réactivité des résidus miniers sulfureux est maximale pour des valeurs de S_r entre 40% à 60% (Bouzahzah et al., 2012). Ces résultats obtenus au laboratoire seront également utiles pour voir l'effet des conditions nordiques *in situ* sur la réactivité des résidus de Mine Raglan

4.3 Variabilité du test de CO

La variabilité du test de CO a été évaluée sur le PAR de la mine Raglan. Pour ce faire, neuf tests de consommation d'oxygène ont été installés dans un espace de 2 m^2 sur la partie plate au nord-ouest du PAR. À la Figure 4-12, les cylindres de la première rangée du haut se nomment C1 à C3 de la gauche vers la droite, C4 à C6 pour la rangée du milieu et C7 à C9 pour la rangée du bas. La hauteur de dégagement des cylindres est d'en moyenne 13,5 cm. Quatre séries de tests ont été menées sur les neuf cylindres du 21 au 23 juillet 2012 afin d'évaluer la variabilité du test dans l'espace et dans le temps. Les tests ont été interprétés avec l'approche d'Elberling et al. (1994) pour une durée maximale de 5 h et pour une diminution en oxygène maximal de 3%. Les conditions climatiques étaient similaires sur les trois jours où les essais ont été réalisés.

Figure 4-12 : Montage expérimental pour l'évaluation de la variabilité du test de CO

Les résultats de l'expérimentation sont présentés au Tableau 4.17. Les tests de CO aux cylindres 3 et 7 n'ont pas pu être menés car les senseurs d'oxygène étaient brisés et il n'y en avait pas d'autres disponibles.

Tableau 4.17 : Résultats des tests de consommation d'oxygène (moles·m^{-2}·an^{-1}) pour l'étude de variabilité du test de CO dans l'espace et le temps

Date	12-07-19 19:00	12-07-20 10:00	12-07-20 15:00	12-07-21 09:00	Écart (%)
C1	284	N/A	243	230	19
C2	262	178	216	192	32
C3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C4	282	215	268	243	24
C5	204	179	184	190	12
C6	221	194	194	204	12
C7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C8	301	228	255	254	24
C9	312	241	261	229	27
Écart (%)	35	26	31	25	

L'écart entre les tests est calculé avec la formule à l'équation 4.4.

$$Ecart(\%) = \frac{CO_{max} - CO_{min}}{CO_{max}} \times 100 \qquad [4.4]$$

On observe au Tableau 4.17 que le résultat du test de consommation d'oxygène varie de façon significative dans un petit espace. L'écart entre les tests est de 35%, 26%, 31% et 25% pour les 4 séries de tests. Cette variation est causée par les hétérogénéités géochimique et hydrogéologique des résidus. Puisque le test a été fait dans un petit espace, ces résultats montrent qu'il peut y avoir des variations importantes même dans un espace restreint. Dans notre étude, il ne faut donc pas se surprendre que des essais réalisés à une même station (chaque station a 3 cylindres) donnent des résultats différents (selon ces essais, cette différence pourrait être de l'ordre de 35%). Également, le flux d'oxygène varie entre 12% et 32% par cylindre sur une durée de trois jours.

CHAPITRE 5 RÉACTIVITÉ DES RÉSIDUS MINIERS DE MINE RAGLAN

Afin de concevoir un recouvrement isolant optimal et efficace pour restaurer le parc à résidus miniers de Mine Raglan, il est important de bien comprendre l'effet de la température sur le comportement thermique, géochimique et hydrogéologique des résidus miniers. Dans ce chapitre, les résultats recueillis au cours du projet sont d'abord présentés en détail par station. Ensuite les comportements hydrique et thermique des résidus ainsi que les résultats des tests de consommation d'oxygène sont analysés en détail dans le but d'identifier les principaux facteurs contrôlant la réaction d'oxydation. Parmi les facteurs d'influence, on s'intéressera plus particulièrement à l'effet du degré de saturation (disponibilité de l'oxygène) et de la température des résidus, ainsi qu'à la variation spatiale de la réactivité (localisation et réactivité des résidus). L'effet des recouvrements partiels sur la réactivité des résidus sera traité au chapitre 6.

5.1 Présentation des résultats par station

5.1.1 Généralités

La température, la teneur en eau volumique et la succion ont été mesurées en continu à différentes élévations dans les résidus et dans le recouvrement, tel que décrit au chapitre 3, pour la période du 16 juillet 2011 au 21 juillet 2012 pour les stations S1, S3, S4 et S7 et du 4 août 2011 au 21 juillet 2012 pour les stations S2, S5 et S6. Durant ces périodes, des tests de consommation d'oxygène en triplicata ont été menés aux sept stations. Dans la présente section, les résultats obtenus pour la période de mesure sont présentés par station aux Figures 5-3 à 5-9. Pour chacune des figures, quatre sous-graphiques montrent en a) l'évolution de la température des résidus et du recouvrement isolant partiel (si applicable), b) l'évolution de la teneur en eau volumique dans les résidus et dans le recouvrement isolant partiel (si applicable), c) les flux d'oxygène moyens mesurés pour les tests de consommation d'oxygène réalisés, ainsi que les flux maximaux et minimaux mesurés à chaque test et en d) l'évolution de la succion dans les résidus et dans le recouvrement (si applicable).

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus dans les résidus miniers. Pour l'étude de la réactivité des résidus miniers, on ne considère que les mesures (température et teneur en eau

volumique) prises à une profondeur de 5 cm sous la surface des résidus et ce, autant pour les stations couvertes et non couvertes. Comme l'on souhaite mettre l'emphase sur la zone qui consomme l'oxygène, on considère que les réactions vont se produire principalement dans les premiers centimètres des résidus (Gosselin et al., 2007; Godbout, 2012).

La température quotidienne de l'air et les précipitations au site (exprimé en mm de pluie) fournies par Mine Raglan sont présentées à la Figure 5-1 pour la période d'étude. La station météorologique est localisée au site de Mine 2 (voir Figure 3-2) sur le site de Mine Raglan.

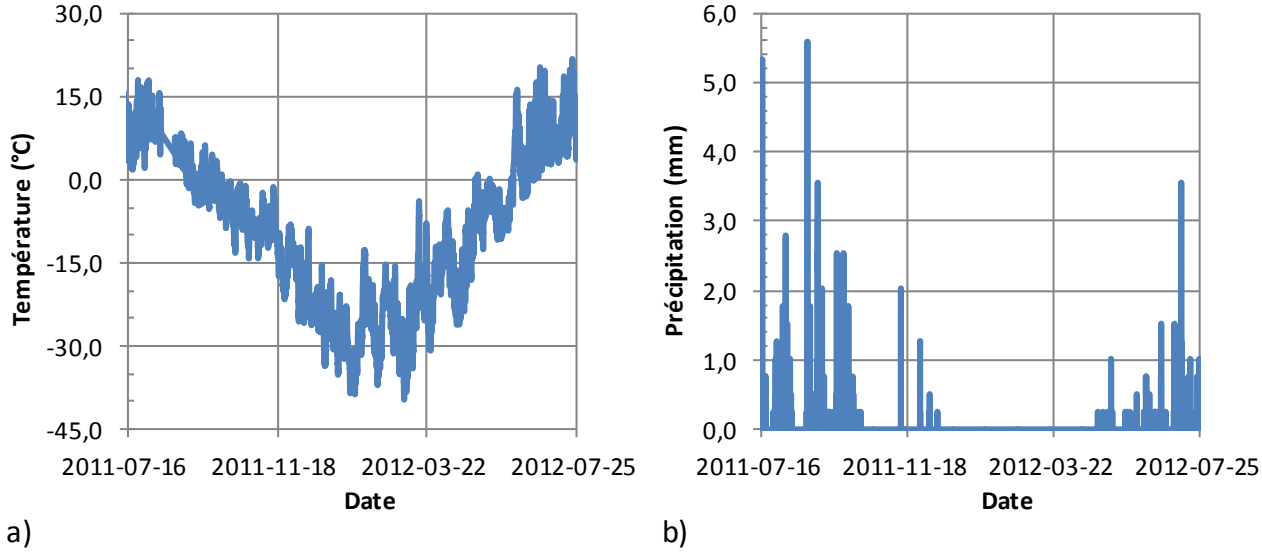


Figure 5-1: Données de la station météorologique localisé à Mine 2 (données de Mine Raglan) : a) température ; b) précipitation à la station météo de Mine Raglan

Les températures minimale et maximale de l'air sont de -39,7°C et de 20,3°C respectivement, avec une moyenne de -9,5°C pour la période du 16 juillet 2011 au 16 juillet 2012. Les précipitations totales liquides pour la même année sont de 217,7 mm. Les précipitations sous forme de neige ne sont pas enregistrées à la station météorologique, c'est pourquoi les données de précipitation ne sont pas disponibles à la Figure 5-1 pour la période hivernale. Des précipitations totales de 406,1 mm ont été estimées pour les années de 2010-2011 et 2011-2012 pour le parc à résidus de Mine Raglan (communication personnelle, Xstrata Nickel Mine Raglan). Ainsi, selon ces données, un total approximatif de 188 mm de précipitations en équivalent de pluie tomberait sous forme de neige.

La carte de localisation des stations de mesure est présentée de nouveau à la Figure 5-2 afin de faciliter la lecture du chapitre et pour aider l'interprétation des données. On rappelle que sept stations de mesure ont été installées sur le site : trois directement dans les résidus, une dans un recouvrement partiel de 0,4 m d'épaisseur et trois dans un recouvrement partiel de 1,2 m. La cellule expérimentale simulant le scénario complet de restauration est identifiée avec l'appellation S8 sur la Figure 5-2. Les résultats de cette station seront discutés plus en détails au chapitre 6. Tel que mentionné précédemment, chaque station est instrumentée pour permettre le suivi de la température, la succion, la teneur en eau volumique et la consommation d'oxygène. Rappelons que les détails concernant les instruments, leurs localisations et leurs mises en place peuvent être trouvés au chapitre 3.

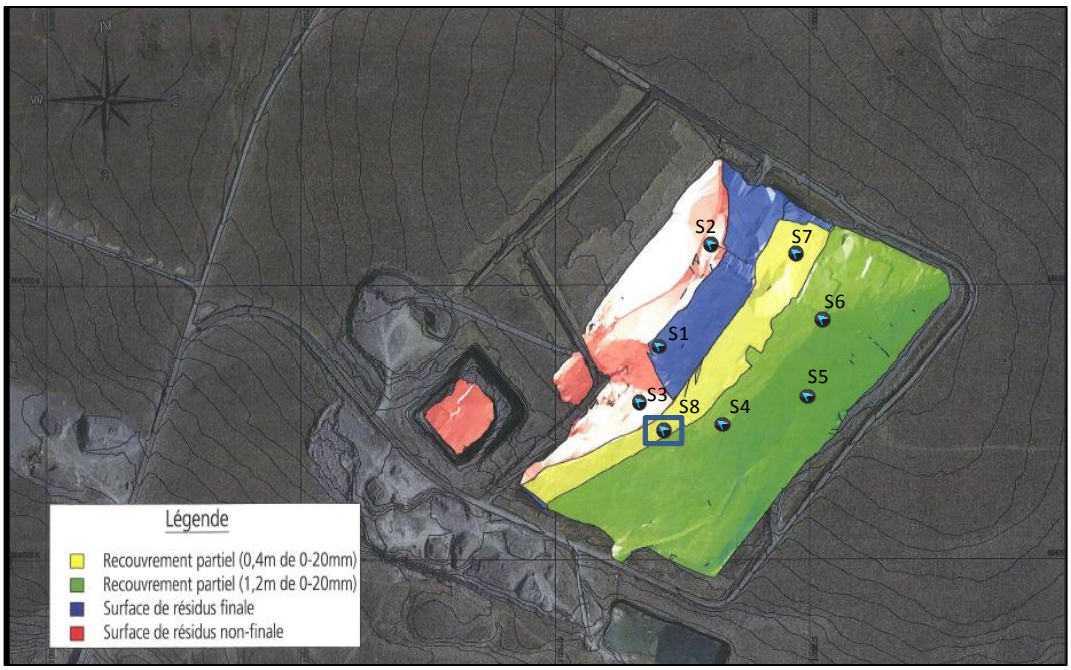


Figure 5-2: Localisation des stations non recouvertes (S1 à S3), avec recouvrement de 1,2 m (S5 à S6), avec recouvrement de 0,4 m (S7) et de la cellule expérimentale (S8) sur le PAR de Mine Raglan

5.1.2 Station S1 (non recouverte)

La Figure 5-3 et le Tableau 5.1 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S1 pour la période du 16 juillet 2011 au 25 juillet 2012.

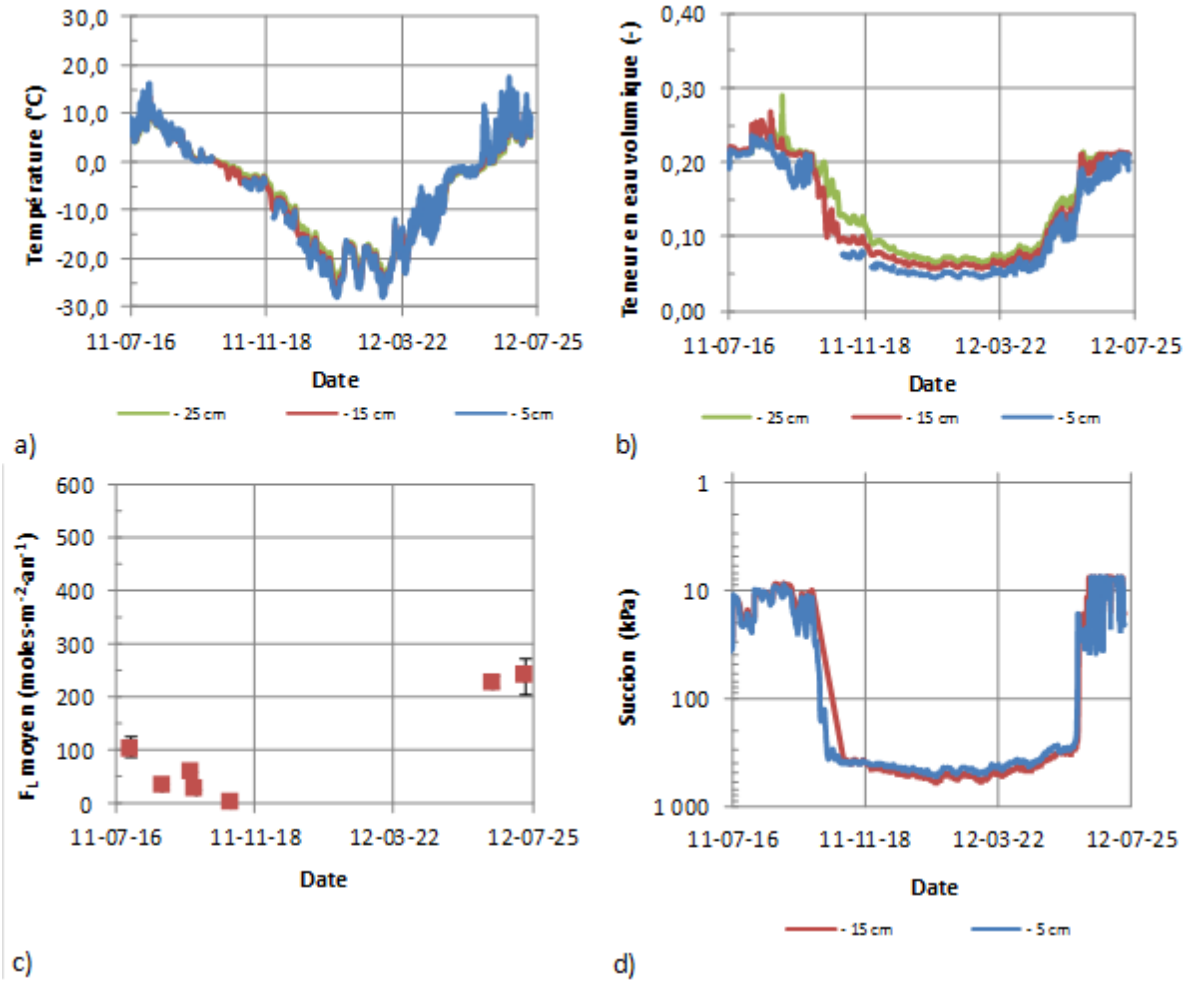


Figure 5-3: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S1 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.1 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S1 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min}	T_{max}	$\theta_{u\ min}$	$\theta_{u\ max}$	ψ_{min}	ψ_{max}	$F_{L\ min}$	$F_{L\ max}$
	(°C)	(°C)	(-)	(-)	(kPa)	(kPa)	(moles/m^2/an)	(moles/m^2/an)
2011-07-16	0,1	16,2	0,17	0,24	10	23	27	101
2011-09-29	-28,0	-0,2	0,05	0,17	-	-	0	0
2012-06-03	0,0	17,5	0,16	0,21	8	34	227	240

La température minimale et maximale horaire des résidus à 5 cm de profondeur pour la période du 16 juillet 2011 au 25 juillet 2012 est de -28,0 °C en janvier et 17,5°C à la fin du mois de juin 2012. La température des résidus oscille à des valeurs près de 0°C entre le 13 septembre et le 29 septembre. La température des résidus se maintient sous 0°C du mois d'octobre 2011 jusqu'au début du mois de juin 2012. Le profil de température des résidus est similaire à celui de température de l'air (Figure 5-1).

La teneur en eau volumique non gelée (θ_u) des résidus à 5 cm de profondeur se maintient entre 0,17 et 0,24 de juillet 2012 jusqu'à la fin septembre 2011, correspondant à des degrés de saturation (S_r) variant entre 44% et 56% pour une masse volumique sèche (ρ_d) de 1650 kg/m^3 (SNC Lavalin, 2009) et une porosité de 0,43. Ensuite, la teneur en eau volumique non gelée diminue graduellement jusqu'à une valeur minimale de 0,05. A partir du mois d'avril, θ_u remonte graduellement pour atteindre une valeur de 0,16 en juin 2012 et ensuite varie entre des valeurs de 0,16 et 0,21 (correspondant à 37 % < S_r < 47%) pour la période de juin au 25 juillet 2012.

La succion dans les résidus se maintient entre 10 et 23 kPa de juillet jusqu'au 29 septembre 2011, date où les résidus commencent à geler. La sonde MPS-1 ne mesure pas de façon adéquate la succion dans le sol gelé; les valeurs hivernales de succion lorsque la température des résidus est inférieure à 0°C ne sont donc pas considérées dans l'analyse (Decagon Devices, 2008-2009). À partir du 4 juin 2012, lorsque le senseur dégèle, les succions mesurées varient entre 8 et 34 kPa.

Le flux d'oxygène moyen ($F_{L\ moyen}$) des résidus varie entre 0 et 240 moles·m^{-2}·an^{-1} à cette station. Lorsque la température des résidus est supérieure ou égale à 0°C en 2011, des flux d'oxygène entre 27 et 101 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés. A la fin du mois d'octobre 2011, la consommation d'oxygène mesurée était nulle, lorsque la température des résidus était de -4,1°C. Ensuite un flux d'oxygène est mesuré de nouveau à partir de juin 2012 à des valeurs entre 227 et 240 moles·m^{-2}·an^{-1}. Aucune mesure de flux n'a été prise entre les mois d'octobre 2011 et juin 2012.

5.1.3 Station S2 (non recouverte)

La Figure 5-4 et le Tableau 5.2 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S2 pour la période du 4 août 2011 au 25 juillet 2012.

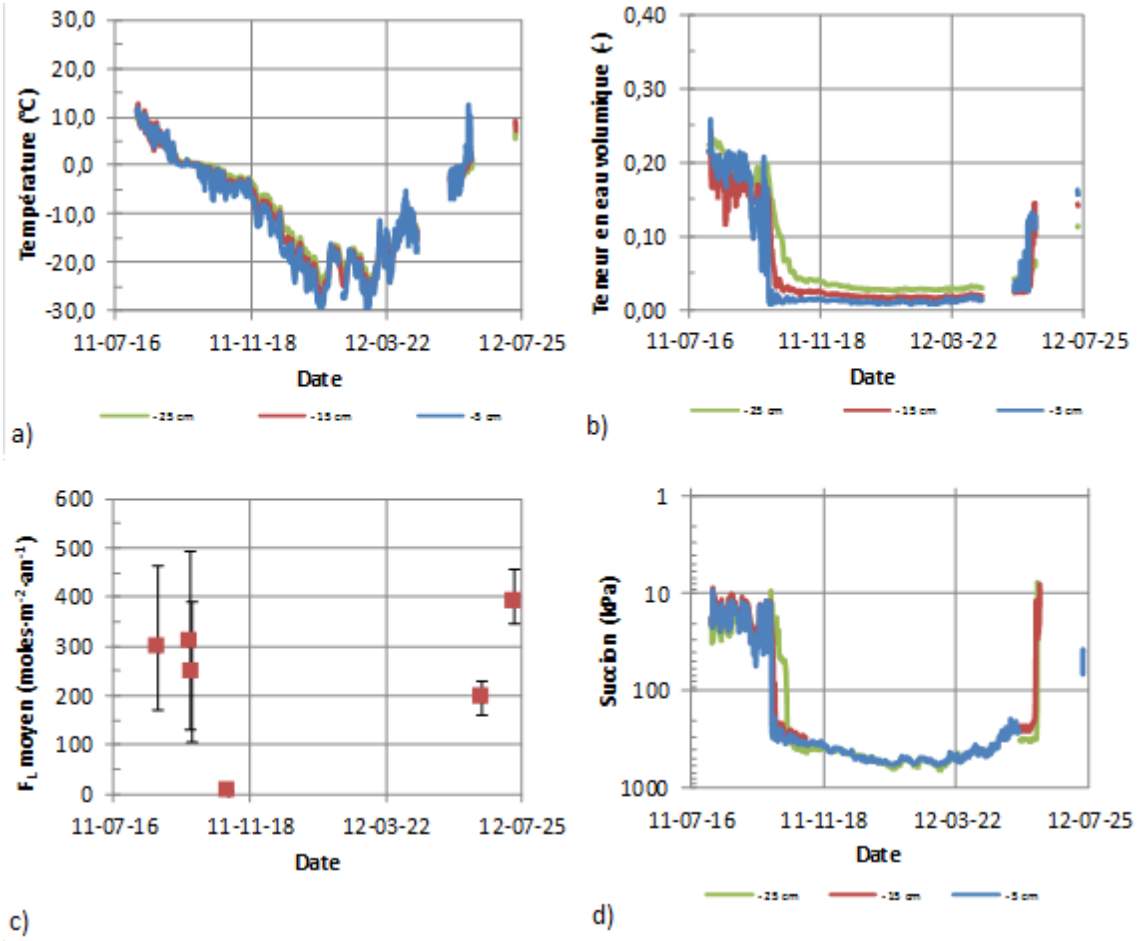


Figure 5-4: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S2 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.2 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S2 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	$\theta_{u\ min}$ (-)	$\theta_{u\ max}$ (-)	ψ_{min} (kPa)	ψ_{max} (kPa)	$F_{L\ min}$ (moles/m^2/an)	$F_{L\ max}$ (moles/m^2/an)
2011-08-04	-0,1	11,9	0,03	0,26	9	55	247	312
2011-09-30*	-30,2	-0,1	0,01	0,03	-	-	7	7
2012-06-02*	0,3	12,5	0,09	0,16	-	-	195	389

* données non complète pour la période

La station S2 a été installée plus tard que les autres stations non recouvertes, soit le 4 août 2011. De plus, le système d'acquisition de données a fonctionné partiellement du 19 avril au 26 juillet 2012. Les températures minimales et maximales horaire des résidus mesurés à 5 cm de profondeur pour cette période est de -30,2°C en mars 2012 et 12,5°C en juin 2012. La température des résidus atteint 0°C pour la première fois le 14 septembre 2011. Ensuite, elle varie entre 1,2°C et 0°C jusqu'au 30 septembre, date à partir de laquelle la température se maintien sous 0°C. A partir du 2 juin, la température des résidus redevient supérieure à 0°C.

Les valeurs de θ_u mesurées dans les résidus varient entre 0,17 et 0,26 (S_r entre 40% et 60%) du 4 août au 13 septembre 2011. A partir de cette dernière date, la teneur en eau volumique non gelée diminue pour atteindre une valeur minimale de 0,01. Elle remonte de 0,03 à 0,13 du 2 au 9 juin 2012 et atteint une valeur de 0,16 le 19 juin 2012 (ce qui correspond à une valeur de S_r de 37%)

La succion dans les résidus varie de 55 kPa à 9 kPa entre le mois d'août et le mois de septembre 2011 et augmente abruptement en date du 30 septembre 2011, ce qui correspond à la date où la température des résidus se maintient sous 0°C. Une valeur de 38 kPa a été mesurée en juillet 2012, après le dégel des résidus.

Les valeurs mesurées de F_L varient entre 7 et 389 moles·m^{-2}·an^{-1} à cette station. Lorsque la température des résidus est proche de 0°C, des flux d'oxygène entre 247 et 312 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés. À la fin du mois d'octobre 2011, la consommation d'oxygène diminue considérablement pour atteindre une valeur de 7 moles·m^{-2}·an^{-1}, lorsque la température des résidus est de -4,2°C. Des flux d'oxygène sont de nouveau mesurés à partir de juin 2012, avec des valeurs de F_L entre 195 et 389 moles·m^{-2}·an^{-1}.

5.1.4 Station S3 (non recouverte)

La Figure 5-5 et le Tableau 5.3 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S3 pour la période du 16 juillet 2011 au 25 juillet 2012.

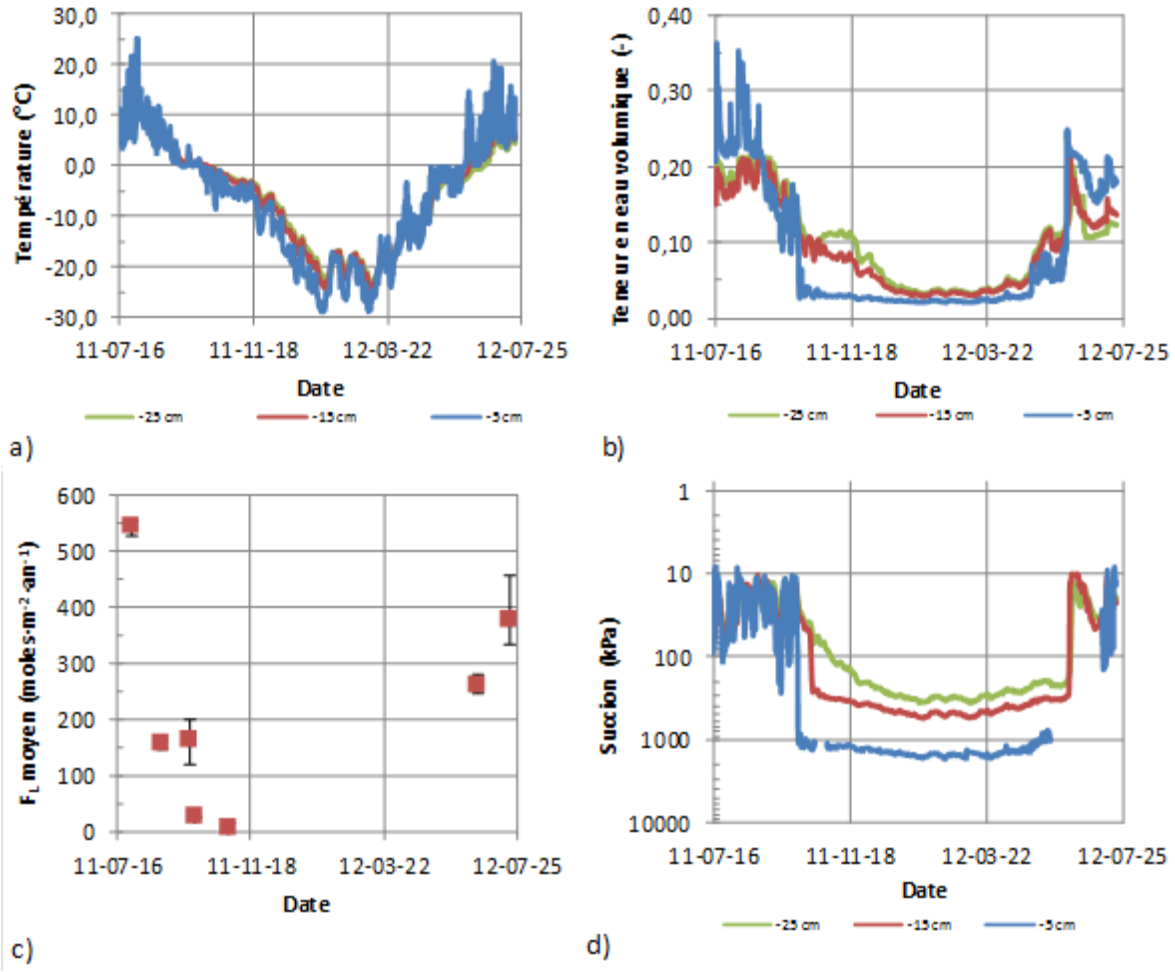


Figure 5-5: Mesures prises dans les résidus miniers pour une année à la station S3 non recouverte (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.3 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S3 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	$\theta_{u\ min}$ (-)	$\theta_{u\ max}$ (-)	ψ_{min} (kPa)	ψ_{max} (kPa)	$F_{L\ min}$ (moles/m^2/an)	$F_{L\ max}$ (moles/m^2/an)
2011-07-16	0,0	25,2	0,08	0,36	8	112	28	544
2011-09-30	-28,9	-0,1	0,02	0,11	-	-	6	6
2012-06-03	0,0	20,7	0,14	0,25	8	144	259	378

Les températures minimales et maximales des résidus mesurées à 5 cm de profondeur pour cette période est de -28,9°C le 4 mars 2012 et 25,2°C le 1 août 2012. La température des résidus atteint 0°C pour la première fois le 13 septembre 2011. La température oscille à des valeurs près de 0°C du 13 septembre au 30 septembre 2011. La température des résidus redevient supérieure à 0°C à partir du début du mois de juin 2012.

Les valeurs de θ_u mesurées à une profondeur de 5 cm oscillent entre 0,21 et 0,35 (48% < S_r < 81%) entre le 16 juillet et le 28 août 2011. A partir de cette date, elles diminuent pout atteindre une valeur minimale de 0,02. Du 29 mai au 2 juin, la teneur en eau volumique non gelée augmente d'une valeur de 0,05 à 0,25. Au même moment, la température dans les résidus augmente de façon importante passant de -5,9 à 7,1 °C. Les valeurs de θ_u se maintiennent ensuite entre des valeurs de 0,14 et 0,25 (32% < S_r < 58%)

La succion à une profondeur de 5 cm varie entre 8 et 112 kPa lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C. La succion augmente rapidement à partir du 30 septembre 2011, lorsque les résidus commencent à geler. Pour la période du 5 juillet au 26 juillet 2012, la succion varie entre 8 et 144 kPa.

Les valeurs moyennes de F_L à travers les résidus varient entre 28 et 544 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lorsque la température des résidus est proche ou supérieure à 0°C, F_L varie entre des valeurs de 28 et 544 moles·m^{-2}·an^{-1}. Le flux d'oxygène moyen mesuré est de 6 moles·m^{-2}·an^{-1} en date du 28 octobre lorsque la température des résidus est de -4,5°C. Des flux d'oxygène sont de nouveau mesurés à partir de juin 2012 entre 259 et 378 moles·m^{-2}·an^{-1}.

5.1.5 Station S4 (recouvert de 1,2 m)

La Figure 5-6 et le Tableau 5.4 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S4 pour la période du 16 juillet 2011 au 21 juillet 2012.

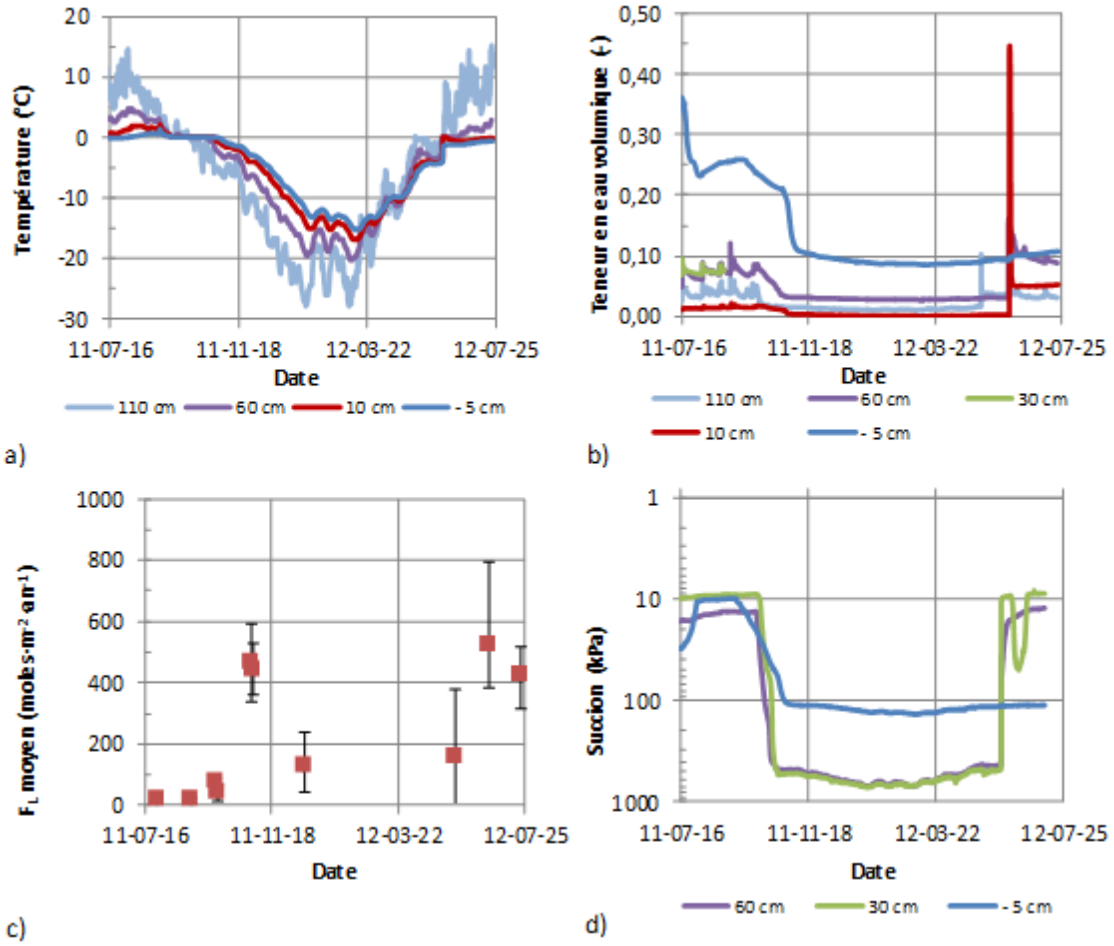


Figure 5-6: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S4 couverte d'un recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.4 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S4 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	$\theta_{u\ min}$ (-)	$\theta_{u\ max}$ (-)	ψ_{min} (kPa)	ψ_{max} (kPa)	$F_{L\ min}$ (moles/m^2/an)	$F_{L\ max}$ (moles/m^2/an)
2011-07-16	-1,4	1,4	0,23	0,36	9,9	10,2	20	22
2011-09-17	0,0	0,1	0,17	0,26	-	-	43	80
2011-10-29	-15,2	0,1	0,08	0,17	-	-	128	525

La température à une profondeur de 5 cm dans les résidus varie entre 1,4°C et -15,2°C du 16 juillet 2011 au 21 juillet 2012; la présence du recouvrement diminue les variations de température dans les rejets, par rapport aux stations S1 à S3 sans recouvrement. On observe une période de phase zéro lors du gel des résidus, où la température des résidus reste proche de 0°C, du mois de septembre 2011 jusqu'à la mi-octobre 2011. Il ne semble pas y avoir d'abaissement majeur du point de congélation des résidus, puisque la période de phase zéro se produit à une valeur près de 0,0°C. Ensuite, la température diminue de façon constante pour atteindre sa valeur la plus faible (T = -15,2 °C) le 9 mars 2012. A partir de cette date, la température des résidus remonte graduellement. Le 2 juin 2012, elle passe de -4,1°C à -1,6°C en l'espace d'une journée. Par la suite, les résidus se réchauffent plus lentement, pour atteindre une température de -0,6°C le 21 juillet 2012.

Les teneurs en eau volumique non gelées dans les résidus varient entre 0,08 et 0,36 de juillet 2011 à juillet 2012. Lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C, la teneur en eau volumique varie entre 0,24 et 0,26 correspondant à un degré de saturation entre 56% et 60%. Ensuite, la valeur de θ_u diminue graduellement durant la phase zéro de 0,26 à 0,22, et chute à partir de mi-octobre pour atteindre une valeur de 0,11 au début de novembre 2011. Une valeur minimale de θ_u de 0,08 est atteinte en date du 10 mars 2012, lorsque la température des résidus est de -15,2°C. Pour le reste de l'année 2012 (jusqu'en juillet), les valeurs de θ_u se maintiennent à une valeur inférieure à 0,11.

La succion dans les résidus se maintient à des valeurs proches de 10 kPa lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C. En dehors de cette période, les valeurs de succion ne sont pas considérées puisque la température des résidus se maintient sous 0°C.

Le flux d'oxygène moyen mesuré varie de 20 moles·m^{-2}·an^{-1} à 525 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lors de l'installation de la station S4 jusqu'au mois d'octobre, les valeurs de F_L sont faibles, entre 20 et 80 moles·m^{-2}·an^{-1}. En octobre, le flux d'oxygène moyen a augmenté de façon importante jusqu'à une valeur de 465 moles·m^{-2}·an^{-1}, pour ensuite redescendre en décembre à une valeur de 128 moles·m^{-2}·an^{-1}. Aucun test de CO n'a été mené durant la période de janvier à avril. A partir de mai 2012, des tests de consommation d'oxygène ont été réalisés à nouveau; des valeurs entre 160 et 525 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été obtenues.

5.1.6 Station S5 (recouvert de 1,2 m)

La Figure 5-7 et le Tableau 5.5 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S5 pour la période du 4 août 2011 au 22 juillet 2012.

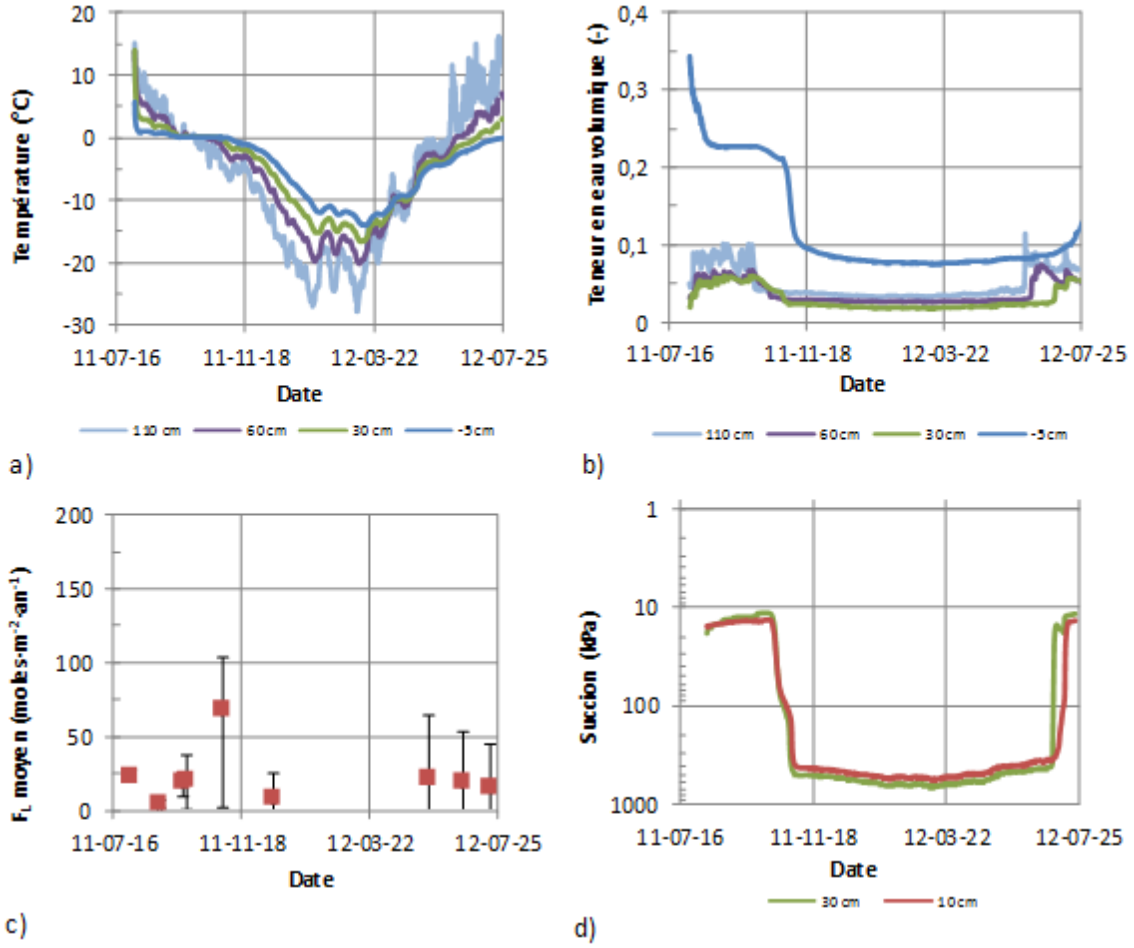


Figure 5-7: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S5 recouverte d'un recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.5 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S5 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min}	T_{max}	$\theta_{u\ min}$	$\theta_{u\ max}$	ψ_{min}	ψ_{max}	$F_{L\ min}$	$F_{L\ max}$
	(°C)	(°C)	(-)	(-)	(kPa)	(kPa)	(moles/m²/an)	(moles/m²/an)
2011-08-04	0,1	1,7	0,23	0,31	-	-	4	22
2011-09-12	0,0	0,1	0,17	0,23	-	-	19	68
2011-11-01	-0,1	-14	0,08	0,17	-	-	8	23

La température à une profondeur de 5 cm de profondeur dans les résidus varie entre 1,7°C et -14,0°C du 4 août 2011 au 25 juillet 2012. On observe également une période de phase zéro à 0°C à cette station à partir de mi-septembre 2011 jusqu'au début du mois de novembre 2011. Ensuite, la température diminue de façon constante pour atteindre sa valeur la plus faible (T = -14,0 °C) le 10 mars 2012. A partir de cette date, le dégel se fait progressivement dans les résidus et dans le recouvrement. En date du 25 juillet 2012, la température des résidus était de -0,1°C.

La teneur en eau volumique non gelée dans les résidus varie entre 0,08 et 0,31 du mois d'août 2011 à juillet 2012. Lorsque la température des résidus est supérieure à 0°, du mois d'août à la mi-septembre 2011, les valeurs de θ_u dans les résidus varient entre 0,21 et 0,31 (49% < S_r < 72%). Elles diminuent ensuite rapidement pour atteindre une valeur de 0,11 au début du mois de novembre 2011 et une valeur minimale de 0,08 le 10 mars lorsque la température des résidus est de -14,0°C. A partir du 14 juin 2012 jusqu'en juillet, la teneur en eau volumique non gelée augmente lentement pour atteindre une valeur de 0,13 le 25 juillet 2012.

Puisque la sonde de succion placée dans les résidus s'est brisée, les résultats de succion à 5 cm de profondeur dans les résidus ne sont pas disponibles pour cette station.

Le flux d'oxygène moyen mesuré à la station S5 varie de 4 moles·m^{-2}·an^{-1} à 68 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lors de l'installation de la station S5 jusqu'au mois d'octobre 2011, le flux d'oxygène est inférieur à 22 moles·m^{-2}·an^{-1}. En octobre 2011, il augmente à une valeur de 68 moles·m^{-2}·an^{-1} pour ensuite redescendre en décembre 2011 à une valeur de 8 moles·m^{-2}·an^{-1}. À partir de mai 2012, des valeurs de F_L entre 15 et 22 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurées.

5.1.7 Station S6 (recouvert de 1,2 m)

La Figure 5-8 et le Tableau 5.6 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S6 pour la période du 4 août 2011 au 19 juillet 2012.

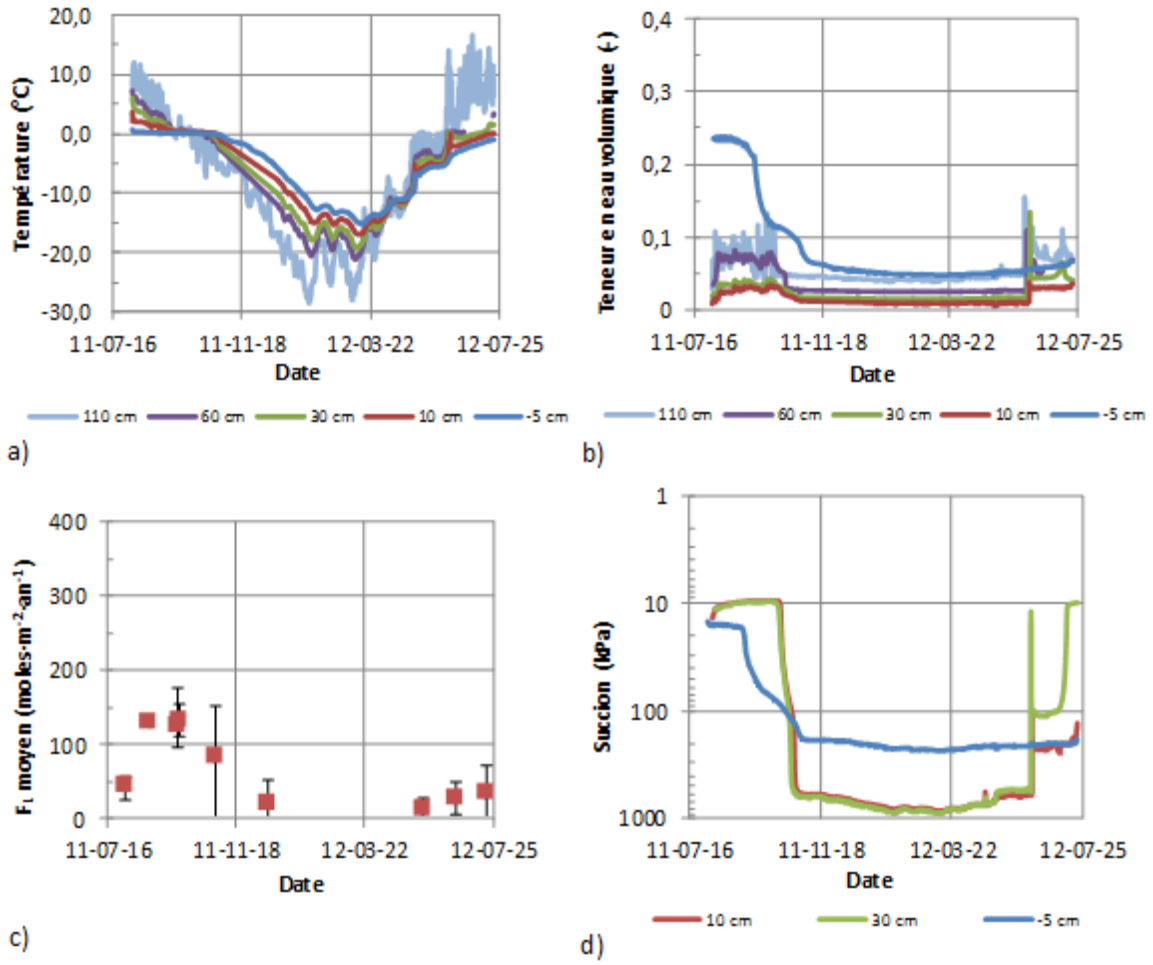


Figure 5-8: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S6 avec recouvrement de 1,2 m (voir Figure 5-2) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.6 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S6 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min}	T_{max}	$\theta_{u\ min}$	$\theta_{u\ max}$	ψ_{min}	ψ_{max}	$F_{L\ min}$	$F_{L\ max}$
	(°C)	(°C)	(-)	(-)	(kPa)	(kPa)	(moles/m^2/an)	(moles/m^2/an)
2011-08-04	0,1	0,7	0,23	0,24	15	18	44	130
2011-09-05	0,0	0,1	0,10	0,23	-	-	125	134
2011-10-23	-15,2	-0,1	0,05	0,10	-	-	15	84

La température à une profondeur de 5 cm dans les résidus varie entre 0,7°C et -15,2°C du 4 août 2011 au 19 juillet 2012. On observe également une période de phase zéro à 0°C à cette station à partir de mi-septembre 2011 jusqu'au début du mois de novembre 2011. La température est inférieure à 0°C dans les résidus à partir du 23 octobre. Ensuite, la température diminue pour atteindre sa valeur la plus faible (-15,2°C) le 12 mars 2012. A partir de cette date, elle augmente et atteint une valeur de -1,0°C en juillet 2012.

La teneur en eau volumique non gelée dans les résidus varie entre 0,05 et 0,24 d'août 2011 à juillet 2012. Lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C, la teneur en eau volumique est plutôt stable à des valeurs entre 0,23 et 0,24, correspondant à des degrés de saturation de 53% et 56%. Au début du mois de septembre, les valeurs de θ_u diminuent constamment dans les résidus pour atteindre une valeur de 0,11 au début du mois de novembre et une valeur minimale de 0,05 le 14 décembre 2012. Ensuite, à partir du 1 avril 2012 jusqu'en juillet 2012, elles augmentent lentement pour atteindre une valeur de 0,07 le 19 juillet 2012.

La succion dans les résidus se maintient entre 15 et 18 kPa lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C. En dehors de cette période, les valeurs de succion ne sont pas considérées puisque la température des résidus se maintient sous 0°C et que pour des températures sous le point de congélation, le senseur donne des valeurs erronées.

Le flux d'oxygène moyen mesuré à la station S6 varie de 15 moles·m^{-2}·an^{-1} à 134 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lors de l'installation de la station S6 jusqu'au mois d'octobre 2011, les valeurs de F_L varient de 44 à 134 moles·m^{-2}·an^{-1}. En octobre 2011, le flux d'oxygène moyen est de 84 moles·m^{-2}·an^{-1} et descend en décembre 2011 à une valeur de 21 moles·m^{-2}·an^{-1}. Depuis mai 2012, des flux entre 15 et 37 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés.

5.1.8 Station S7 (recouvert de 0,4 m)

La Figure 5-9 et le Tableau 5.7 présentent les résultats et les mesures prises pour la station S7 pour la période du 16 juillet 2011 au 25 juillet 2012.

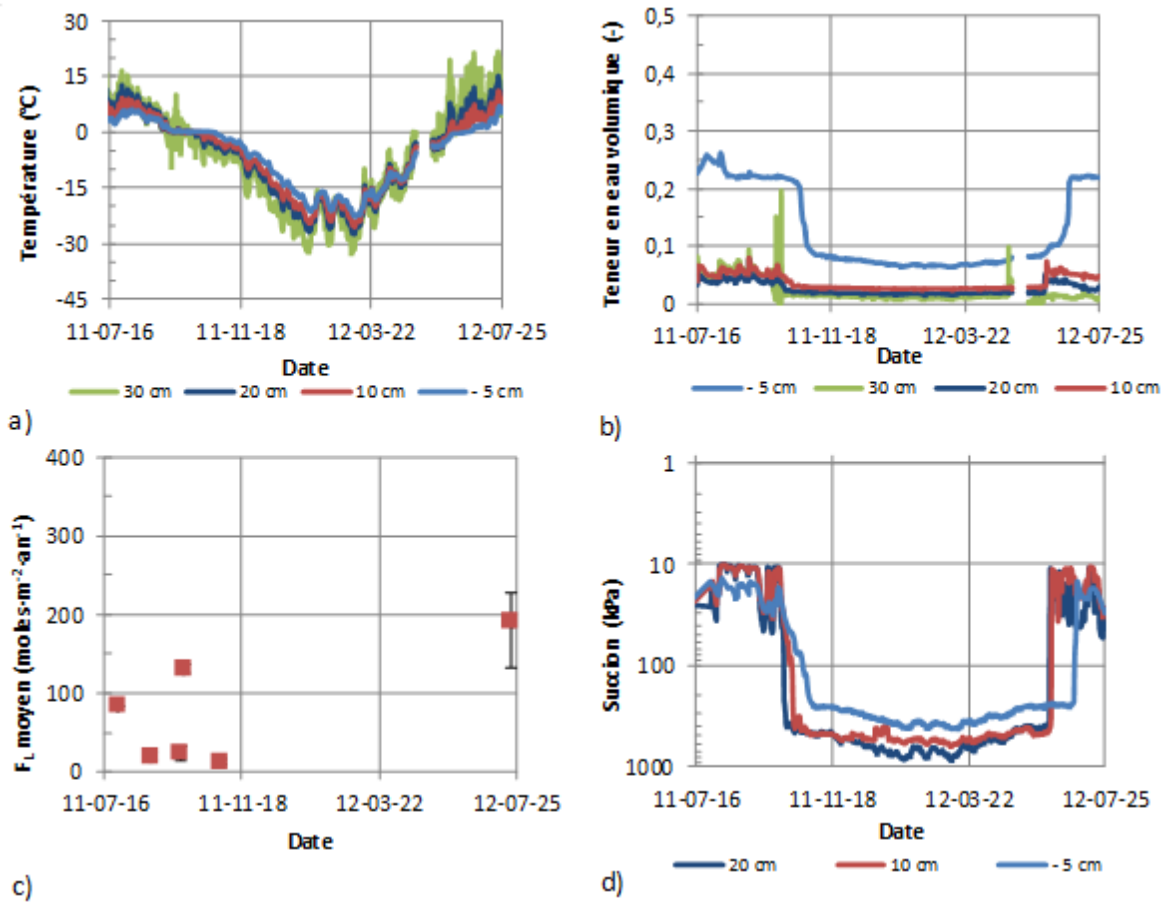


Figure 5-9: Mesures prises dans les résidus miniers et dans le recouvrement pour une année à la station S7 avec recouvrement de 0,4 m (voir Figure 5-2 pour localisation) : a) température ; b) teneur en eau volumique ; c) flux d'oxygène moyen, minimal et maximal ; d) succion

Tableau 5.7 : Résumé des résultats à 5 cm sous la surface des résidus pour la station S7 à différentes périodes de l'année

Début	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	$\theta_{u\ min}$ (-)	$\theta_{u\ max}$ (-)	ψ_{min} (kPa)	ψ_{max} (kPa)	$F_{L\ min}$ (moles/m^2/an)	$F_{L\ max}$ (moles/m^2/an)
2011-07-16	0,3	6,1	0,22	0,26	14	27	20	83
2011-09-16	0,0	0,6	0,14	0,22	-	-	24	131
2011-10-24	-22,7	0,0	0,06	0,14	-	-	13	-
2011-06-22	0,1	7,0	0,12	0,22	15	31	191	-

La température à une profondeur de 5 cm dans les résidus varie entre 6,1°C et -22,7°C du 16 juillet 2011 au 25 juillet 2012. On observe également une période de phase zéro à 0°C à cette station à partir de mi-septembre 2011 jusqu'à la fin d'octobre 2011. La température est inférieure à 0°C dans les résidus à partir du 24 octobre. Suite à cette période de phase zéro, la température diminue pour atteindre sa valeur la plus faible (-22,7°C) le 7 mars 2012. A partir de cette date, elle augmente et atteint une valeur de 7,0°C en juillet 2012.

Les valeurs de θ_u dans les résidus varient entre 0,06 et 0,26 de juillet 2011 à juillet 2012. De la pose de l'instrumentation jusqu'au début du mois de novembre, elles varient entre 0,22 et 0,26 (51% < S_r < 60%) En novembre, la teneur en eau volumique non gelée diminue constamment dans les résidus pour atteindre une valeur minimale de 0,06. A partir de la mi-mai 2012 jusqu'à la fin juin 2012, elle augmente de 0,08 à 0,22, pour rester constante à 0,22 jusqu'en juillet 2012.

La succion dans les résidus oscille entre 15 et 31 kPa et augmente au début du mois d'octobre 2011 jusqu'au début du mois de novembre 2011 en raison du gel de l'eau interstitielle. A la mi-juin 2012, le senseur recommence à donner des valeurs réalistes et indique des valeurs entre 15 et 31 kPa.

Le flux d'oxygène moyen mesuré à la station S7 varie de 13 moles·m^{-2}·an^{-1} à 191 moles·m^{-2}·an^{-1}. Lors de l'installation de la station jusqu'au mois d'octobre 2011, les valeurs de F_L mesurés varient de 20 à 131 moles·m^{-2}·an^{-1}. Les tests de CO n'ont pas été menés en octobre, mai et juin 2012 car les cylindres servant aux tests étaient remplis soit de glace, de neige ou d'eau. Les cylindres sont placés dans une petite dépression qui entraîne une accumulation de neige à l'endroit où la station a été implantée. En juillet 2012, les tests ont pu reprendre et un flux d'oxygène de 191 moles·m^{-2}·an^{-1} a été mesuré.

5.2 Interprétation des résultats du test de consommation d'oxygène

Les résultats des tests de consommation d'oxygène présentés à la section 5.1 par station sont résumés à la Figure 5-10 pour les stations non recouvertes en a) et pour les stations avec recouvrement de 0,4 m et 1,2 m en b). Les détails des résultats de tests de consommation d'oxygène et leur interprétation sont fournis à l'annexe A.1. On observe à la Figure 5-10 a) que les tendances au niveau de l'évolution du flux d'oxygène moyen sont assez similaires pour les trois stations non recouvertes (S1 à S3), mais avec des intensités différentes. La station S1 est

globalement moins réactive que S2 et S3 pour une même période dans l'année. Les flux d'oxygène maximaux sont mesurés au mois de juillet (2011 et 2012) et atteignent des valeurs de 240, 389 et 544 moles·m^{-2}·an^{-1} pour S1, S2 et S3 respectivement. Le flux d'oxygène décroit graduellement avec le temps de juillet 2011 jusqu'à la fin du mois d'octobre 2011 où il atteint des valeurs inférieures à 7 moles·m^{-2}·an^{-1}. En juin 2012, le flux d'oxygène atteint des valeurs entre 195 et 259 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les stations S1 à S3 et continue à augmenter en juillet 2012 avec des valeurs mesurées de F_L entre 240 et 389 moles·m^{-2}·an^{-1}.

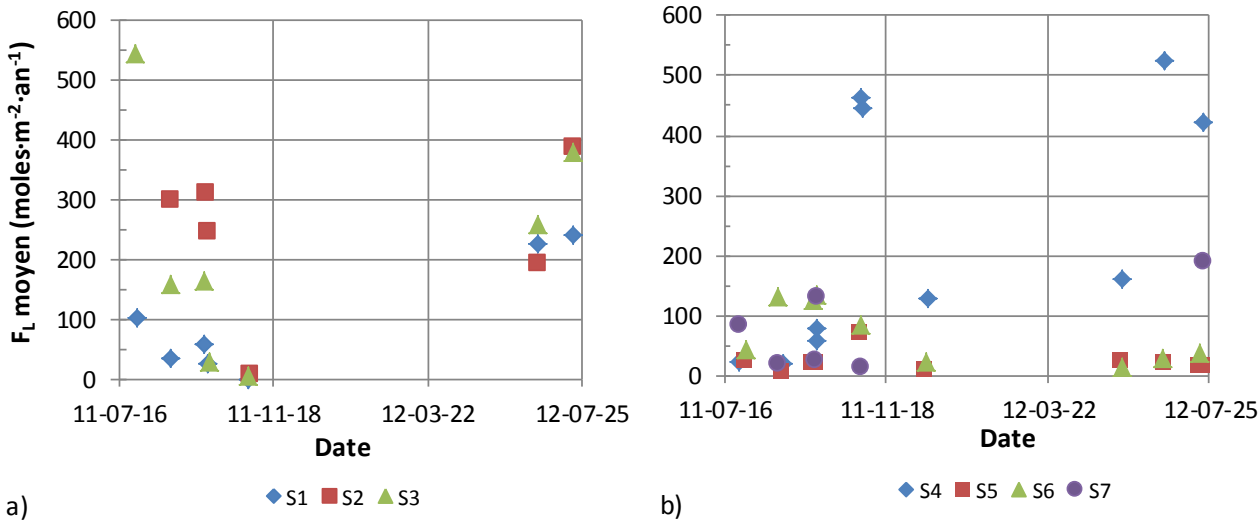


Figure 5-10: Flux d'oxygène moyen par station pour la période de juillet 2011 à juillet 2012 : a) stations non recouvertes; b) stations avec recouvrement de 0,4 m et 1,2 m de gravier 0-20 mm

Pour deux des stations avec recouvrement de 1,2 m de gravier (stations S5 et S6), les flux d'oxygène se maintiennent à des valeurs inférieures à 125 moles·m^{-2}·an^{-1} pour la période d'étude. Les flux d'oxygène augmentent à partir du mois de juillet 2011 pour atteindre une valeur de 125 moles· m^{-2}·an^{-1} à la fin du mois de septembre 2011 pour S6 et de 68 moles·m^{-2}·an^{-1} à la fin du mois d'octobre pour S5. Les flux redescendent ensuite en décembre à des valeurs inférieures à 23 moles·m^{-2}·an^{-1} pour S5 et S6. A partir du mois de mai 2012, des flux inférieurs à 22 et 47 moles·m^{-2}·an^{-1} sont observés aux stations S5 et S6 respectivement. La station S4 de son côté est significativement plus réactive que les deux autres stations couvertes de 1,2 m, avec un flux d'oxygène maximal de 525 moles·m^{-2}·an^{-1} versus 68 moles·m^{-2}·an^{-1} pour S5 et 125 moles· m^{-2}·an^{-1} pour S6. Vu le comportement particulier de la station S4, qui sera d'ailleurs discuté plus en détail plus tard dans ce chapitre, il a été décidé de ne pas inclure cette station dans l'analyse des

résultats sur la réactivité des rejets de la mine Raglan. Les flux d'oxygène mesurés à la station S7 avec recouvrement de 0,4 m se maintiennent à des valeurs inférieures à 116 moles·m^{-2}·an^{-1} en 2011, des valeurs similaires à celles mesurées à la station non recouverte S1 et aux stations S5 et S6 ayant un recouvrement de 1,2 m. Au mois de juillet 2012, un flux de 191 moles·m^{-2}·an^{-1} a été mesuré, ce qui se rapproche des flux mesurés pour les stations non couvertes S2 à S3.

5.3 Interprétation des résultats de la teneur en eau volumique non gelée dans les résidus

L'évolution des teneurs en eau volumique non gelées dans les résidus à 5 cm de profondeur sous la surface des résidus pour la période d'étude sont présentées à la Figure 5-11, pour les stations non recouvertes en a) et pour les stations avec recouvrement en b). La période où la température des résidus est inférieure à 0°C est représentée sur la figure.

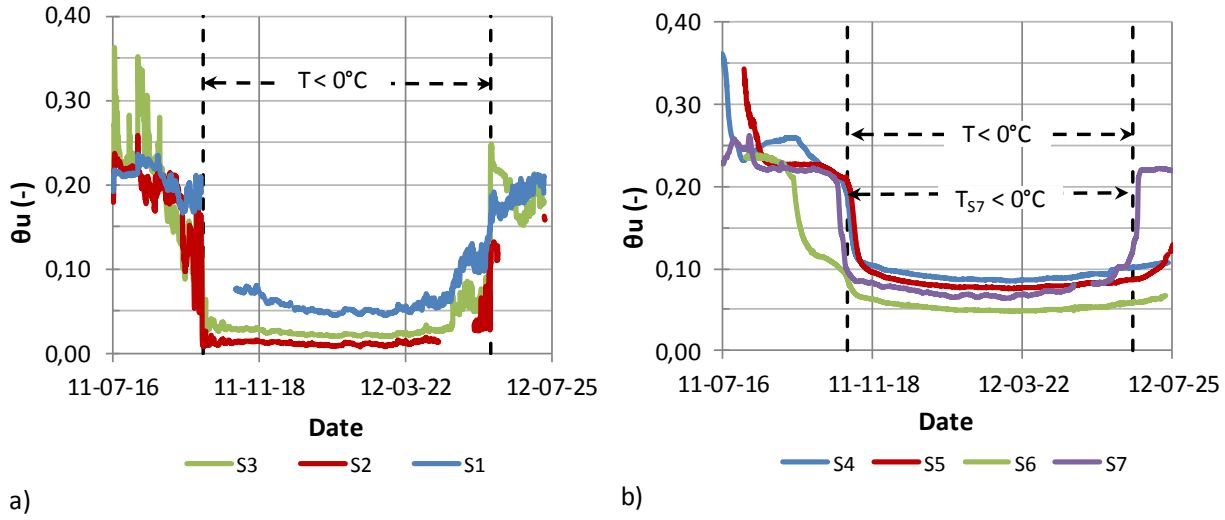


Figure 5-11 : Teneur en eau volumique non gelée mesurée dans les résidus à 5 cm de profondeur ; a) station non couvertes S1 à S3 ; b) stations couvertes S4 à S7

Pour la période de dégel, lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C, les valeurs de θ_u des stations S1 et S2 non recouvertes se maintiennent entre 0,17 et 0,26, valeurs correspondant à des degrés de saturation entre 40% et 60% (pour une porosité de 0,43). Pour S3, elles se maintiennent de façon générale entre des valeurs de 0,14 et 0,28 (33% < S_r < 65%), avec des pics à 0,36 (S_r > 83%). Pour la station S7 avec recouvrement de 0,4 m, elles se maintiennent entre 0,22 et 0,26 (51% < S_r < 60%). Pour les stations avec recouvrement de 1,2 m, les teneurs en eau

volumique non gelées dans les résidus miniers de S4, S5 et S6 lors de l'installation des instruments sont de 0,36 (S_r = 84%), 0,34 (S_r = 79%) et 0,23 (S_r = 53%) respectivement. L'installation a probablement modifié les conditions du milieu, ce qui expliquerait ces valeurs plus élevées. Ensuite, θ_u se stabilise à des valeurs variant entre 0,23 et 0,26 (53% < S_r < 60%), ce qui se rapproche des valeurs observées sur les résidus non recouverts et avec recouvrement de 0,4 m de gravier. À noter qu'à la sortie des filtres presses à l'usine de concentration et lors de leurs mises en place dans le parc à résidus, les résidus ont une teneur en eau massique d'environ 15%, correspondant à une teneur en eau volumique de 0,25 (si on pose comme hypothèse une porosité de 0,43).

Ainsi, selon les mesures de teneur en eau volumique prises à 5 cm de profondeur, le degré de saturation à la surface des résidus ne semble pas avoir augmenté significativement depuis leur mise en place et se maintient à des valeurs qui ne sont pas suffisantes pour empêcher les réactions d'oxydation. En effet, pour que la réactivité soit réduite de façon significative, le degré de saturation doit se situer à des valeurs supérieures à 85%. De cette façon, l'air est peu disponible ce qui empêche la réaction d'oxydation de se produire (e.g. Demers et al., 2009; Ouangrawa et al., 2010).

Une étude sur l'abaissement du point de congélation dans les résidus de Mine Raglan mentionne que pour faire geler l'eau de procédé de Mine Raglan (sans résidus), la température nécessaire est de -0,7°C (EcoMetrix, 2008). Sur le terrain, cette baisse du point de congélation n'est pas observée. En effet, on observe aux Figure 5-6 a) à Figure 5-9 a) une période de phase zéro dans les résidus, période où le gel de l'eau interstitielle relâche de la chaleur latente qui maintient la température du sol à 0°C. Cette phase zéro se produit pour les résidus entre -0,1 et 0,1 °C. Donc, le gel des résidus se produit bien à 0°C et la baisse du point de congélation mentionnée dans l'étude d'EcoMetrix (2008) n'est pas observée dans la présente étude. On peut penser qu'avec le temps, l'eau à la surface des résidus se renouvelle et que la salinité initiale diminue.

Durant la période de gel des résidus, des teneurs en eau volumique non gelées minimales entre 0,01 et 0,05 ont été observées dans les résidus à 5 cm de profondeur pour les stations non recouvertes et entre 0,05 et 0,08 pour les stations ayant un recouvrement de 0,4 m et 1,2 m. Il a été mentionné plus tôt au chapitre 2 que la présence d'eau non gelée est nécessaire afin que la réaction d'oxydation des résidus puisse se produire. Ainsi, puisqu'il y a présence d'eau non gelée

dans les résidus lors de la période de gel, on pourrait penser que l'oxydation des résidus miniers est possible à des températures sous 0°C. La Figure 5-12 présente les flux d'oxygène mesurés en fonction de la teneur en eau volumique non gelée pour toutes les stations réunies (excluant S4).

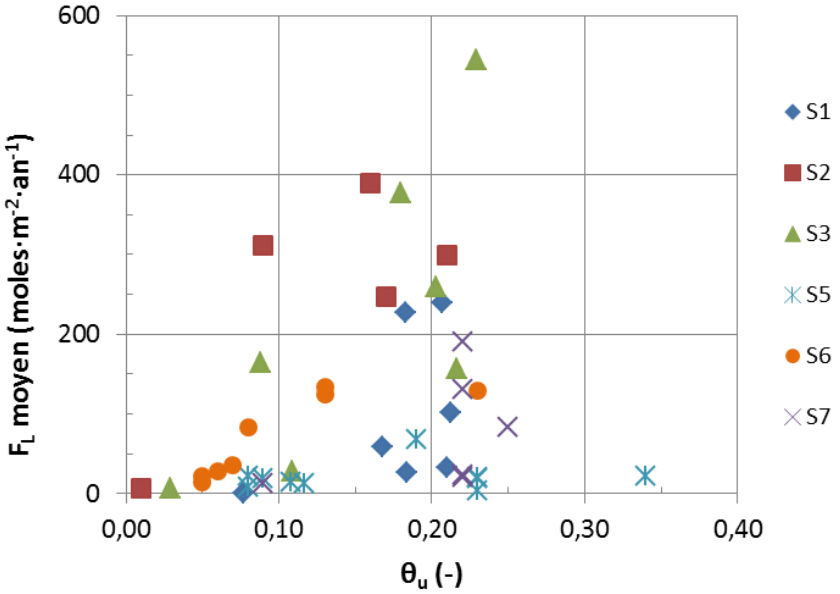


Figure 5-12 : Flux d'oxygène moyen mesurés par station selon la teneur en eau volumique non gelée

Des flux d'oxygène ont été mesurés sur le terrain à plusieurs reprises, atteignant des valeurs jusqu'à 544 moles·m^{-2}·an^{-1}, confirmant que les degrés de saturation en place n'empêchent pas la réaction d'oxydation de se produire. Les flux d'oxygène sont maximaux ($F_{L,\ max}$ = 544 moles·m^{-2}·an^{-1} à θ_u = 0,23) pour des valeurs de θ_u entre 0,17 et 0,23, ce qui correspond à des degrés de saturation (S_r) entre 40% et 53%. Ces valeurs optimales de saturation pour l'oxydation des rejets de Mine Raglan ont également été observées au laboratoire dans les présents travaux (voir Figure 4-11). Elles concordent aussi avec d'autres études menées sur le sujet (mentionnées dans le chapitre 2), selon lesquelles la réactivité des résidus miniers est optimale pour des valeurs de S_r entre 20% à 80% (Gosselin, 2007) et entre 40% et 60% (Hamdi, 2011, Bouzahzah et al., 2010, 2012). L'oxydation des résidus diminue à des flux d'oxygène inférieurs à 37 moles·m^{-2}·an^{-1} pour une teneur en volumique inférieure à 0,08. Il est possible que la réaction d'oxydation soit restreinte à ces valeurs de teneur en eau volumique en raison de la disponibilité limité en eau liquide pour la réaction d'oxydation (Godbout et al., 2010). Également, cette diminution des taux d'oxydation pourrait s'expliquer par la présence de glace qui limite la diffusion de l'oxygène

dans le sol gelé. À ce moment, la diffusion pourrait devenir un facteur limitant l'oxydation des sulfures. D'autres mécanismes influençant la réaction d'oxydation contribuent probablement à cette diminution du flux d'oxygène sous une valeur de θ_u de 0,08, pensons notamment à l'effet de la température.

5.4 Effet de la température sur la réactivité

L'effet de la température sur la réactivité des résidus miniers est présenté à la Figure 5-13 par station. On remarque sur cette figure que, tel qu'attendu, le flux d'oxygène diminue avec la température des résidus. Les valeurs de F_L passent de 544 moles·m^{-2}·an^{-1} à 12,8°C à des valeurs variant entre 24 et 312 moles·m^{-2}·an^{-1} à 0,0°C. On observe également à la Figure 5-13 que l'oxydation des résidus miniers est possible à une température de 0°C, comme mentionné dans les autres études sur le sujet. À partir d'une température de -2°C, il semble y avoir un effet important de la température sur la réactivité des résidus. En effet, les flux d'oxygène mesurés diminuent à des valeurs inférieures à 28 moles·m^{-2}·an^{-1}. À une température de -5,7°C, les flux d'oxygène sont inférieurs à 15 moles·m^{-2}·an^{-1}.

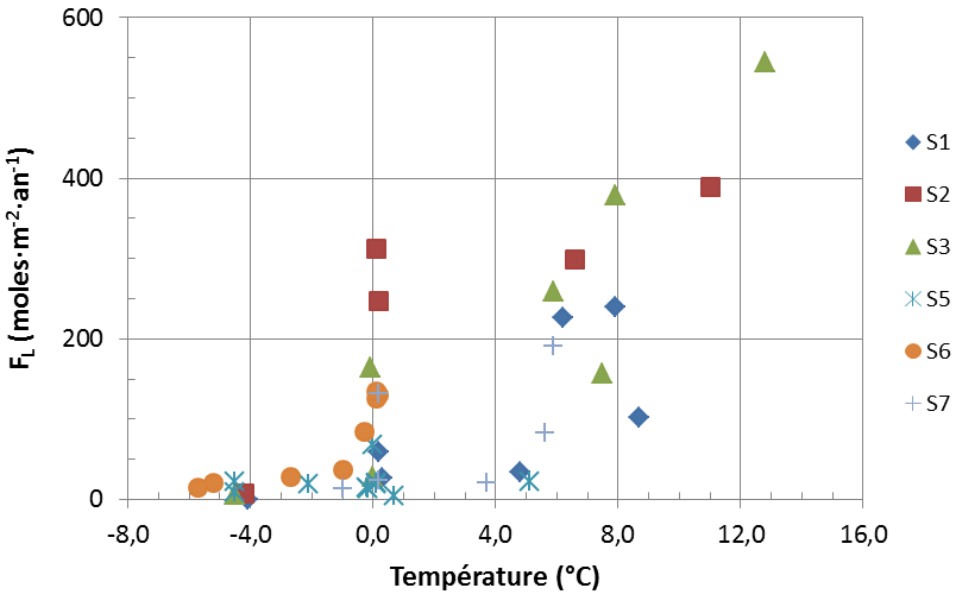


Figure 5-13 : Effet de la température des résidus à 5 cm de profondeur sur le flux d'oxygène pour toutes les stations (excluant S4)

L'effet de la température sur la réactivité des résidus miniers sulfureux peut être prédite avec l'équation d'Arrhénius (Nicholson et al., 1988; Nicholson et al., 1988; Elberling, 2001; voir l'équation 2.6 au chapitre 2). La section suivante présente une vérification de la validité de cette équation pour prédire l'effet de la température sur la réactivité des résidus de Mine Raglan avec les données mesurées directement sur le terrain.

5.4.1 Application de la loi d'Arrhénius

À la Figure 5-14, l'équation d'Arrhénius est utilisée pour prédire l'effet de la température sur la consommation d'oxygène (ou réactivité) avec trois énergies d'activation différentes (E_a = 60,0 kJ/moles, E_a = 88,0 kJ/mole et E_a = 124,0 kJ/mole); ces valeurs proviennent de la littérature pour l'oxydation de la pyrrhotite par l'oxygène (48 à 124 kJ/mole, Janzen et al., 2000). Un flux d'oxygène K_1=945 moles·m^{-2}·an^{-1} obtenu en laboratoire pour un degré de saturation de 45% (voir section 4.2.5) à une température T_1=21°C est utilisé pour le calcul.

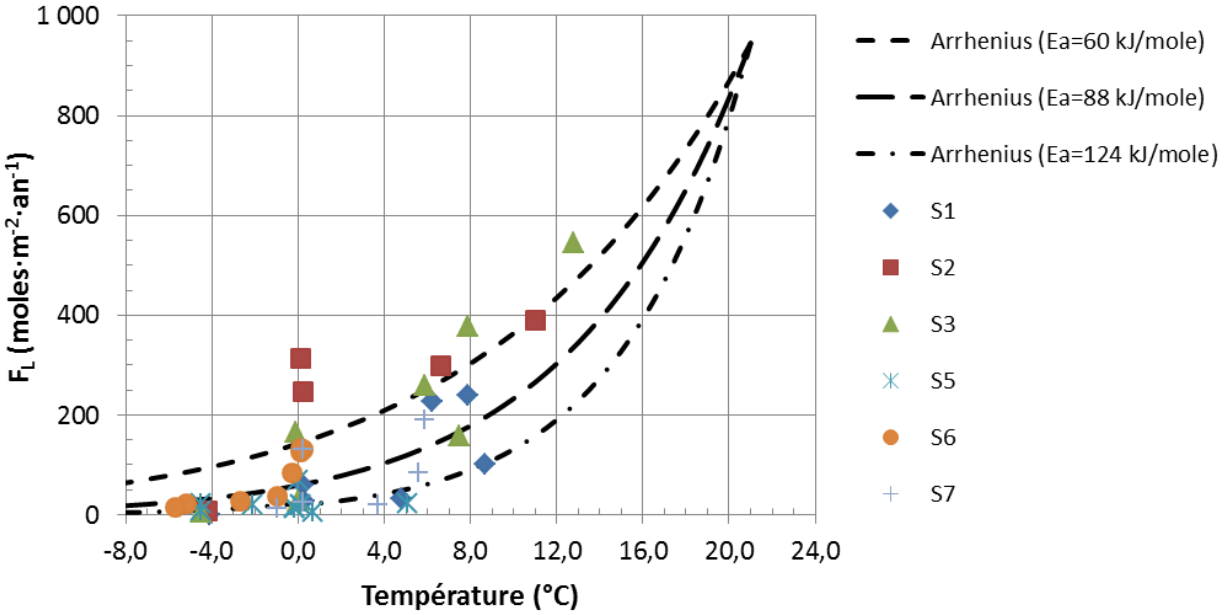


Figure 5-14 : Effet de la température sur le flux d'oxygène des résidus et prédictions avec l'équation d'Arrhénius

On remarque à la Figure 5-14 que la loi d'Arrhénius concorde assez bien avec les données de terrain pour une énergie d'activation entre 60 et 124 kJ/mole. Pour des valeurs de température supérieures à -1,0°C, une énergie d'activation entre 60 et 88 kJ/moles concorde mieux avec les

données. À partir de -2,0°C, une énergie d'activation entre 88 et 124 kJ/mole semble plus appropriée. Ainsi, il semble que les mécanismes de la réaction d'oxydation diffèrent selon la température (ex. oxydation chimique vs galvanique). Ce changement de comportement avec la température a également été observé dans la littérature. Selon l'étude d'Elberling (2001), l'équation d'Arrhénius représente bien l'effet de la température sur la réactivité lorsque la température est supérieure à 0°C, mais une régression linéaire représente mieux cette relation sous 0°C. Elberling (2005) a observé une augmentation du Q_{10} (voir section 2.2.3 pour définition) à partir de -2°C pour la pyrite, passant de 2 à 10. Il explique ce changement par une diminution de la disponibilité en oxygène à la surface des grains de pyrite pour l'oxydation en condition de gel (phénomène d'emprisonnement de l'oxygène dans la glace; section 2.2.3).

On peut également utiliser l'équation d'Arrhénius pour prédire l'effet de la température sur la courbe de réactivité en fonction du degré de saturation mesurée en laboratoire à 20°C. Le flux maximal mesuré *in situ* dans les résidus est de 544 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les résidus non recouverts à la station S3 en juillet 2011 à 12,8°C versus une réactivité maximale évaluée en laboratoire de 1073 moles·m^{-2}·an^{-1} pour un S_r = 51 % à 20°C. La réactivité maximale mesurée sur le terrain est plus faible que celle observée en laboratoire, ce qui pourrait être expliquée par l'effet de la température avec la loi d'Arrhénius. À des fins de comparaison, les résultats de consommation d'oxygène obtenus sur le terrain, la réactivité des résidus prédite avec l'équation d'Arrhénius à 12°C (E_a = 60 kJ/moles) et prédite à 0°C (E_a = 88 kJ/moles) sont présentés à la Figure 5-15.

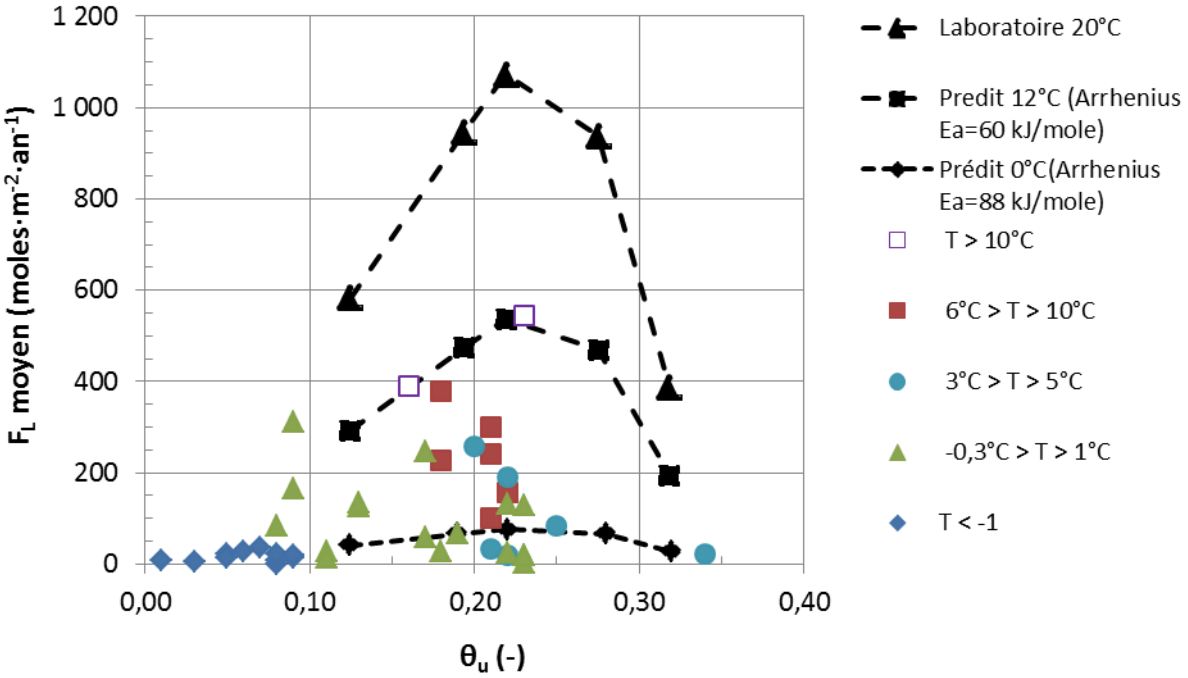


Figure 5-15 : Réactivité des résidus miniers selon la teneur en eau volumique non gelée mesurée sur le terrain, en laboratoire à 20°C et prédites à 12°C avec Arrhénius

Le flux maximal mesuré sur le terrain de 544 à 12,8°C est bien prédit avec la loi d'Arrhénius pour E_a = 60 kJ/mole. Les valeurs mesurées à 0°C sur le terrain sont également assez bien prédites pour E_a avec 88 kJ/mole. Ces résultats montrent clairement que la réactivité sur le terrain est influencée et par la température, et par le degré de saturation des rejets. Si le degré de saturation varie significativement sur le terrain, ce paramètre influencera les réactivités mesurées sur le terrain, au même titre que la température. Ainsi, à des températures supérieures à 0°C, la réaction d'oxydation semble être principalement contrôlée par les cinétiques de réaction chimique (équation d'Arrhénius) et par la diffusion de l'oxygène (degré de saturation). À une température inférieure à -1°C, il est plus difficile de tirer de telles conclusions. Les mécanismes contrôlant l'oxydation des résidus miniers dans ces conditions ne sont pas encore parfaitement connus et peu d'études ont été menées sur l'identification de ces derniers.

5.4.2 Identification de la température cible

La Figure 5-16 montre l'effet de la température sur les résidus dans le but d'identifier la T_{cible} (ou une plage de valeur) où l'oxydation des résidus peut être considérée négligeable (même si l'on

sait que la température n'est pas le seul paramètre qui contrôle la réactivité). On remarque sur la figure que la température pour arrêter l'oxydation des résidus est inférieure à 0°C. À des températures de -2,1°C et -2,7°C, les flux d'oxygène mesurés sont de 19 et 28 moles·m^{-2}·an^{-1}. Des valeurs de F_L entre 0 et 22 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurées à des températures entre -4,1°C et -5,7°C. Un flux d'oxygène de 15 moles·m^{-2}·an^{-1} a été mesuré à une température de -5,7°C. Vu la variabilité du test de consommation d'oxygène (± 35%) et l'influence de d'autres paramètres sur la réactivité (ex. degré de saturation des rejets, % de sulfures, etc.), il est difficile de statuer précisément sur une température cible. On peut considérer, dans le cas particulier des résidus de Mine Raglan, que l'oxydation des sulfures est diminuée de façon considérable à des températures entre -2°C et -6°C (0 < F_L < 22 moles·m^{-2}·an^{-1}) versus les flux d'oxygène mesurés à une température supérieure à -2°C (4 < F_L < et 312 moles·m^{-2}·an^{-1}).

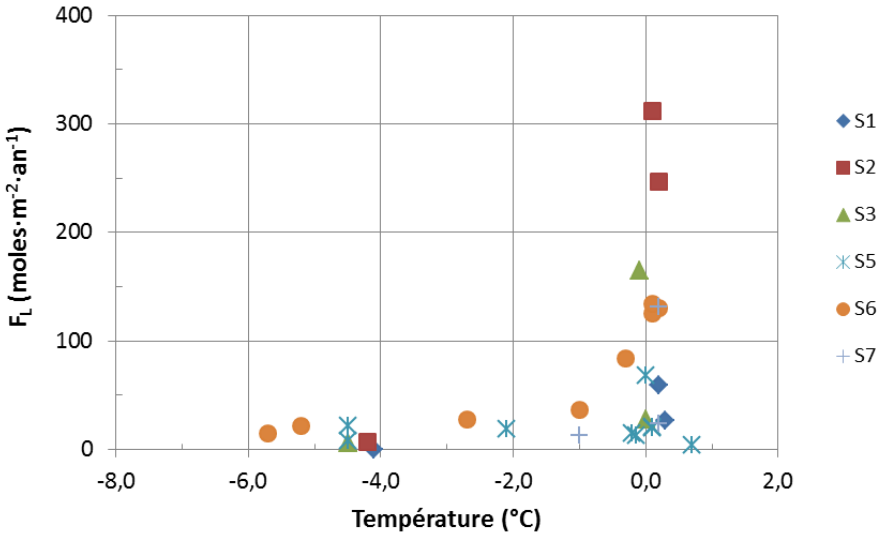


Figure 5-16 : Effet de la température des résidus à 5 cm de profondeur sur le flux d'oxygène moyen

À titre comparatif, dans les travaux de restauration de site miniers au Québec, des flux d'oxygène inférieurs à 10 moles·m^{-2}·an^{-1} sont habituellement visé pour que le recouvrement soit considéré comme efficace à empêcher la réaction de DMA de se produire (Dagenais, 2005; Demers et al., 2009). En se basant sur la loi d'Arrhénius pour une énergie d'activation de 124 kJ/mole (voir Figure 5-16), un taux d'oxydation de 10 moles·m^{-2}·an^{-1} serait atteint à une température des résidus de -7,3°C. Dans la littérature, des températures minimales d'oxydation de -2°C (Meldrum, 1998),

de -4°C (Elberling, 2001) ont été proposées. Ainsi, une température minimale d'oxydation entre -2°C et -6°C semble concorder avec les études préalables sur le sujet.

5.5 Variation spatiale des mesures *in situ*

Il a été vu dans les sections précédentes que les comportements thermique et hydrique affectent la réactivité des résidus miniers. Ce comportement thermo-hydrique sera lui-même influencé par la localisation géographique des stations (duré d'exposition au soleil, exposition au vent dominant, teneur en eau volumique, etc.). Également, la composition des résidus miniers (% sulfure) peut influencer le flux d'oxygène. Dans cette section, l'effet de la localisation des stations sur le comportement hydrogéologique et géochimique des résidus miniers est étudié. À titre de rappel, les stations S1, S3, S4 et S5 sont situées au sud du parc à résidus tandis que les stations S2, S6 et S7 sont situées au nord du parc à résidus. Les stations S2, S3 et S5 sont localisées en pente afin de voir si la géométrie du site peut affecter les valeurs de réactivité mesurées.

La Figure 5-17 présente la réactivité des résidus selon leur localisation sur le parc à résidus en a) pour les stations non recouvertes et en b) pour les stations avec recouvrement de 1,2 m.

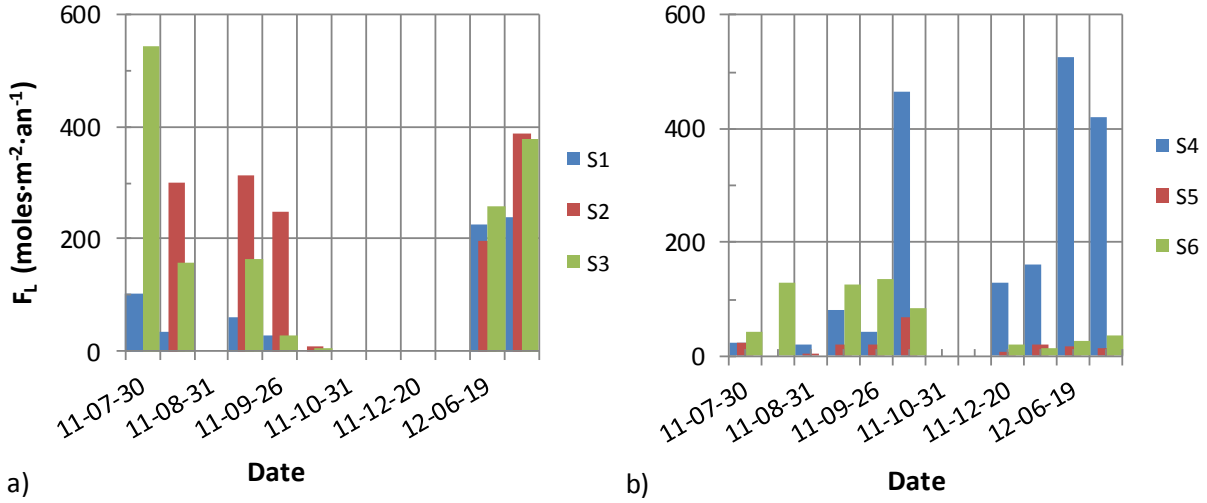


Figure 5-17 : Effet de la localisation sur la réactivité des résidus; a) non couverts ; b) couverts

On observe à la Figure 5-17 que la réactivité des résidus varie de façon importante d'une station à l'autre. On pourrait penser que ces variations du flux d'oxygène sont causées par un comportement thermique et hydrique différent des résidus selon leur localisation. La Figure 5-18 compare ces comportements pour les résidus recouverts (1,2 m) et non recouverts. Pour les

stations non recouvertes (S1 à S3), la variation de la teneur en eau volumique non gelée et de la température des résidus est de façon générale similaire. La teneur en eau volumique non gelée dans les résidus en période de dégel se maintient autour de 0,20 et 0,26 en 2011 et autour de 0,15 et 0,25 en 2012, avec des écarts plus importants pour la station S3. L'évolution du profil de température est également similaire, avec des écarts légèrement plus importants pour S3. Ainsi, le comportement thermo-hydrique des résidus ne permet pas d'expliquer totalement les différences observées dans le flux d'oxygène.

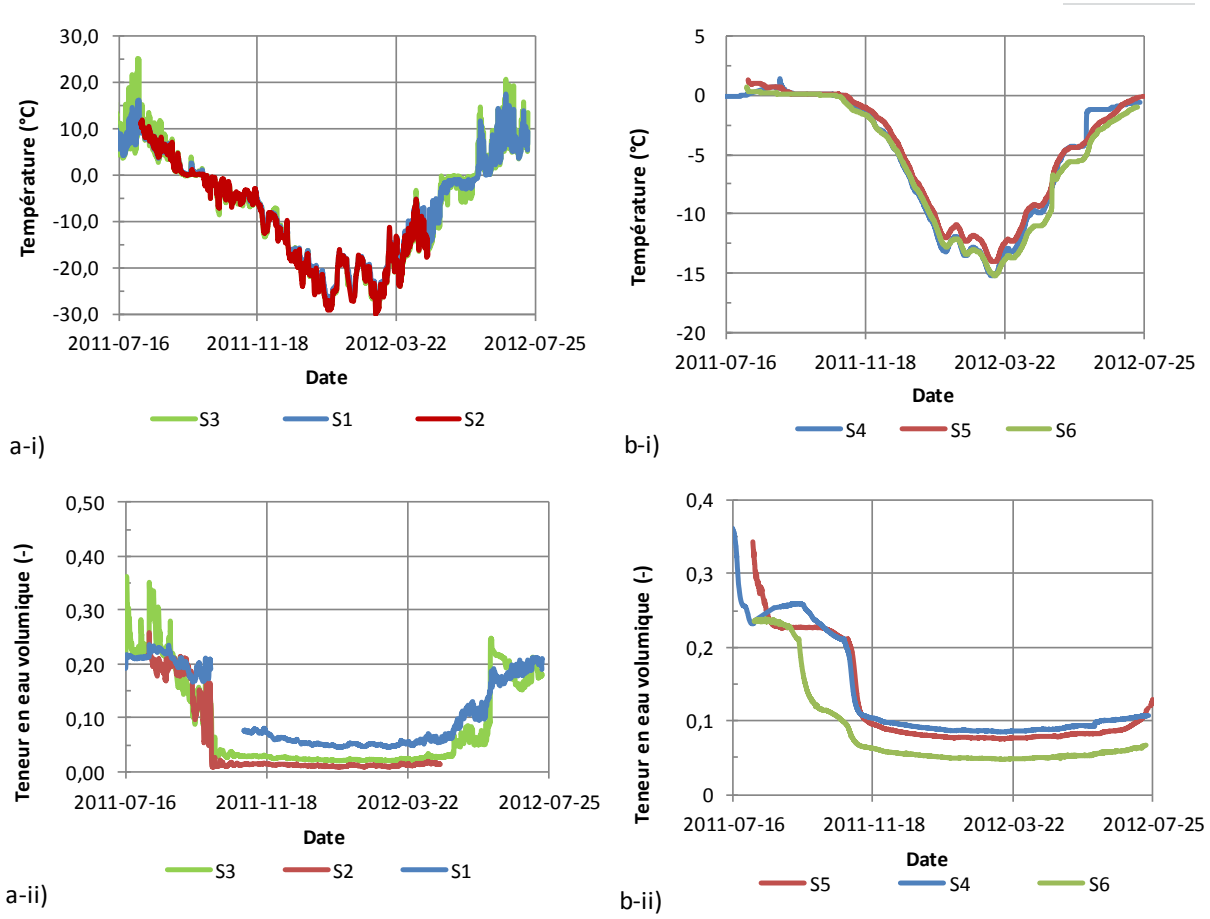


Figure 5-18 : Comparaison du comportement thermique (i) et hydrique (ii) par station : a) stations non couvertes, b) stations couvertes (1,2 m)

Le flux d'oxygène mesuré à S4 varie de façon très importante (20 moles·m^{-2}·an^{-1} < F_L < 525 moles·m^{-2}·an^{-1}) par rapport à ceux de S5 (4 moles·m^{-2}·an^{-1} < F_L < 68 moles·m^{-2}·an^{-1}) et de S6 (15 moles·m^{-2}·an^{-1} < F_L < 125 moles·m^{-2}·an^{-1}). A ces stations, le profil de température et de teneur en

eau volumique non gelée est sensiblement le même, ce qui n'explique pas les variations observés entre les stations. Selon l'étude d'Elberling (2003), l'âge des résidus est un facteur pouvant affecter la réactivité (ou le flux d'oxygène) par un facteur de 3 ou 4. Dans le cas étudié par cet auteur, l'oxydation est maximale lors de la première exposition des résidus et diminue par un facteur trois dans les 7 premières années. Dans la présente étude, les résidus de S4 sont plus récents (≈4 ans) que ceux des stations S5 (≈6 ans) et S6 (≈8 ans). Pour aller dans le même sens, on peut citer également l'étude de Godbout (2012) qui a montré qu'un phénomène de passivation à la surface des grains de pyrrhotite causé par les produits d'oxydation peut diminuer la réactivité avec le temps. Ainsi, la passivation des surfaces pourrait potentiellement expliquer la réactivité plus forte de la station S4 versus les stations S5 et S6.

La composition minéralogique des résidus influence également la réactivité des résidus. Les résidus ont été analysés à l'aide de la DRX afin de connaitre leur minéralogie (section 4.2.2). La teneur relative en sulfure pour chaque station où des tests de consommation d'oxygène ont été réalisés est connue. La pyrrhotite est le minéral sulfureux présent en plus grande quantité dans les résidus de Mine Raglan. Les flux d'oxygène annuel moyen ainsi que la teneur en pyrrhotite par station sont reliés à la Figure 5-19 pour les stations avec et sans recouvrement. Les valeurs du flux d'oxygène moyen annuel ont été calculées à partir de toutes les données de flux d'oxygène disponibles par station.

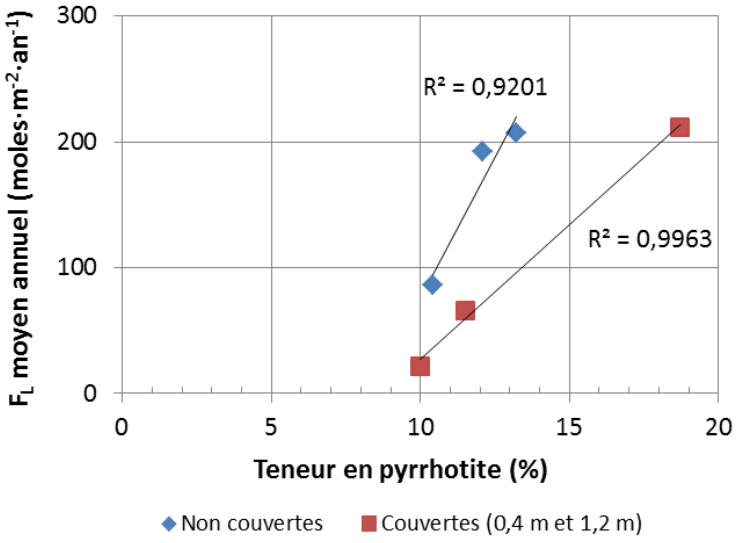


Figure 5-19 : Relation entre la teneur en pyrrhotite et le flux d'oxygène moyen annuel mesuré aux stations couvertes (0,4 m et 1,2 m) et non couvertes

La figure 5-19 montre une relation linéaire entre le flux d'oxygène et la teneur en pyrrhotite avec un coefficient de corrélation de 0,9201 et de 0,9963 pour les stations non couvertes (S1, S2 et S3) et couvertes (S4, S5 et S7) respectivement. En comparant ces valeurs, on remarque que, tel qu'attendu, le flux d'oxygène moyen est plus élevé lorsque la teneur en pyrrhotite est plus élevée. Les flux d'oxygène de S2 et S3 sont plus élevés que celui de S1, ce qui concorde avec la teneur en pyrrhotite plus élevée de S2 (13,2 %) et S3 (12,1 %) versus S1 (10,4 %). La même observation peut être faite pour les stations avec recouvrement (0,4 m et 1,2 m). Les stations S4, S5 et S7 ont une teneur en pyrrhotite de 18,7 %, 10,0 % et 11,5%, pour des flux d'oxygène moyens annuels respectifs de 212, 22 et 66 moles·m^{-2}·an^{-1}. Ainsi, la réactivité plus élevée de la station S4 pourrait être expliquée (à tout le moins en partie) par la teneur plus élevé en pyrrhotite (18,7 %). Selon l'étude de Tibble et Nicholson (1997), la teneur en pyrrhotite influence significativement le flux d'oxygène consommé par les résidus; des flux entre 157 et 696 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés pour des résidus avec 15% pyrrhotite, versus des flux entre 2178 et 4395 moles·m^{-2}·an^{-1} pour un pourcentage en pyrrhotite de 30%.

En résumé, la température et le degré de saturation sont des facteurs importants qui contrôlent la réactivité des résidus mis en place dans le parc à résidus de Mine Raglan. Cependant, ces facteurs ne peuvent pas expliquer à eux seuls les variations spatiales observées sur le parc à résidus de Mine Raglan. D'autres facteurs ont été identifiés dans cette section soit l'âge des résidus et la teneur en pyrrhotite.

5.6 Sommaire

Dans ce chapitre, les différents facteurs influençant la réactivité *in situ* des résidus de Mine Raglan ont été étudiés. Les principales constatations pouvant être tirées de ce chapitre sont:

- Le degré de saturation des résidus miniers se situe entre 40% < S_r < 60% pour l'ensemble des stations étudiées. Ce degré de saturation favorise l'oxydation des résidus miniers.
- L'oxydation diminue de façon importante à une teneur en eau volumique non gelée inférieure à 0,08. La diminution de la disponibilité en oxygène (présence de glace qui diminution l'efficacité de la diffusion de l'oxygène) et le manque d'eau liquide nécessaire à la réaction d'oxydation pourraient entre autres expliquer cette observation.

- La réactivité des résidus miniers diminue avec la température et diminue de façon importante entre -2°C et -6°C. L'essai de consommation d'oxygène ne permet pas d'expliquer les mécanismes contrôlant l'oxydation des résidus miniers en condition de gel.
- Plus de recherche sur les mécanismes contrôlant l'oxydation des résidus miniers en conditions froides est nécessaire.
- L'équation d'Arrhénius décrit relativement bien (considérant que l'on parle d'essais *in situ*) l'effet de la température sur la réactivité des résidus miniers avec une énergie d'activation de 88 kJ/mole pour une température supérieure à 0°C et de 124 kJ/mole pour une température inférieure à 0°C.
- Une forte variation spatiale du flux d'oxygène est observée selon la localisation sur le parc à résidus. Cette variation serait causée par une combinaison des facteurs suivants :
    - La composition des résidus (caractéristiques minéralogiques, physiques, chimiques, etc.);
    - La variation de l'état physique du sol (température et teneur en eau volumique non gelée);
    - La distribution de la température des résidus durant l'année;
    - L'état des résidus (âge, passivation, pH, bactéries).

Les flux d'oxygène mesurés dans cette étude varient entre 0 et 544 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les stations non recouvertes, entre 4 et 134 moles·m^{-2}·an^{-1} (excluant S4) pour les stations avec recouvrement de 1,2 m et entre 13 et 191 moles·m^{-2}·an^{-1} pour la station avec recouvrement de 0,4 m. Ces flux d'oxygène sont du même ordre que ceux mesurés à Mine Raglan dans les autres études menées sur la réactivité des résidus. Archambault (2009) a mesuré des consommations d'oxygène moyennes à quatre stations sur le parc à résidus variant de 137, 279, 589 et 821 moles·m^{-2}·an^{-1} (pour des résidus non recouverts). De son côté, Garneau (2012) a mesuré des flux d'oxygène entre 31 et 59 moles·m^{-2}·an^{-1} sous le recouvrement partiel de 1,2 m pour une température des résidus de -0,2°C au mois d'août 2010. Ces tests ont été menés dans le même secteur que la station S6, où un flux de 44 moles·m^{-2}·an^{-1} a été mesuré au début du moins d'août 2011. Des tests de CO ont été menés au site Nanisivik sur des résidus avec une teneur en pyrite

variant entre 75% et 95% (Elberling, 1998, 2001). Les flux mesurés étaient de l'ordre de 438 à 730 moles·m^{-2}·an^{-1} en août 1997 pour un degré de saturation des résidus inférieur à 20%. Pour la période de juillet à septembre 1998, des flux d'oxygène de l'ordre de 73 à 183 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurés tandis que des valeurs de 44 moles·m^{-2}·an^{-1} ont été mesurées en novembre et décembre 1998 lorsque la température des résidus ($S_r \approx 10\%$) était de -1 à -3°C. Elberling (2001) a pu prédire l'évolution temporelle du flux d'oxygène en se basant seulement sur la température du sol; il n'a par contre pas pu prédire les flux d'oxygène après un événement pluvieux. Suite à ces observations, il a suggéré que le flux d'oxygène est contrôlé majoritairement par la température du sol dans des résidus bien drainés mais que dans certaines conditions, d'autres facteurs tels la teneur en eau volumique non gelée peuvent contrôler la réactivité. C'est également ce qui est observé dans la présente étude.

Maintenant que les paramètres affectant la réactivité des résidus miniers sont mieux compris, nous allons étudier plus en détails l'effet de recouvrements isolants partiels sur le comportement thermique et hydrique des résidus ainsi que sur la réactivité de ces derniers.

CHAPITRE 6 INFLUENCE DES RECOUVREMENTS SUR LA RÉACTIVITÉ DES RÉSIDUS MINIERS DE MINE RAGLAN

Au chapitre 5, les paramètres influençant la réactivité des résidus miniers ont été identifiés. Il a été vu que la température est un facteur important contrôlant la réaction d'oxydation. Une température cible entre -2°C et -6°C a été identifiée pour atteindre une réduction considérable de l'oxydation des résidus. Il a été également mentionné que l'oxydation des résidus varie de façon importante sur le parc à résidus en fonction de plusieurs facteurs tels que la composition des résidus, la variation de l'état physique du sol et l'âge des résidus. Maintenant, avec une meilleure compréhension des facteurs affectant l'oxydation des résidus et de sa variabilité sur le terrain, il est possible d'évaluer l'effet de l'ajout des recouvrements partiels sur la réactivité des résidus miniers.

Dans ce chapitre, une première partie se concentre sur l'évaluation du comportement thermique et hydrique des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m et son impact sur le comportement thermo-hydrique des résidus. Par la suite, des informations supplémentaires sur les propriétés hydrogéologique et thermique des matériaux obtenues grâce aux mesures *in situ* sont présentées. Il s'agit des courbes de gel, des courbes caractéristiques de gel et des courbes de rétention d'eau *in situ*. L'efficacité des recouvrements partiels de 0,4 m et 1,2 m à diminuer l'oxydation des résidus miniers est ensuite évaluée avec la méthode par profil de température et avec la méthode par test de consommation d'oxygène. Finalement, quelques résultats thermiques provenant de la cellule expérimentale simulant le recouvrement final proposé de 2,4 m sont présentés.

6.1 Comportement thermo-hydrique des recouvrements

Dans cette section, les profils thermique et hydrique des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m sont présentés dans le but de voir leur impact sur la réactivité des résidus miniers.

6.1.1 Profil de température dans les recouvrements isolants partiels

La Figure 6-1 présente le profil de température moyenne mensuelle dans le recouvrement et dans les résidus pour les stations S4 à S7, de juillet 2011 à juillet 2012.

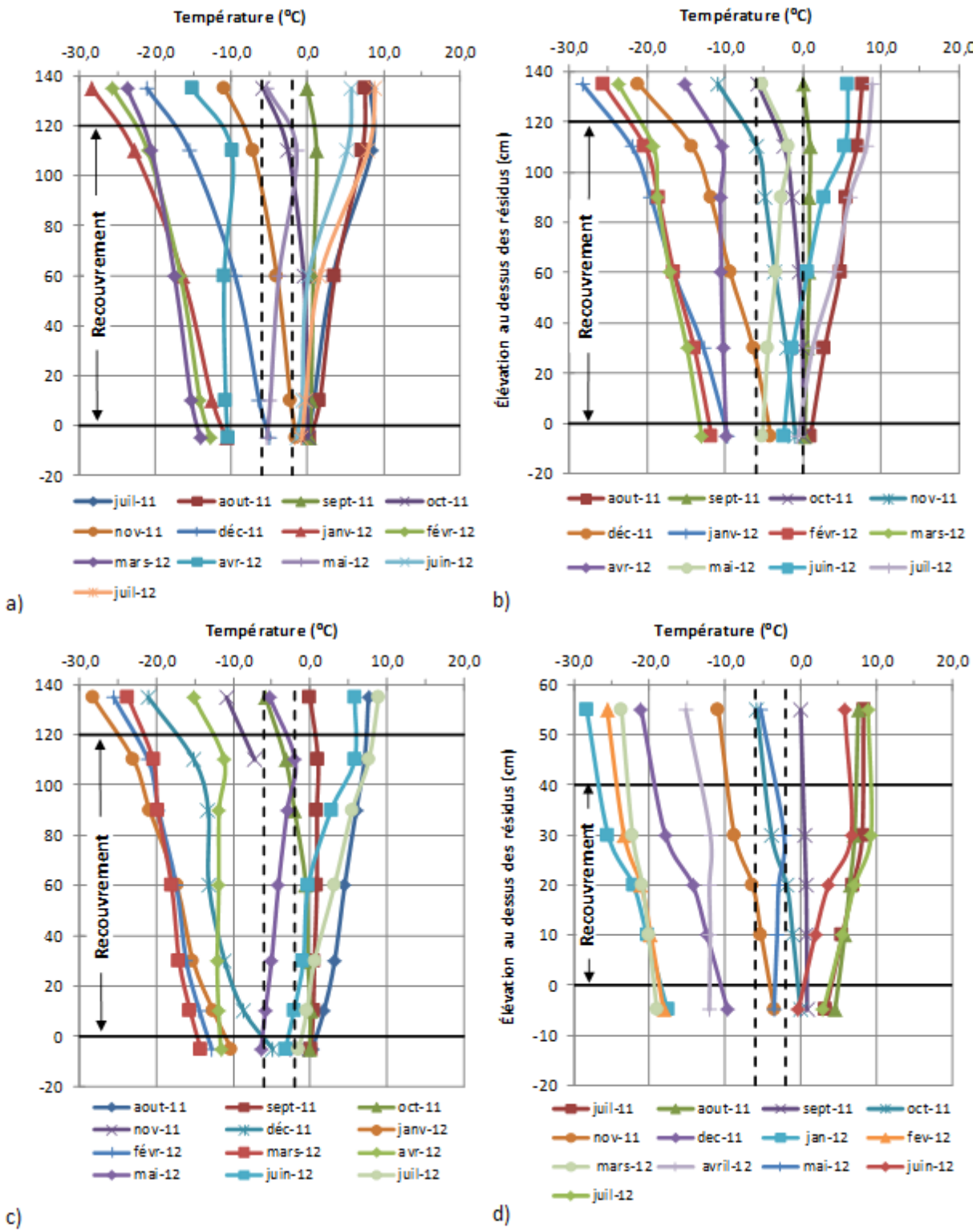


Figure 6-1: Profils de température dans les recouvrements isolants partiels (avec les températures cibles de -2 et -6°C identifiées en pointillé) : a) station S4 (1,2 m) ; b) station S5 (1,2 m) ; c) station S6 (1,2 m) ; d) station S7 (0,4 m)

Pour les trois recouvrements isolants partiels de 1,2 m (stations S4, S5 et S6; Figure 6-1a, b et c), l'évolution de la température est similaire. Au mois de juillet et août 2011, la température est supérieure à 0°C sur toute l'épaisseur du recouvrement. En septembre, la température du recouvrement diminue à des valeurs proches de 0°C sur toute l'épaisseur. Le gel progresse du haut du recouvrement vers le bas, pour atteindre une température proche de 0°C sur toute l'épaisseur du recouvrement à partir du mois d'octobre; la température moyenne mensuelle à la hauteur 10 cm (i.e. 10 cm au-dessus de l'interface résidus-recouvrement) au mois d'octobre est de 0,0°C. D'octobre 2011 jusqu'à mai 2012, le recouvrement est gelé sur toute son épaisseur; une température minimale de -14,1°C, -15,0°C (interpolé) et de -15,6°C est atteinte à 10 cm de l'interface résidus-recouvrement pour les trois recouvrements (S4, S5 et S6). À partir du mois de juin 2012, le gravier dégèle à partir de la surface jusqu'à 60 cm de profondeur, tandis que la 2e moitié du recouvrement est encore gelée. En juillet 2012, le front de dégel atteint environ 1,10 m, avec une température dans le recouvrement à la hauteur 10 cm de -0,3°C, 0,0°C (interpolée) et -0,4°C pour S4, S5 et S6 respectivement. En comparaison, la base du recouvrement de 1,2 m est encore gelée en juillet tandis que celle de 0,4 m a déjà atteint une température de 5,5°C.

Pour le recouvrement partiel de 0,4 m à la station S7 (Figure 6-1d), le front de gel commence à progresser en surface du recouvrement au mois de septembre 2011. À partir du mois d'octobre 2011, les 40 cm de recouvrement sont gelés avec une température de -1,1°C à la hauteur 10 cm. La température du recouvrement passe au-dessus de 0°C à partir du mois de juin 2012 sur les 30 cm à partir de la surface et en juillet 2012 le recouvrement est complètement dégelé. La température maximale à 10 cm au-dessus de l'interface des résidus-recouvrement est de 5,5°C.

L'ajout du recouvrement partiel de 0,4 m et 1,2 m retarde la période de gel à l'automne et le dégel au printemps. C'est ce qui est montré à la Figure 6-2, où l'évolution dans le temps de la température dans les résidus non recouverts à une profondeur de 5 cm sous la surface des résidus est comparée avec celle des résidus avec recouvrement de 0,4 m et 1,2 m. Les températures cibles de -2°C et -6°C identifiées au chapitre 5 sont également présentées sur la figure. La période de dégel des résidus (T > 0°C) non recouverts commence le 3 juin 2012 et se termine le 30 septembre 2012, tandis que celle des résidus avec recouvrement de 0,4 m (S7) commence le 22 juin 2012 et se termine le 24 octobre 2011. Le recouvrement de 0,4 m provoque donc un décalage d'environ 1 mois de la période de gel et de dégel. Également, la température maximale atteinte par les résidus est de 7,0°C avec le recouvrement de 0,4 m versus 25,2°C sans recouvrement

(station S3). On observe que le recouvrement de 1,2 m permet de maintenir la température des résidus proche de 0°C toute l'année. Si on exclut la période de mise en place, la température maximale atteinte par les résidus est de 1,4°C le 2 septembre à la station S4. Il y aurait potentiellement une courte période où la température des résidus est supérieure à 0°C, vers le mois de septembre. Le recouvrement de 1,2 m diminue la température maximale des résidus (1,4°C, S4) par rapport aux résidus non recouverts (25,2°C, S3).

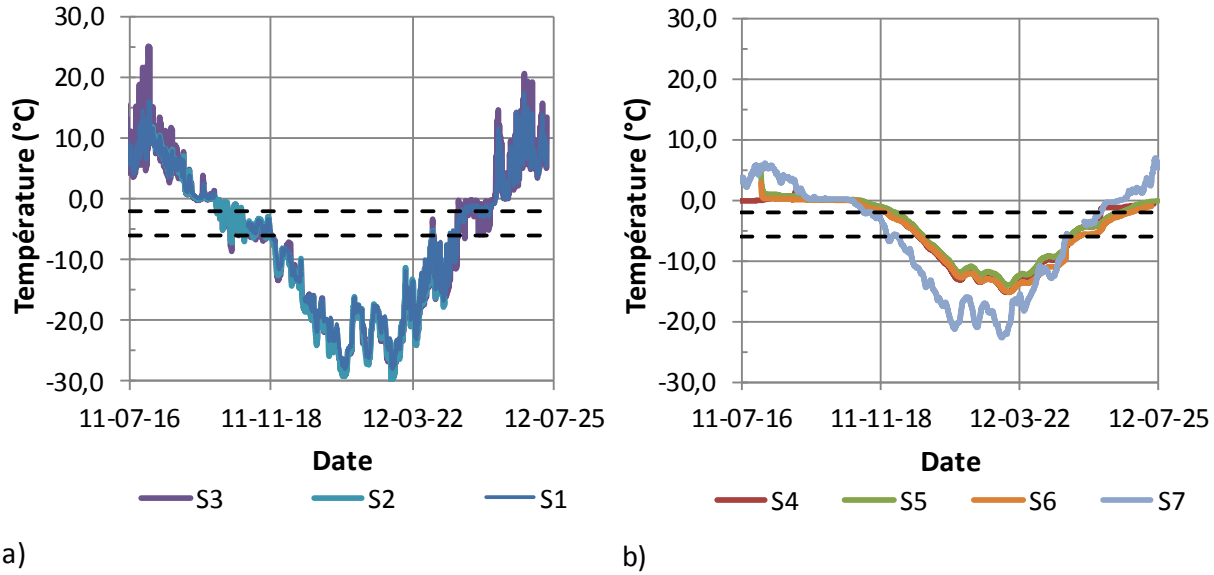


Figure 6-2 : Distribution de température dans les résidus à une profondeur de 5 cm sous la surface des résidus (avec les températures cibles de -2 et -6°C identifiées en pointillé) : a) stations non recouvertes ; b) stations avec recouvrement (0,4 m et 1,2 m)

Les recouvrements de 0,4 m et de 1,2 m permettent d'isoler les résidus du dégel annuel en diminuant la température maximale des résidus à 7°C et 1,4°C respectivement. Par contre, du point de vue de la génération de DMA, une température de 0°C n'est pas suffisante pour empêcher l'oxydation des sulfures de se produire, tel que mentionné au chapitre 5. Dans le cas particulier des résidus du Mine Raglan, des températures entre -2°C et -6°C doivent être maintenues afin de contrôler la réaction d'oxydation des minéraux sulfureux. L'efficacité des recouvrements partiels à limiter l'oxydation des résidus sera abordée plus loin dans ce chapitre.

6.1.2 Profil de teneur en eau volumique dans les recouvrements isolants partiels

Le degré de saturation des résidus et du recouvrement peut influencer la réactivité des résidus. À un degré de saturation supérieur à 85%, la diffusion de l'oxygène est faible et limite l'oxydation des sulfures (e.g. Demers et al., 2009; Ouangrawa et al., 2010). Ainsi, le degré de saturation des recouvrements partiels de 0,4 et 1,2 m pourrait influencer l'oxydation des résidus. La Figure 6-3 présente la teneur en eau volumique non gelée (θ_u) moyenne mensuelle à différentes hauteurs dans le recouvrement et dans les résidus pour les stations S4 à S7 de juillet 2011 à juillet 2012. On observe que les valeurs de θ_u dans le gravier sont inférieures à 0,10 pour toutes les stations, correspondant à un degré de saturation de 40% pour une porosité de 0,25. Selon la courbe de rétention d'eau présentée à la section 4.2.3, la teneur en eau volumique résiduelle (θ_r) du gravier est de 0,02 à une succion de 70 cm. À des valeurs de $\theta_u < 0,10$, le matériel se rapproche de cette teneur en eau volumique résiduelle. Ainsi, les recouvrements isolants partiels de 0,4 et 1,2 m sont la majorité du temps non saturés avec des degrés de saturation inférieurs à 40%, permettant ainsi la diffusion de l'oxygène vers les résidus miniers. De plus, le degré de saturation dans le recouvrement est suffisamment faible pour que le changement de l'eau en glace lors de la période hivernale n'empêche pas la diffusion de l'oxygène au travers du recouvrement. Une augmentation de volume de 9% survient lors du changement de l'eau en glace. Pour un degré de saturation de 40%, cela correspond à une augmentation du degré de saturation à 42%, ce qui n'influence pas la diffusion de l'oxygène dans le recouvrement de façon importante. Ainsi, les recouvrements partiels installés à Mine Raglan sont essentiellement des couvertures isolantes (vu l'épaisseur de la couche de matériel), et non des barrières à l'infiltration d'eau et à la migration de l'oxygène.

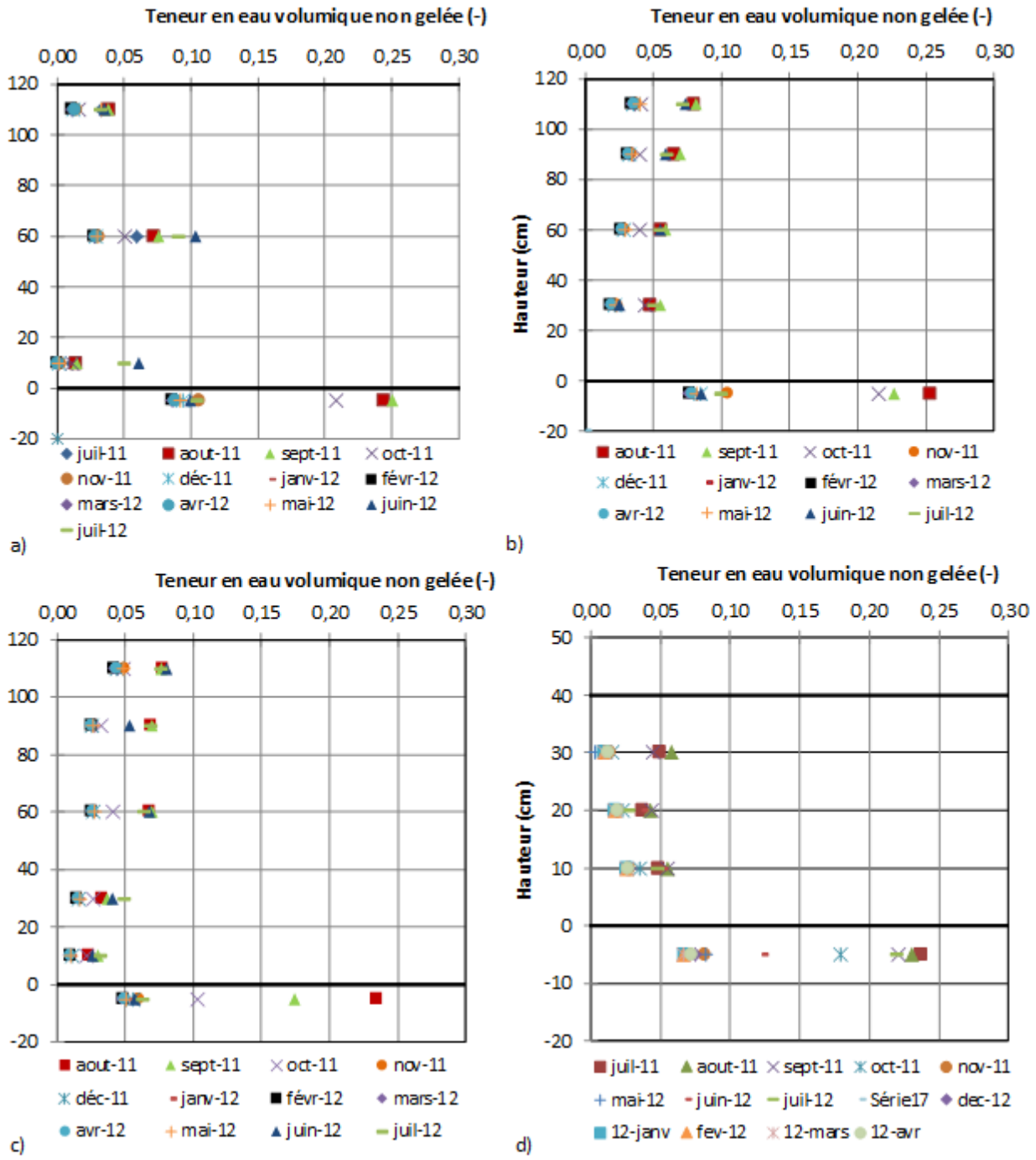


Figure 6-3 : Profil de la teneur en eau volumique non gelée dans les recouvrements isolants partiels : a) station S4 (1,2 m) ; b) station S5 (1,2 m) ; c) station S6 (1,2 m) ; d) station S7 (0,4 m)

6.2 Propriété *in situ* des matériaux

Avec les mesures prises lors du projet, il est possible d'obtenir des informations supplémentaires au niveau des propriétés hydrogéologiques et thermiques des matériaux. Par exemple, il est possible de tracer la courbe de gel (θ_u-T) des résidus et du matériel de recouvrement. De plus, à partir de la courbe de gel, on peut calculer une courbe de rétention d'eau (appelé courbe caractéristique de gel), qui relie la succion à la teneur en eau volumique non gelée. Finalement, une courbe de rétention d'eau des matériaux à partir des mesures *in situ* de succion et de teneur en eau volumique peut être tracée.

6.2.1 Courbe de gel

Les courbes de gel des résidus sont présentées à la Figure 6-4 pour les stations avec et sans recouvrement. En général, excepté pour la station S1, la teneur en eau volumique diminue rapidement à 0°C et se stabilise à une température autour de -5°C.

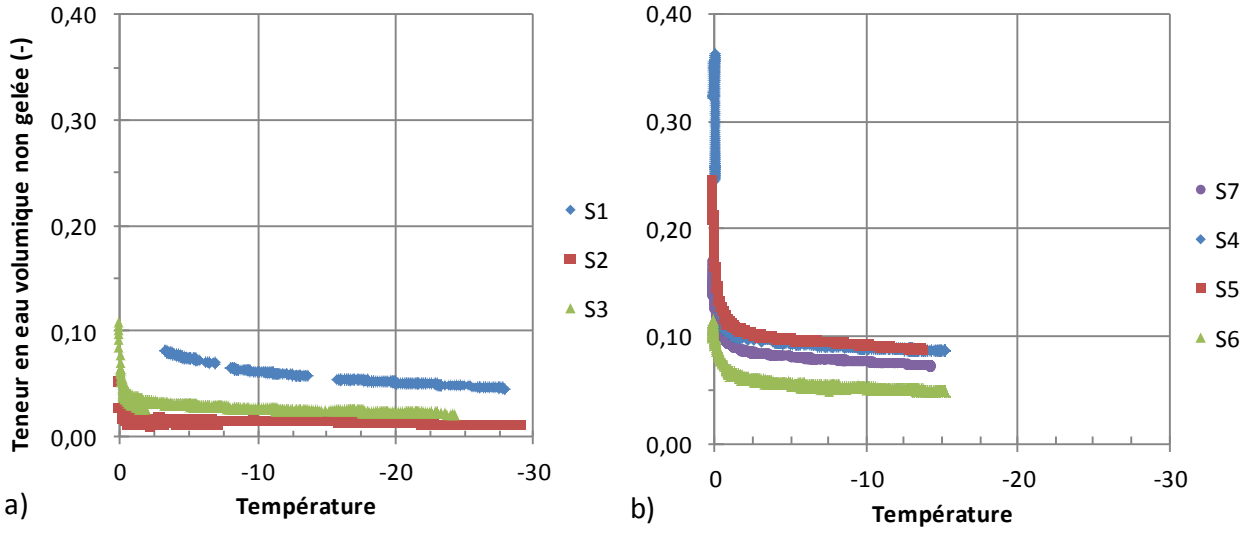


Figure 6-4 : Courbes de gel des résidus : a) résidus non couverts aux stations S1 à S3 ; b) résidus couverts de 1,2 m (S4 à S6) et de 0,4 m (S7)

Les teneurs en eau volumique non gelées minimales sont plus élevées pour les résidus avec recouvrement ($0{,}05 < \theta_u < 0{,}08$) que pour les résidus non recouverts ($0{,}01 < \theta_u < 0{,}05$). Cela pourrait s'expliquer par le fait que la zone non recouverte est davantage exposée à l'évaporation que la zone couverte. En effet, la succion est plus élevée dans les résidus non recouverts (8 kPa < ψ < 112 kPa) que dans les résidus avec recouvrement de 1,2 m et 0,4 m (9,9 kPa < ψ < 27 kPa).

De plus, des courbes de gel établies pour les résidus à 5 cm, 15 cm et 25 cm de profondeur sous la surface à la station S2 montre que la teneur en eau volumique non gelée augmente avec la profondeur, ce qui est également observé pour les stations non couvertes S1 et S3 (résultats non montrés ici). L'évaporation semble donc contribuer à diminuer la teneur en eau volumique non gelée des résidus en surface.

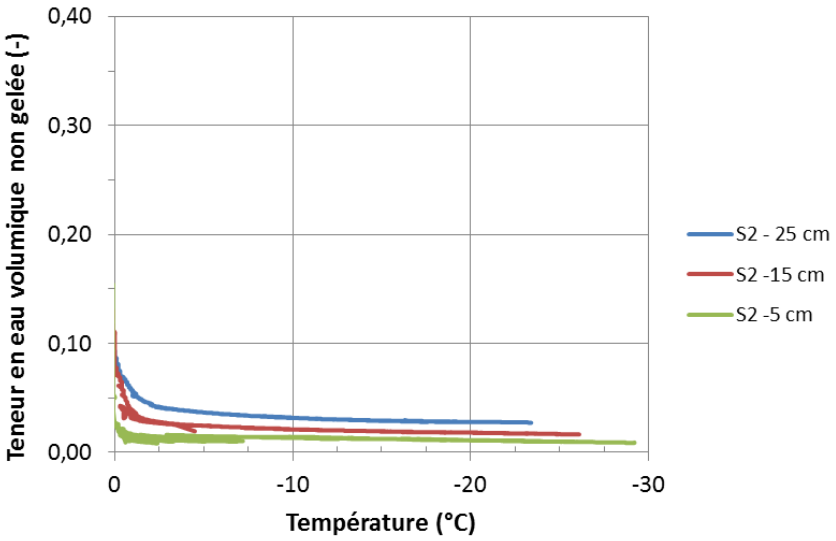


Figure 6-5 : Courbe de gel des résidus à la station S2 à des profondeurs de -5, -15 et -25 cm sous la surface des résidus

Les courbes de gel de la Figure 6-4 ont une forme similaire à ce que l'on peut retrouver dans la littérature. Des teneurs en eau volumique non gelées de 0,10 ont été mesurées dans des résidus miniers à des températures de -10°C (Elberling, 2001), ce qui correspond à peu près aux valeurs de 0,08 mesurées aux stations S4, S5 et S7. Aussi, des valeurs de 0,05 à des températures inférieures à -3°C ont été mesurées dans des résidus miniers (MEND, 1998). De son côté, Watanabe (2011) a trouvé que la majorité de l'eau dans un sable gèle à -1 °C, tandis qu'un loam et un loam silteux (matériaux ayant une certaine similarité avec les résidus miniers) garde une teneur en eau volumique non gelée d'environ 0,10, même à des températures de -20°C (Watanabe et al., 2011). Une étude sur l'abaissement du point de congélation dans les résidus de Mine Raglan mentionne que pour atteindre une teneur en eau non gelée de 0,10 à 0,15 dans les résidus, une température entre -1,3°C et -3,4°C serait nécessaire pour une salinité de 28 g/L et entre -5,0°C et -7,6°C pour une salinité de 80 g/L (EcoMetrix, 2008). La salinité totale des résidus en place est évaluée à entre 30 à 40 g/L (SNC Lavalin, 2009). Une teneur en eau non gelée

inférieure à 0,10 est atteinte à -1,4°C pour toutes les stations (Figure 6-4), ce qui concordent bien avec ce qui a été proposé pour les résidus de Mine Raglan avec une salinité de 28 g/L.

La Figure 6-6 présente des courbes de gel pour le matériel de recouvrement 0-20 mm de la station S5 à différentes élévations. Ces courbes de gel sont typiques de celles qui sont retrouvées aux autres stations de mesure S4, S6 et S7. L'eau gèle rapidement pour atteindre des valeurs de teneur en eau volumique non gelée entre 0,02 et 0,04 à partir d'une température de -2,5°C. La distribution granulométrique du gravier 0-20 mm est étalée et contient un minimum de 6% de particules fines de diamètre inférieur à 80 µm, ce qui explique principalement les teneurs en eau volumiques non gelées de l'ordre de 0,01 à 0,04 observées. La distribution granulométrique assez différente pour les stations S4 à S7, avec des proportions de fines variant entre 6% et 14,5%, peut expliquer les différences dans les courbes de gel (voir Figure 4-6). Également, rappelons que la limite de précision de la sonde (±0,02) peut aussi être en partie responsable des variations observées entre les points de mesure.

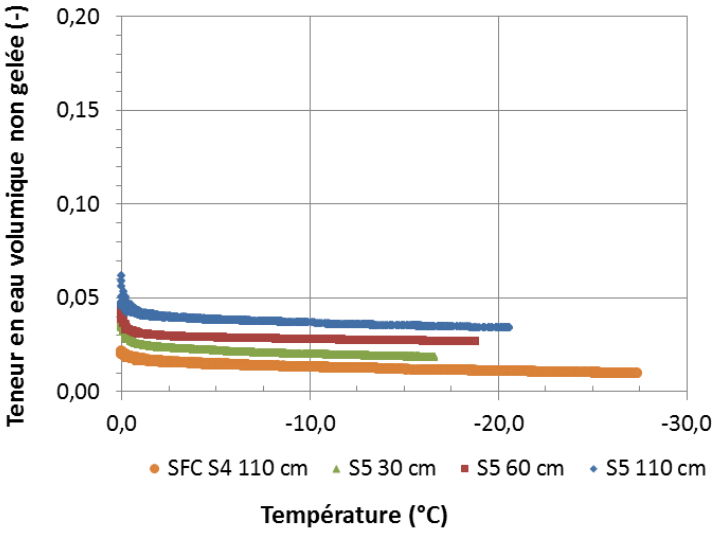


Figure 6-6 : Courbes de gel typiques du gravier (station S5 à 30 cm, 60 cm et 110 cm de hauteur dans le recouvrement au-dessus des résidus miniers et station S4 à 110 cm au-dessus des résidus miniers)

6.2.2 Comparaison des courbes de rétention d'eau *in situ* et en laboratoire

Il existe différentes options pour déduire la courbe de rétention d'eau (CRE) *in situ*. Tout d'abord, il est possible d'évaluer les courbes de rétention d'eau à partir de la courbe de gel. Les

couples de point θ-ψ mesurés sur le terrain peuvent également être placés dans un graphique et lissés avec un modèle descriptif de la CRE.

Courbe caractéristique de gel

A partir de la courbe de gel, il est possible de calculer une courbe de rétention d'eau appelée la courbe caractéristique de gel (SFCC) (Koopmans et Miller, 1966; Spaans et Baker, 1996). Pour ce faire, l'équation de Clapeyron sous sa forme intégrale est utilisée pour obtenir la succion dans le sol en cours de gel à partir de la température du sol. L'équation utilisée est la suivante :

$$\psi = \rho_w L_f ln \frac{T}{273.15} \qquad [6.1]$$

où L_f est la chaleur latente de fusion et T est la température (K). Les courbes de rétention d'eau calculées avec l'équation 6.1 sont présentées à la Figure 6-7 pour les résidus aux stations non recouvertes en a) et avec recouvrement (0,4 m et 1,2 m) en b). Pour les résidus non recouverts, la courbe caractéristique de gel a été obtenue à partir des données en dégel, donnant accès à des valeurs de teneurs en eau volumiques plus élevées, notamment au niveau de la station S3. Les données de la période de dégel n'étant pas disponibles pour les stations avec recouvrement, la période de gel a été utilisée pour calculer la CRE.

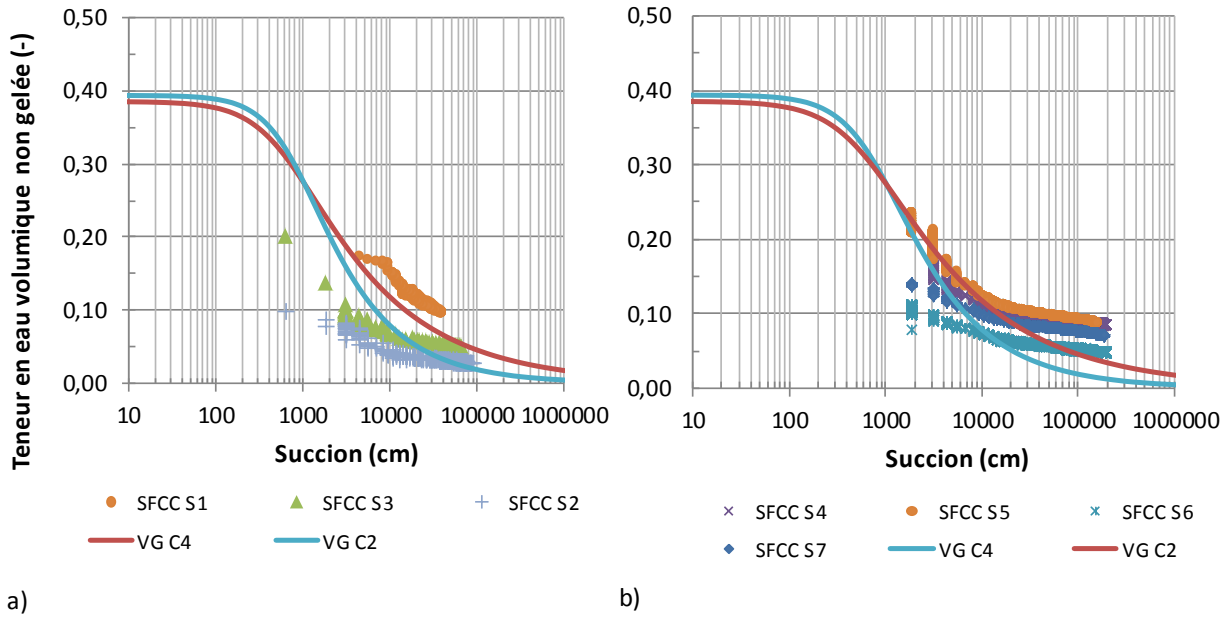


Figure 6-7 : Courbes caractéristiques de gel pour les résidus comparées à la CRE obtenue au laboratoire lissée avec le modèle de VG et avec le modèle de MK; a) non couverts ; b) couverts (0,4 m et 1,2 m)

En général, les courbes caractéristiques de gel obtenues concordent assez bien avec les courbes de rétention d'eau mesurées au laboratoire. Les teneurs en eau volumique non gelées résiduelles pour les stations S2 et S3 concordent bien à la valeur trouvée en laboratoire. Pour les autres stations, les valeurs résiduelles trouvées avec le SFCC sont légèrement supérieures à la teneur en eau volumique résiduelle de laboratoire. Des phénomènes d'hystérésis pour le gel et dégel ont été rapportés dans la littérature pour les courbes caractéristiques de gel (Koopmans et Miller, 1966; Spaans et Baker, 1996), comme observé lors des cycles de drainage et de mouillage pour la courbe de rétention d'eau. Ainsi le phénomène d'hystérésis pourrait également expliquer les différences observées entre la courbe de rétention d'eau obtenue au laboratoire et les courbes caractéristiques de gel obtenues sur le terrain. Également, les différences entre la porosité et la distribution granulométrique des résidus sur le terrain et celles en place lors de l'essai à la cellule de pression en laboratoire, pourrait expliquer une partie des différences observées. Tout compte fait, considérant la précision de la sonde 5TM (±0,02), l'équation 6.1 semble une bonne alternative pour calculer la CRE des résidus miniers pour des valeurs de succion supérieures à $1x10^3$ cm.

Des courbes de rétention d'eau ont également été tracées à l'aide de l'équation 6.1 pour le gravier et sont présentés à la Figure 6-8.

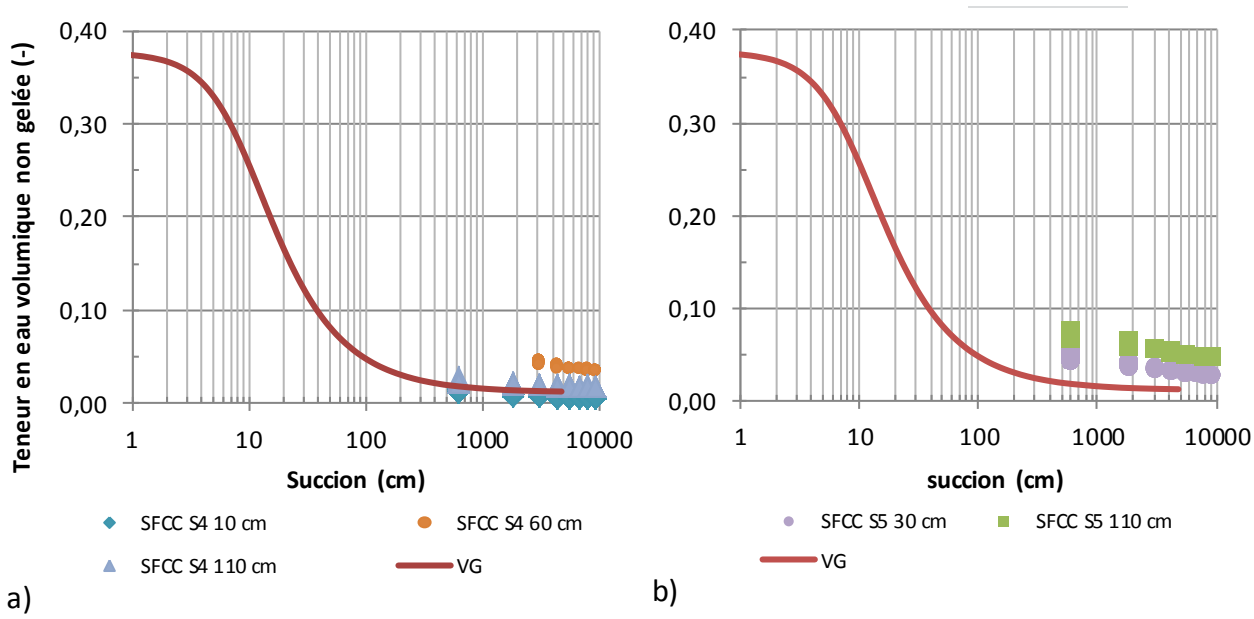


Figure 6-8 : Courbe caractéristique de gel et courbe de rétention d'eau mesurés en laboratoire pour le gravier 0-20 mm : a) station S4 ; b) station S5

Les résultats des stations S4 et S5 représente des cas typiques pour le gravier. La période de gel a été utilisée pour tracer les courbes. Une bonne concordance entre les courbes caractéristiques de gel et la courbe de rétention d'eau obtenues au laboratoire est observée pour des succions supérieures à 500 cm. Les teneurs en eau volumique résiduelles sont parfois légèrement supérieures ou inférieures à la courbe de laboratoire, ce qui peut être expliqué par l'hétérogénéité du gravier 0-20 mm retrouvée sur le terrain (voir distribution granulométrique de gravier à la Figure 4-6). Comme on est en présence d'un matériau grossier, les effets d'hystérésis sont moins présents (Maqsoud et al., 2012). De manière générale, les courbes de rétention d'eau et les courbes caractéristiques de gel concordent assez bien pour le gravier, pour la fin de la courbe de rétention d'eau.

Courbe de rétention d'eau à partir des données de terrain

Les courbes de rétention d'eau obtenues à partir des données mesurées sur le terrain sont présentées aux Figure 6-9 et 6-10 pour le gravier et les résidus miniers respectivement. Pour tracer les courbes de rétention d'eau de terrain, quelques couples de teneur en eau volumique non gelée et de succion ont été sélectionnés pour chaque station.

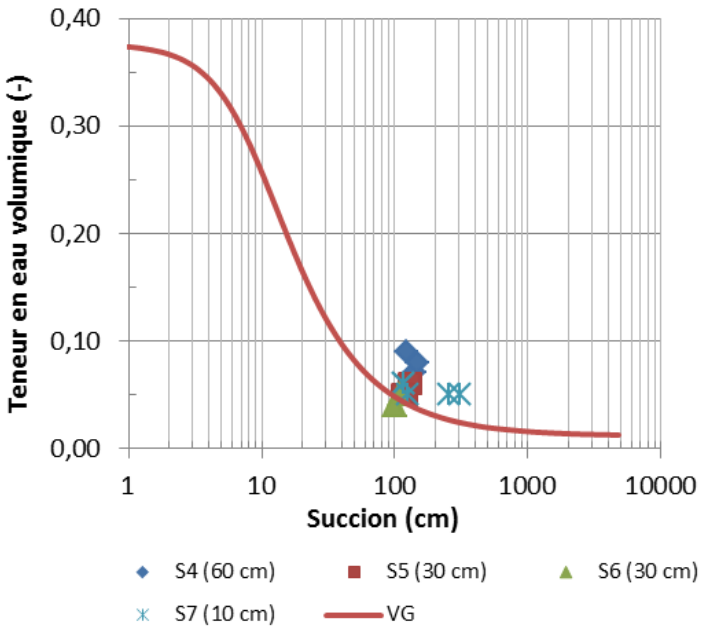


Figure 6-9 : Courbe de rétention d'eau de terrain pour le gravier aux stations S4 à S7 et courbe de laboratoire (VG)

Les couples ont été sélectionnées durant les mois de juillet 2011 et d'août 2011, lorsque la température des résidus est supérieure à 0°C et que l'eau interstitielle est complètement dégelée (seul période où le senseur de succion est fonctionnel). Pour le gravier, peu de points sont disponibles pour tracer la CRE car il est en condition drainé la majorité du temps sur le terrain. A partir de données disponibles, on constate que les résultats de terrain concordent assez bien avec la CRE obtenue en laboratoire. Au niveau des résidus miniers, les données de terrain sont plus éloignées de la CRE obtenues en laboratoire. Les succions mesurées sur le terrain sont de l'ordre de 100 à 1000 cm, pour des teneurs en eau volumique non gelées entre 0,18 et 0,32. Selon les valeurs de laboratoire, les succions correspondant à ces valeurs de teneur en eau volumique sont plutôt dans l'ordre de 700 et 1000 cm. Une partie de la différence peut provenir de la précision de la sonde MPS-1 de ± 50 cm pour des lectures entre 100 et 500 cm. Également, cette différence pourrait s'expliquer par les phénomènes d'hystérésis qui pourraient être présents dans le matériau (Maqsoud et al., 2006). Pour une succion donnée, la teneur en eau volumique est plus faible durant le mouillage, par exemple en infiltration, que durant le drainage. Par conséquence, la valeur de teneur en eau volumique pour une succion donnée est aussi fonction des conditions initiales du sol.

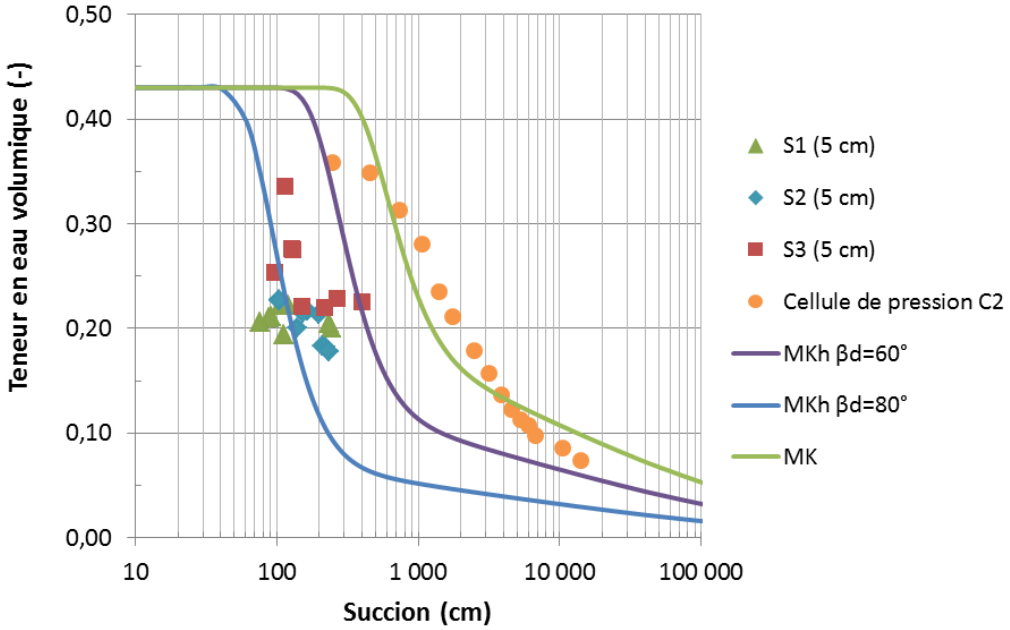


Figure 6-10 : Courbes de rétention d'eau de terrain pour les résidus miniers aux stations S1 à S3 et courbes prédites par MK et MK_h (β_d = 60° et β_d = 80°)

La Figure 6-10 présente quelques données de θ_u et de ψ typiques retrouvées sur le terrain, les résultats de laboratoire pour la cellule de pression C2, la prédiction avec le modèle MK et celle avec le modèle MK_h (voir section 2.4.1) prenant en compte l'effet d'hystérésis pour un angle de contact de 60° et 80°. Le modèle MK permet d'assez bien prédire la courbe de rétention d'eau obtenue au laboratoire. De plus, la courbe de rétention d'eau avec hystérésis avec un angle de contact entre 60° et 80° représente bien les données retrouvées sur le terrain. Ainsi, l'effet d'hystérésis pourrait expliquer la différence entre les données de laboratoire et celle de terrain.

6.3 Efficacité des recouvrements isolants partiels

Maintenant qu'une température cible pour limiter l'oxydation des résidus miniers, entre -2°C et -6°C, a été proposée au chapitre précédent et que les mécanismes contrôlant l'oxydation sont mieux connus, la performance des recouvrements partiels de 0,4 m et 1,2 m à contrôler l'oxydation des sulfures sera évaluée avec la méthode par profil de température et par test de consommation d'oxygène, tel que présenté au chapitre 2.

6.3.1 Méthode par profil de température

Le chapitre précédent a montré que la température influence les flux d'oxygène (ou la réactivité) à la surface des résidus miniers de Mine Raglan. Le recouvrement va influencer la durée de la période d'oxydation ainsi que l'intensité de cette période. La durée de la période d'oxydation sera évaluée en posant comme hypothèse que l'oxydation est négligeable sous des températures cibles de -2°C et -6°C, identifiées au chapitre 5. L'intensité de la période d'oxydation sera évaluée sur la base des critères de température de 1°C et de 6°C. Ces périodes ont été déterminées à partir des données de la Figure 5-14 où l'effet de la température sur la réactivité des résidus a été présenté. À partir de 1°C, des flux de l'ordre de 100 moles·m^{-2}·an^{-1} sont interpolés et à partir de 6°C, le flux augmente à des valeurs supérieures à 250 moles·m^{-2}·an^{-1}. Au niveau de la durée de la période d'oxydation, le nombre de jours où la température des résidus est inférieure à -2°C et -6°C a été comptabilisé et est présenté au Tableau 6.1. La station S2 n'est pas présentée puisqu'il manque des données durant la période où la température des résidus est inférieure à 0°C. Le nombre de jours a été comptabilisé en additionnant toutes les heures où la température des résidus était inférieure ou supérieure aux critères de température définis et transformé en jours et ensuite en pourcentage annuel.

Tableau 6.1 : Évaluation de la performance des recouvrements à limiter l'oxydation des résidus basés sur la durée et l'intensité de la période d'oxydation

	Critère d'évaluation		S1	S3	S4	S5	S6	S7
Durée de la période d'oxydation	T < -6°C	jours	161 [1]	168	138	131	142	171
		% de l'année	44	46	38	36	39	47
	T <-2°C	jours	210 [1]	213	192	201	216	210
		% de l'année	58	58	53	55	59	58
Durée de la période oxydation selon l'intensité	T > 1°C (faible - moyenne)	jours	106 [1]	96	1	2	0	85
		% de l'année	29	26	0	1	0	23
	T > 6°C (élevée)	jours	56 [1]	60	0	0	0	4
		% de l'année	15	16	0	0	0	1
	T_{max} (°C)		17,5	25,2	1,4	1,7	0,7	7,0
	T_{min} (°C)		-28,0	-28,9	-15,2	-14,0	-15,2	-22,7

[1] données à 15 cm de profondeur dans les résidus

La température des résidus est inférieure à -2°C pour 58% de l'année pour les résidus non recouverts, entre 53 et 59% de l'année pour les résidus avec recouvrement de 1,2 m et 58% de l'année pour les résidus avec recouvrement de 0,4 m. Donc l'ajout d'un recouvrement de 0,4 m et de 1,2 m ne modifie pas la période où la température dans les résidus est inférieure à la température cible de -2°C. Lorsque l'on se base sur le critère de -6°C, la température des résidus est inférieure à cet objectif entre 44 et 46% de l'année pour les résidus non recouverts, entre 36 et 39% de l'année pour les résidus avec recouvrement de 1,2 m et 47% de l'année pour les résidus avec recouvrement de 0,4 m. Le recouvrement de 1,2 m isole les résidus et ne permet pas aux résidus de refroidir autant qu'avec un recouvrement de 0,4 m ou sans recouvrement. A partir de ces données, on peut conclure que l'ajout du recouvrement partiel de 0,4 m et 1,2 m ne permet pas une diminution significative de la durée de la période où l'oxydation est négligeable. Il peut même l'allonger dans le cas du recouvrement de 1,2 m pour une température cible de -6°C. Ainsi, les recouvrements partiels de 0,4 m et de 1,2 m auront comme effet principal de décaler la période où l'oxydation est présente.

Basé sur la température cible, les recouvrements n'ont pas une influence significative sur la durée de la période où les résidus sont peu ou pas réactifs. Les recouvrements peuvent par contre influencer la période où l'intensité de l'oxydation des résidus est maximale. Le Tableau 6.1 présente le nombre de jours où la température est supérieure à 1°C et 6°C ainsi que les températures maximales et minimales mesurées dans les résidus à 5 cm de profondeur. La température maximale atteinte dans les résidus à 5 cm de profondeur est de 7°C pour le

recouvrement de 0,4 m, de 1,4°C pour le recouvrement de 1,2 m et de 25,2°C pour les résidus non recouverts. La période où l'oxydation est maximale sera donc réduite pour les cas avec recouvrements par rapport au cas sans recouvrement. C'est d'ailleurs ce qui a été observé avec les tests de consommation d'oxygène (voir section 5.2) avec un flux maximal mesuré de de 544, 191 et 125 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les résidus non recouverts, pour ceux avec recouvrement de 0,4 m et ceux avec recouvrement de 1,2 m respectivement.

Les résidus des stations avec recouvrement de 1,2 m restent sous une température de 1°C toute l'année, tandis que cette température est dépassée pour 23% de l'année pour les résidus placés sous un recouvrement de 0,4 m et entre 26% et 29% de l'année pour les résidus non recouverts. Pour ce qui est du pourcentage de l'année où la température des résidus est supérieure à 6°C, il est de 1% pour les résidus de la station avec recouvrement de 0,4 m, de 0% pour les résidus des stations avec recouvrement de 1,2 m et il varie entre 15 et 16% pour les résidus non recouverts.

En résumé, le recouvrement de 1,2 m ne permet pas d'augmenter de façon significative la période où les résidus sont considérés comme non réactifs, mais permet de réduire la durée des périodes où les résidus sont très réactifs. Le recouvrement de 0,4 m fait un peu le même travail que celui de 1,2 m, mais avec une ampleur moindre.

6.3.2 Méthode par tests de consommation d'oxygène

Le flux d'oxygène mesuré avec le test de consommation d'oxygène peut servir d'indicateur de performance pour évaluer l'efficacité des recouvrements de 0,4 m et 1,2 m à contrôler la réactivité des résidus miniers. L'équation 6.2 est utilisée pour quantifier l'efficacité des recouvrements à partir des flux d'oxygène mesurés.

$$E(\%) = \left(1 - \frac{F_{L,couvert}}{F_{L,non\ covert}}\right) \times 100 \qquad [6.2]$$

Pour évaluer l'efficacité globale, on utilise le flux d'oxygène annuel moyen. Le Tableau 6.2 présente les flux d'oxygène utilisés pour faire le calcul de la moyenne annuelle avec l'incertitude de la valeur provenant de la variabilité du test de consommation d'oxygène estimée à ± 35% (voir section 4.2.6). Les tirets indiquent qu'aucun test de CO n'a été mené à cette période de l'année. Le flux d'oxygène est considéré de 0 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les stations S1 à S3 et S7 le 20 décembre 2011 pour le calcul de la moyenne. Cette valeur n'a pas été mesurée avec un test de

consommation d'oxygène, mais il est raisonnable de poser cette hypothèse car la température des résidus le 20 décembre 2011 est de -13°C pour les stations S1 à S3 et de -11°C pour la station S7, ce qui laisse croire que l'oxydation est nulle (voir Figure 5-16). Les données en gris (18 mai 2012) ne sont pas utilisées dans le calcul de la moyenne puisqu'il n'y a pas de résultats de flux d'oxygène disponible à cette date pour les résidus non recouverts. Le flux d'oxygène moyen de la station S4 est fortement supérieur à celui des stations S5 et S6. Vu son comportement particulier, il a été décidé de ne pas l'inclure dans l'analyse de l'efficacité du recouvrement isolant partiel.

Tableau 6.2 : Flux d'oxygène utilisés pour le calcul de la moyenne annuelle

	Flux d'oxygène (moles·m^{-2}·an^{-1})										
Date	11-07-28	11-08-31	11-09-22	11-09-26	11-10-30	11-12-20	12-05-18	12-06-20	12-07-18	F_L moyen	n
S1	101	33	59	27	0	0	-	227	240	86	8
S2	-	299	312	247	7	0	-	195	389	207	7
S3	544	157	165	28	6	0	-	259	378	192	8
S4	22	20	80	43	465	128	160	525	422	213	8
S5	22	4	19	20	68	8	22	19	15	22	8
S6	44	130	125	134	84	21	15	28	37	75	8
S7	83	20	24	131	13	0	-	-	191	66	7

Il a été montré à la section 5.5 que le flux d'oxygène montre une grande variabilité spatiale, causée entre autre par les hétérogénéités géochimiques (% sulfure, phénomène de passivation, etc.). Ainsi, l'efficacité du recouvrement n'est pas le même à tous les endroits sur le parc à résidus. De plus, il a été mentionné à la section 6.1.1 que le recouvrement de 0,4 m et de 1,2 m retarde la période d'oxydation pour les résidus non recouverts. Ainsi, on peut penser que l'effet bénéfique du recouvrement sera différent selon la période de l'année.

Variabilité spatiale de l'efficacité du recouvrement

À partir des flux moyens par station, l'efficacité du recouvrement partiel est calculée pour les différentes combinaisons possibles de stations avec ou sans recouvrement, comme il est montré au Tableau 6.3. L'efficacité moyenne du recouvrement partiel de 1,2 m calculée à partir des moyennes de flux annuel est de 65 ± 25%. On remarque que le recouvrement partiel à la station S5 est plus efficace (74% < E(%) < 89%) versus celui de la station S6 (13% < E(%) < 64%) même s'ils ont la même épaisseur (1,2 m). L'efficacité du recouvrement varie entre 13% et 89%, selon le couple de stations comparées, ce qui montre que l'effet du recouvrement de 1,2 m est variable d'un endroit à l'autre sur le même parc à résidus, comme expliqué à la section 5.5.

Tableau 6.3 : Efficacité du recouvrement de 0,4 m et 1,2 m à diminuer le flux d'oxygène basée sur la moyenne annuelle selon les différentes stations

		Non couverte			
	Efficacité (%)	**S1**	**S2**	**S3**	**Moyenne**
Couverte (1,2 m)	**S5**	74	89	89	84
	S6	13	64	61	46
Couverte (0,4 m)	**S7**	23	68	66	52

Pour le recouvrement de 0,4 m, on trouve une gamme d'efficacité variant entre 23% et 68%, pour une efficacité moyenne de 52 ± 18%.

L'efficacité du recouvrement de 1,2 m à Mine Raglan à diminuer le flux d'oxygène jusqu'aux résidus sulfureux avait été également évaluée par Garneau (2012). Ce dernier a trouvé une efficacité de 82,9 % à partir de valeurs moyennes de flux d'oxygène de 276 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les résidus non recouverts et de 47 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les résidus avec recouvrement d'une épaisseur de 1,2 m. Ce résultat concorde avec ce qui est trouvé dans les présents travaux, avec une efficacité moyenne annuelle mesurée de 65 ± 25%.

Variation annuelle de l'efficacité du recouvrement

Afin de voir la variation de l'efficacité du recouvrement de 1,2 m et de 0,4 m, on compare les flux d'oxygène mesuré pour les stations non couvertes versus les stations avec recouvrement au même moment dans l'année. Les flux mesurés aux stations S1 et S5 ainsi que ceux mesurés aux stations S2 et S6 sont comparés à la Figure 6-11 a) et b) respectivement. On remarque que l'évolution de l'efficacité suit la même tendance dans le temps pour les couples de station S1-S5 et S2-S6. Le recouvrement de 1,2 m a un effet bénéfique sur la réactivité du 31 août 2011 jusqu'à la fin septembre 2011. A partir du 30 octobre 2011, le recouvrement n'apporte plus d'effet bénéfique car la consommation d'oxygène est encore mesurable sous le recouvrement alors qu'elle ne l'est plus sur les résidus non recouverts. On estime que cela dure jusqu'en décembre, où les flux d'oxygène mesurés sous le recouvrement de 1,2 m aux stations S5 et S6 sont de 8 et 21 moles·m^{-2}·an^{-1} respectivement. Par contre, aucun test de CO n'a été mené à ce moment sur les résidus non couverts (le test est pratiquement impossible à réaliser aux températures observées à Mine Raglan à cette période de l'année) permettant de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. A partir du 20 juin, l'effet bénéfique du recouvrement apparaît de nouveau. Il semble y avoir une

période où les résidus sont davantage réactifs sous le recouvrement (par rapport aux résidus non recouverts), de la fin août à la fin septembre 2011 pour la station S6 et à la fin octobre pour S5. Cette période correspond avec la période où la température des résidus est supérieure ou égale à 0°C. En bref, le recouvrement de 1,2 m semble avoir globalement un effet bénéfique, à l'exception d'une période entre la fin septembre et la mi-décembre, où des flux d'oxygène allant jusqu'à des valeurs de 134 moles·m^{-2}·an^{-1} sont mesurés. Cette période correspond à environ 85 jours, soit 23% de l'année. L'efficacité du recouvrement semble augmenter en 2012 en comparaison avec 2011.

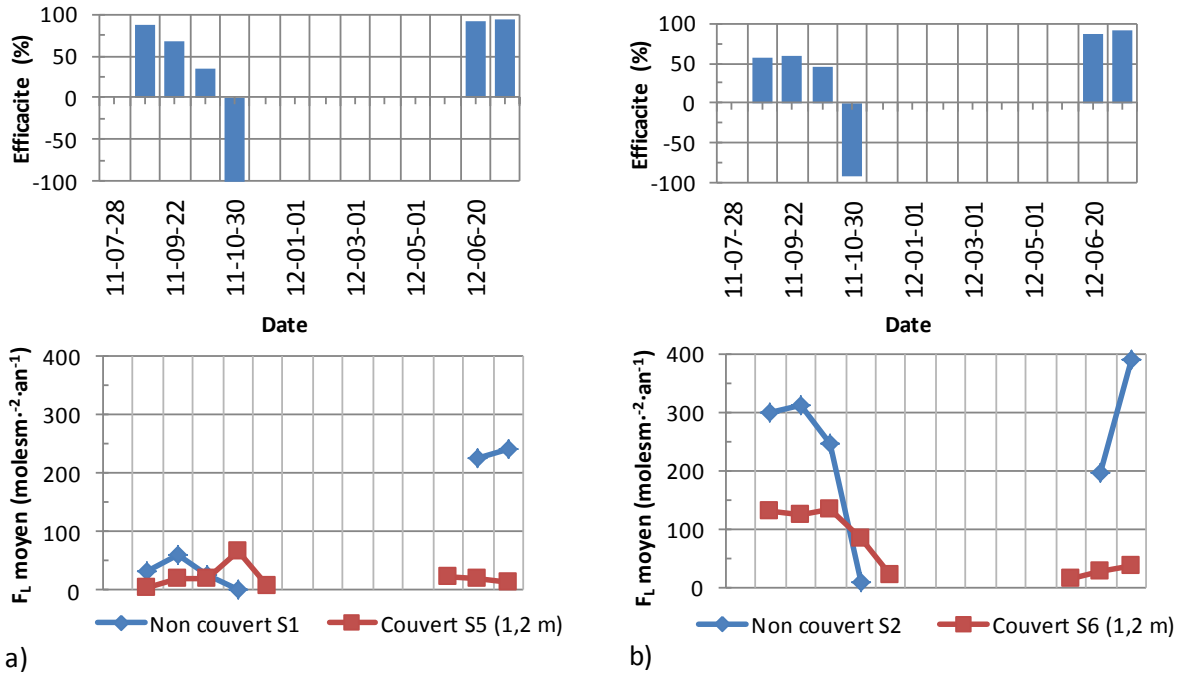


Figure 6-11 : Efficacité du recouvrement de 1,2 m à différente période de l'année ; a) comparaison entre station S1 et S5 ; b) comparaison entre station S2 et S6

Pour le recouvrement de 0,4 m, les flux d'oxygène mesurés aux stations S3 et S7 et ceux mesurés aux stations S2 et S7 sont comparés en a) et en b) respectivement à la Figure 6-11. Des flux d'oxygène entre 13 et 191 moles·m^{-2}·an^{-1} sont mesurés pour S7 versus des flux entre 7 et 439 moles·m^{-2}·an^{-1} et 6 et 544 moles·m^{-2}·an^{-1} pour S2 et S3. Le recouvrement de 0,4 m diminue la réactivité des résidus la majeure partie de l'année, à l'exception d'une période de fin septembre 2011 à fin octobre 2011 où des flux d'oxygène de 131 moles·m^{-2}·an^{-1} sont mesurés pour S7 versus 28 moles·m^{-2}·an^{-1} pour S3. Aucun test de CO n'a été mené entre le 30 octobre et le 20 juin

2012, ne permettant pas de voir l'effet du recouvrement sur le flux d'oxygène entre ces dates. En juillet 2012, l'efficacité du recouvrement de 0,4 m diminue en comparaison avec la même période de l'année en 2011. La mise en place de la station en 2011 a potentiellement modifiée le milieu et la réactivité mesurée des résidus. Il serait intéressant d'avoir plus de données afin de valider les résultats de l'année de mise en place.

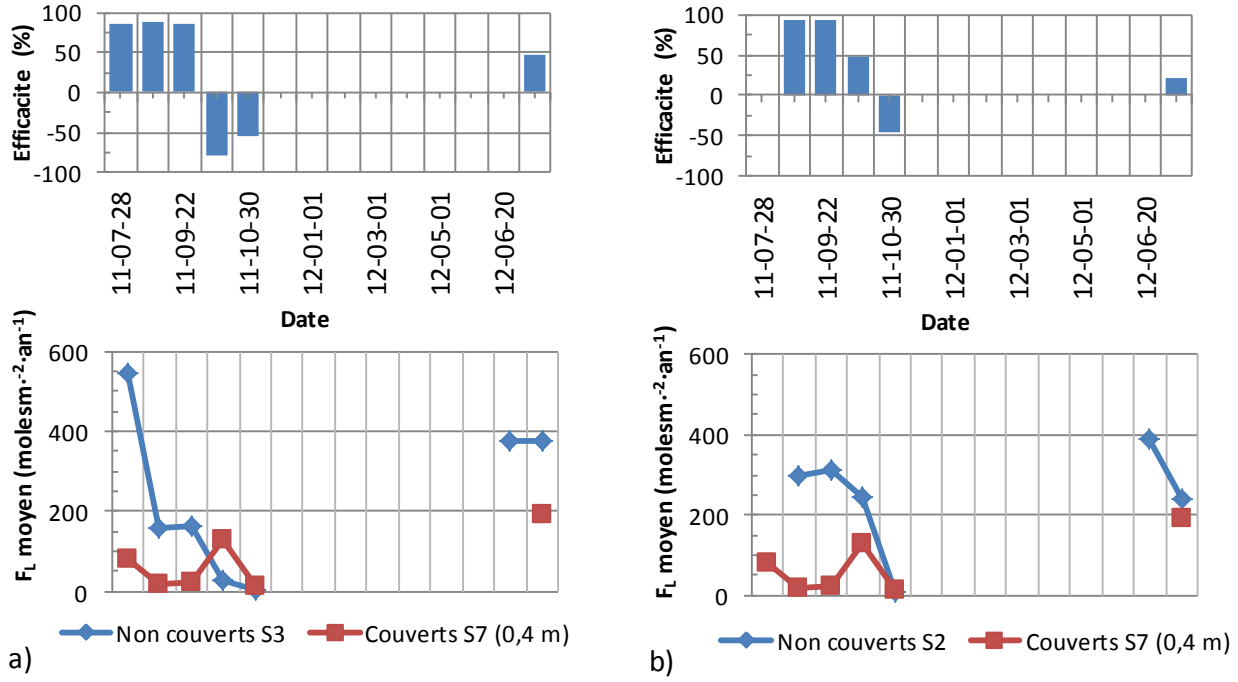


Figure 6-12 : Efficacité du recouvrement de 0,4 m à différente période de l'année ; a) comparaison entre station S3 et S7 ; b) comparaison entre station S2 et S7

6.4 Recouvrement final

Dans le cadre de ce projet, l'effet des recouvrements partiels de 0,4 m et de 1,2 m sur la réactivité des résidus a été étudié. Par contre, ces recouvrements sont temporaires et seront éventuellement complétés afin d'atteindre le scénario de recouvrement final de 2,4 m planifié pour la restauration du parc à résidus de Mine Raglan. La performance du scénario de restauration final proposé de 2,4 m est présentement étudiée *in situ* sur le parc à résidus de Mine Raglan à l'aide d'une parcelle expérimentale. A titre informatif, ces travaux sont brièvement présentés dans le but de compléter les informations présentées sur les recouvrements partiels.

Des parcelles expérimentales ont été construites en novembre 2011, au sud du parc à résidus de Mine Raglan, afin de comparer différents scénarios de restauration. Une de ces parcelles est construite afin de tester le recouvrement isolant de 2,4 m proposé par AMEC (2002). La parcelle expérimentale a une dimension de 10 m de largeur par 50 m de longueur. La cellule est située en partie (12 m) sur une portion quasi-horizontale du parc à résidus et une autre partie (27 m) sur une portion inclinée (5H :1V). Un schéma de la section longitudinale de la cellule est présenté à la Figure 6-13.

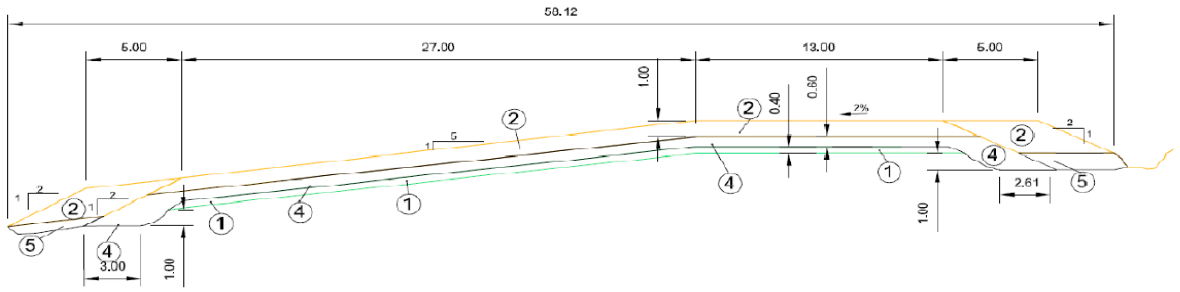


Figure 6-13 : Section longitudinale de la parcelle expérimentale construite sur le parc à résidus de Mine Raglan (communication personnelle, Mine Raglan)

Un programme d'instrumentation et de suivi a été mis sur pied afin de suivre les paramètres qui permettront d'évaluer l'efficacité des options testées et de choisir un scénario de restauration adéquat pour le site. Les principaux paramètres mesurés sont la température, la succion, la teneur en eau volumique, la teneur en oxygène et la qualité d'eau. Les cellules expérimentales seront suivies sur une période minimale de 3 à 5 ans. La Figure 6-14 présente un schéma de l'instrumentation installée dans la cellule expérimentale (à l'exception des thermistances) simulant le recouvrement isolant de 2,4 m. Des sondes de teneur en eau volumique, de succion et de température (non montré sur le schéma) sont installées dans les résidus à des profondeurs de 5 cm et 25 cm dans le haut (portion quasi-horizontale) et le bas (portion inclinée à 5H:1V) de la cellule expérimentale. Dans le centre de la cellule, les instruments sont installés à 5, 15 et 25 cm de profondeur dans les résidus. Des montages de tests de consommation d'oxygène sont également installés dans les résidus aux trois endroits le long de la cellule (haut, centre, bas). Une ligne de thermistance de 10 m, non présentée sur la Figure 6-14, a été installée dans le recouvrement et dans les résidus miniers dans la cellule expérimentale. Les mesures de

température sont prises à des élévations de 2,3; 2,0; 1,6; 1,2; 0,8; 0,4 m au-dessus de la surface des résidus et à 0; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 7 et 10 m au-dessous de la surface des résidus.

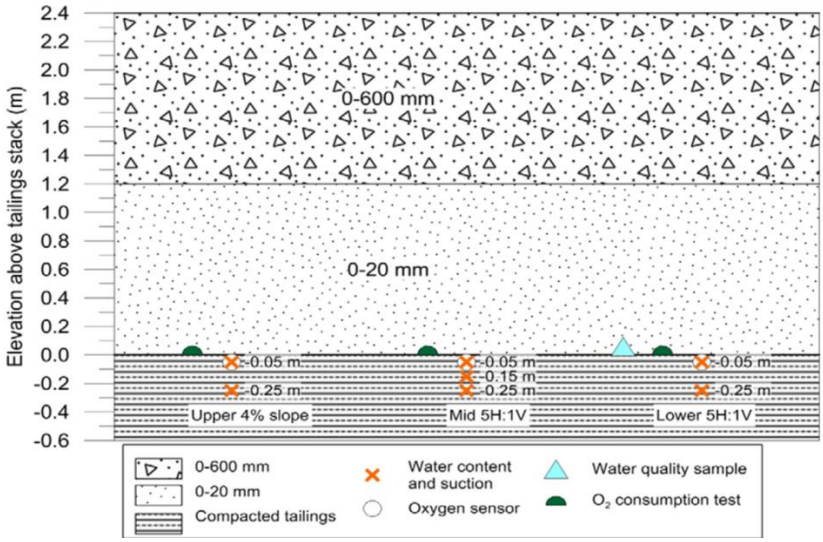


Figure 6-14 : Instrumentation de la parcelle expérimentale construite sur le parc à résidus de Mine Raglan (communication personnelle, Mine Raglan)

Les données pour les sondes de température situées à 5 cm de profondeur dans le bas de la cellule expérimentale sont disponibles à partir de février 2012. Ces données sont présentées à la Figure 6-15; pour fins de comparaison, les mesures de température dans les résidus à 5 cm de profondeur sous le recouvrement de 0,4 m (station S7) et sous le recouvrement de 1,2 m (station S5) sont également présentées.

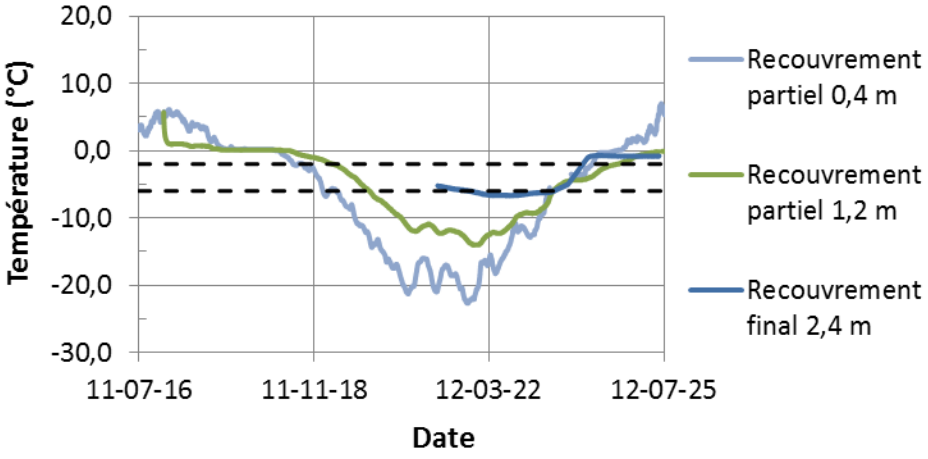


Figure 6-15 : Évolution de la température dans les résidus à 5 cm de profondeur pour le recouvrement de 0,4 m, de 1,2 m et de 2,4 m

Pour la période du 14 février au 21 juillet 2012, la température minimale des résidus sous le recouvrement de 2,4 m atteint est supérieure à celle sous les recouvrements partiels, soit de -6,7°C versus -14,0°C et -22,7°C pour le recouvrement partiel de 1,2 m et de 0,4 m respectivement. La température maximale atteinte est de -0,7°C, de -0,2°C et de 5,5° pour les recouvrements de 2,4 m, de 1,2 m et de 0,4 m. Pour la première année d'installation, le recouvrement de 2,4 m diminue la température minimale des résidus (2,4 m : -6,7°C versus 1,2 m : -14,0°C) mais n'a pas d'effet majeur au niveau de la température maximale (2,4 m : -0,7°C versus 1,2 m -0,2°C). Il est important de noter qu'il s'agit de données de la première année d'installation de la parcelle expérimentale et que les résultats pourraient évoluer dans les prochaines années.

Au niveau de la minimisation de l'oxydation des résidus, la durée où la température cible de -2°C est respectée est de 110 jours, 127 jours et 93 jours pour le recouvrement de 0,4 m, de 1,2 m et de 2,4 m. Pour la durée où la température cible de -6°C est respectée, les durées sont de 95 jours, 82 jours et 61 jours (pour le recouvrement de 0,4 m, de 1,2 m et de 2,4 m). Ainsi, pour la première année d'installation, le recouvrement de 2,4 m ne permet pas de maintenir les résidus sous une température cible de -2°C et de -6°C plus longtemps que les recouvrements de 0,4 m et de 1,2 m. Cela s'explique par le fait que le dégel des résidus se produit environ au même moment et à la même vitesse pour les trois types de recouvrement. Par contre, les résidus sous la couverture de 0,4 m gèlent plus rapidement que ceux sous le recouvrement de 1,2 m, ce qui explique la plus grande période où les températures cibles de -2°C et -6°C sont respectées pour le recouvrement de 0,4 m. Également la température minimale atteinte par les résidus sous le recouvrement de 2,4 m est plus faible que celle atteinte sous les couverts de 1,2 m et de 0,4 m.

En résumé, le recouvrement de 2,4 m ne permet pas d'augmenter la durée de la période où l'oxydation des résidus est considérée négligeable, pour la première année de données. Par contre, tel que mentionné au chapitre 5, l'oxydation des résidus est complexe et dépend d'autres facteurs que la température telle que la teneur en eau volumique non gelée des résidus et du recouvrement, la présence de bactérie, le pH, etc. Ainsi, afin d'évaluer adéquatement la performance du recouvrement de 2,4 m à limiter l'oxydation des résidus, il sera intéressant d'analyser les autres données mesurées dans le cadre du projet de cellules expérimentales telles que les données de teneurs en eau volumique non gelées dans les résidus, la qualité d'eau ainsi que les résultats des tests de consommation d'oxygène.

6.5 Dernières remarques

Dans ce travail, l'emphase est mise sur la zone en surface des résidus (5 cm sous la surface) car c'est principalement à cet endroit que la réaction d'oxydation se déroule (Gosselin et al., 2007; Godbout, 2012). Par contre, à titre informatif, il existe des données des profils de température sur plusieurs mètres de profondeur pour les résidus dans le parc à résidus de Mine Raglan. Ces profils de température sont enregistrés pour des résidus sous un recouvrement de 2,4 m dans cinq cellules expérimentales (schéma de restauration proposé) localisées à différents endroits sur le parc à résidus. Ces mesures montrent qu'à une profondeur d'environ 2 m sous la surface des résidus, l'amplitude de variation de température annuelle est presque nulle (<1°C). La température des résidus mesurés dans ces cellules expérimentales à la profondeur d'amplitude annuelle nulle est supérieure à la température du pergélisol de -6,9°C, mais inférieure au point de congélation dans la majorité des cas. Lorsque les résidus sont déposés en période hivernale en fines couches, ils ont le temps de geler et leur température diminue rapidement. Par contre, lors de la déposition estivale ou lors d'un dépôt en couches plus épaisses, les résidus prennent plus de temps à geler dans le parc à résidus. Ainsi la température des résidus dans le parc doit se stabiliser progressivement avec le temps. Une étude sur le comportement du pergélisol dans les résidus miniers présentement en cours fournira de plus amples information sur le comportement du pergélisol dans le parc à résidus miniers (Larouche, M. à paraitre).

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions

La restauration de parc à résidus miniers est en enjeu environnemental majeur, particulièrement pour les sites ayant des problématiques de génération de drainage minier acide. C'est pourquoi des études sur l'efficacité des méthodes de restauration sont nécessaires. Dans le cadre de ce projet de recherche, la performance des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m construits sur le parc à résidus de Mine Raglan pour le contrôle de la réactivité des résidus miniers a été évaluée *in situ*. Plus spécifiquement, une caractérisation des propriétés thermique, hydrogéologique et géochimique des résidus miniers et du matériau de recouvrement a été menée. Ensuite, la réactivité des résidus miniers a été étudiée *in situ*, avec un intérêt particulier sur l'effet de la température. Finalement, on a étudié en détails les profils de température et de teneur en eau volumique non gelée des recouvrements isolants partiels (0,4 m et 1,2 m) et l'effet de ces recouvrements sur la réactivité des résidus miniers.

Les travaux de caractérisation ont montré que les échantillons de résidus miniers et de matériau de recouvrement de Mine Raglan correspondent respectivement à un silt de faible plasticité (ML) et à un gravier bien étalé (GW). Le principal minéral sulfureux dans les résidus miniers est la pyrrhotite avec une teneur variant entre 10% et 18,7% dans les échantillons, ce qui en fait un résidu avec un potentiel de génération d'acide. La conductivité hydraulique saturée est de 3,5 x 10^{-5} cm/s et de 2,6 x 10^{-1} cm/s pour les résidus et pour le gravier respectivement. La pression d'entrée d'air (ψ_a) pour le matériau de recouvrement est de 5 cm et la valeur résiduelle (ψ_r) est de 70 cm pour une teneur en eau à la saturation (θ_s) de 0,38 et une teneur en eau résiduelle (θ_r) de 0,02. Pour les résidus, ψ_a varie entre 260 et 300 cm et ψ_r entre 10 000 cm et 16 000 cm pour des valeurs de θ_s et θ_r variant entre 0,04 et 0,06 selon l'essai. Une conductivité thermique des résidus variant entre 0,25 et 1,44 W/m°C et 0,25 et 2,24 W/m°C est obtenue pour l'état non gelé et gelé et pour des valeurs de degré de saturation entre 0 et 94%. Pour le gravier, une conductivité thermique non gelés variant entre 0,68 et 2,10 W/m°C pour $4 < S_r < 57\%$ a été trouvée alors que pour l'état gelé, les valeurs obtenues sont entre 1,17 et 2,22 W/m°C pour $19 < S_r < 57\%$. La réactivité des résidus est maximale (1073 moles·m^{-2}·an^{-1}) pour S_r = 50 % et diminue significativement pour $S_r < 20\%$ et $S_r > 75\%$.

Une campagne de terrain a permis d'installer des sondes de température, de teneur en eau volumique et de succion à la surface des résidus et dans les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m du parc à résidus de Mine Raglan. En parallèle, la réactivité des résidus miniers avec et sans recouvrements isolants partiels a été mesurée avec le test de consommation d'oxygène. Il a été possible de mener des tests de consommation d'oxygène sous le recouvrement isolant *in situ* sur une période d'une année. La technique de tests de consommation d'oxygène sous recouvrement isolant et la technique du test de consommation d'oxygène modifié ont bien fonctionné et ont permis d'obtenir des mesures de flux d'oxygène pour les résidus sous les recouvrements de 0,4 m et de 1,2 m.

Les résultats de la présente étude montrent que les résidus entreposés dans le parc à résidus miniers de Mine Raglan sont dans des conditions favorables à leur oxydation. Un degré de saturation à 5 cm de profondeur sous la surface des résidus variant entre 40% et 60% est mesuré pour l'ensemble des stations étudiées ce qui signifie que l'oxygène peut migrer à travers les résidus et provoquer leur oxydation. Les mesures de flux d'oxygène sur la période de juillet 2011 à juillet 2012 sur les résidus recouverts et non recouverts corroborent ces résultats.

Un effet de la température sur les flux d'oxygène a été observé. Un flux d'oxygène de 1073 moles·m^{-2}·an^{-1} a été mesuré en laboratoire à 21°C pour un degré de saturation de 51%. Sur le terrain, le flux d'oxygène maximal mesuré est de 544 moles·m^{-2}·an^{-1} pour les résidus non recouverts, pour une température des résidus de 12,8°C et un degré de saturation S_r de 53%. Lorsque la température des résidus diminue à des valeurs inférieures à -2°C, le flux d'oxygène mesuré est inférieur à 28 moles·m^{-2}·an^{-1} et il est habituellement inférieur à 15 moles·m^{-2}·an^{-1} pour une température de -5,7°C. Basé sur ces résultats, on suggère que la température cible pour le cas de Mine Raglan soit entre -2°C et -6°. Il a été montré que la loi d'Arrhénius représente assez bien l'effet de la température sur la réactivité pour une énergie d'activation entre 60 et 124 kJ/mole. Une énergie d'activation de 124 moles·m^{-2}·an^{-1} semble plus appropriée pour une température inférieure à 0°C. La réactivité des résidus varie aussi de façon importante selon l'emplacement dans le parc à résidus miniers. Cette variation serait causée par une combinaison de facteurs, dont la variation de l'état physique du sol (compactage, teneur en eau volumique, granulométrie, etc.), la composition des résidus miniers (% sulfures) dans le parc à résidus, la distribution de la température des résidus dans l'année et l'âge des résidus.

L'étude s'est par la suite attardée au comportement thermo-hydrique des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m et sur leur effet sur la réactivité des résidus miniers. Les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et 1,2 m sont la majorité du temps non saturés (S_r < 40%), permettant ainsi la diffusion de l'oxygène au travers du recouvrement vers les résidus miniers. Les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m permettent de diminuer la température maximale des résidus (-5 cm) à 7°C et 1,4°C pour le recouvrement de 0,4 m et de 1,2 m respectivement. La température maximale des résidus non recouverts mesurée est de 25,2°C. On observe également que l'ajout des recouvrements partiels de 0,4 m et 1,2 m retarde la période de gel des résidus à l'automne et le dégel au printemps par rapport aux résidus non recouverts. Les profils de température dans le recouvrement partiel de 1,2 m montrent qu'une couche active supérieure à la hauteur du recouvrement de 1,2 m est présente durant l'année, permettant le dégel des résidus durant la période estivale et donc l'oxydation des résidus miniers.

Par la suite, les résultats du comportement thermo-hydrique ont été analysés pour quantifier l'efficacité des recouvrements partiels à contrôler l'oxydation des résidus miniers et ce, par deux méthodes : la méthode par profil de température et la méthode par tests de consommation d'oxygène. La méthode par profil de température évalue l'efficacité des recouvrements en se basant sur deux critères différents : la durée de la période d'oxydation, considérant des températures cibles de -2°C et -6°C, et la durée de l'intensité maximale de la période d'oxydation, pour des critères de température de 1°C et 6°C (température au-dessus de laquelle l'oxydation des sulfures est importante). Selon la première approche, les recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m ne permettent pas d'augmenter de façon significative la période où les résidus sont considérés comme non réactifs (i.e. température inférieure à -2 ou -6°C). Ils permettent par contre de réduire la durée des périodes où les résidus sont très réactifs (i.e. température supérieure à 1 ou 6°C; deuxième approche). Les résultats montrent qu'il y a un certain gain à recouvrir avec 1,2 m plutôt que 0,4 m au niveau de la diminution de la période où la réaction d'oxydation est grande.

L'efficacité des recouvrements partiels de 0,4 m et de 1,2 m a également été évaluée à partir de la moyenne annuelle de flux d'oxygène. L'efficacité moyenne (comparaison entre le flux d'oxygène avec et sans recouvrement) du recouvrement partiel de 1,2 m est de 65 ± 25%. Pour le recouvrement de 0,4 m, une efficacité moyenne de 52 ± 18% a été observée. Ainsi le recouvrement de 1,2 m est légèrement plus efficace pour limiter l'oxydation des résidus miniers

que celui de 0,4 m, basé sur cette méthode d'évaluation. Selon la période de l'année, le recouvrement n'aura pas la même efficacité. Les recouvrements de 0,4 m et de 1,2 m ont un effet bénéfique la majorité du temps, à l'exception d'une période entre la fin septembre et la mi-décembre pour le couvert de 1,2 m et de fin septembre 2011 à fin octobre 2011, où des flux d'oxygène sont mesurés sous les recouvrements alors que de plus faibles flux sont mesurés aux stations non recouvertes.

En complément, des informations sur les propriétés hydrogéologiques et thermiques des matériaux *in situ* ont pu être déterminées à partir des mesures de température, de teneur en eau volumique et de succion prises sur le terrain. Des teneurs en eau non gelées entre 0,01 et 0,08 et entre 0,02 et 0,04 pour des températures de -10°C ont été mesurées pour les résidus miniers et pour le gravier respectivement. Des courbes caractéristiques de gel tracées pour les résidus miniers et pour le gravier concordent assez bien avec les courbes de rétention d'eau mesurées en laboratoire pour des valeurs de succion supérieures à $1x10^3$ cm. Cette méthode semble être une alternative intéressante pour déterminer la fin de la courbe de rétention d'eau et les valeurs de teneur en eau résiduelle. Les courbes de rétention de terrain concordent bien avec les courbes de laboratoire pour le gravier, mais concordent moins bien pour les résidus miniers. Une partie de la différence peut provenir des phénomènes d'hystérésis et de la précision de la sonde MPS-1.

7.2 Recommandations

Ce projet a permis d'étudier l'effet des recouvrements isolants partiels de 0,4 m et de 1,2 m sur la réactivité des résidus miniers de Mine Raglan sur une période d'une année. Ces résultats sont intéressants pour la gestion du plan de recouvrement progressif ainsi que pour la compréhension de l'efficacité du recouvrement final. Par contre, ces recouvrements ne sont pas le scénario de restauration finale de Mine Raglan. Il sera intéressant d'étudier l'efficacité du recouvrement isolant de 2,4 m construit dans la parcelle expérimentale à la Mine Raglan à partir des données de température, de succion, de teneur en eau volumique non gelée, de qualité d'eau ainsi que des résultats des tests de consommation d'oxygène. Une approche combinée d'évaluation de la performance avec les méthodes par tests de consommation d'oxygène et par profil de température pourrait être utilisée. Une modélisation thermo-hydrique du comportement des scénarios testés permettrait de valider les résultats obtenus sur le terrain. Une fois un modèle représentatif obtenu, ce dernier pourrait être utilisé comme outil prédictif afin d'inclure les scénarios de changements

climatiques et mieux évaluer la performance à long terme des recouvrements. L'ajout d'une composante géochimique dans la modélisation pour la réactivité des résidus miniers en ferait une étude plus complète. Enfin, en plus de faire varier les températures pour simuler un réchauffement climatique, il serait important d'ajouter l'effet des précipitations extrêmes dans les conditions de réchauffement climatique. On sait que le comportement hydrogéologique va influencer de façon significative le comportement thermique et par le fait même la performance des recouvrements isolants. De plus, on recommande de continuer la prise des données pour une deuxième année afin de voir si le comportement observé lors de la première année se répétera.

Le recouvrement isolant semble empêcher le réchauffement des résidus en été mais également le refroidissement de ces derniers en hiver. Un recouvrement où l'on favorise les mouvements convectifs pourrait être une bonne alternative au recouvrement isolant traditionnel. Ce type de recouvrement permet une plus grande extraction de chaleur durant l'hiver, diminuant ainsi la température minimale des résidus. La convection étant plus faible l'été, voir même nulle, la température des résidus reste près de ce qui est mesurée avec les recouvrements isolants traditionnels.

Il a été vu que la réactivité des résidus est variable selon la localisation sur le parc à résidus miniers. Ainsi, un recouvrement isolant n'aura pas la même efficacité sur un même parc à résidus. On recommande d'installer une station de mesure dans le recouvrement partiel de 0,4 m sur le versant sud du parc à résidus afin de voir l'effet de la localisation sur les comportements thermique et hydrique du recouvrement isolant partiel de 0,4 m et sur sa performance à contrôler la réactivité des résidus miniers. De plus, une bonne connaissance des résidus miniers et des conditions dans lesquels ils sont entreposés sera nécessaire afin de faire la conception d'un recouvrement permettant d'empêcher l'oxydation des résidus miniers sur toute la superficie du parc à résidus miniers.

Au niveau de la réactivité des résidus miniers, il est difficile d'évaluer de façon précise la température cible permettant l'arrêt complet de l'oxydation des résidus miniers sur le terrain. Cela principalement en raison des nombreuses variations de différents paramètres (ex. teneur en sulfures, granulométrie, géométrie, etc.) sur le terrain qui empêchent d'isoler la variable température. C'est pourquoi on suggère d'étudier la réactivité des résidus miniers en laboratoire dans des conditions contrôlées (ex. essais en colonne dans une atmosphère contrôlée) permettant

ainsi l'identification d'une température cible de façon plus précise. Dans la présente étude, on suggère une température cible entre -2 et -6°C, ce qui demeure une plage relativement grande de variation. Afin d'identifier cette température cible, il faudra améliorer la compréhension des mécanismes d'oxydation des résidus miniers en conditions froides.

Au niveau technique, les équipements de mesure EM-50, 5TM, MPS-1 de Décagon et Apogee SO-110 ont bien répondu malgré le climat extrême. Dans cette étude, l'effet de la température sur la lecture des sondes est considéré comme négligeable, ce qui n'est possiblement pas le cas. Il serait intéressant dans le futur d'intégrer l'effet de la température (en faisant des courbes de calibrage à différentes températures) sur la lecture des sondes utilisées. Nos travaux ont montré que les mesures de succion augmentent rapidement lorsque le gel se fait sentir dans le senseur. On sait que des cryosuccions apparaissent lorsqu'un sol est en processus de gel, mais on peut se demander ici si l'augmentation des valeurs mesurées sont réelles (créé par la cryosuccion) ou un artéfact du senseur. Cet aspect pourrait être éclairci par des mesures au laboratoire.

Les tests de consommation d'oxygène semblent avoir donné de bons résultats en général. La hauteur de dégagement des cylindres était parfois assez élevée (h > 15 cm) pour certaines stations. Dans ces cas, lorsque les résidus étaient moins réactifs, une faible diminution d'oxygène était enregistrée dans la chambre étanche. La précision de la méthode d'interprétation analytique d'Elberling et al. (1994) est plus faible dans ces cas pour les faibles flux. A l'avenir, il serait bien de mener les tests de consommation d'oxygène sur une plus longue période (2 à 3 jours) lorsque le flux est faible et d'interpréter les résultats avec un logiciel de simulation de la migration des gaz dans un milieu réactif. Cela pourrait permettre d'améliorer la précision de l'interprétation des tests de consommation d'oxygène dans ces conditions particulières de faible réactivité.

On observe dans ce travail qu'il y a un avantage à mettre des recouvrements isolants partiels de 1,2 m et de 0,4 m sur la diminution de la réactivité des résidus miniers. Par contre, il est difficile de quantifier ce bénéfice en terme de génération de DMA. En effet, l'étude du flux d'oxygène avec le test de consommation d'oxygène permet d'évaluer l'ampleur de la réaction d'oxydation à la base du DMA. Un défi futur sera de relier ces flux d'oxygène avec la qualité d'eau provenant des résidus miniers. En effet, même si un flux d'oxygène est mesuré, il peut y avoir sur le terrain des minéraux qui permettent la neutralisation de l'acidité produite par la réaction d'oxydation. Également, le gel des résidus peut empêcher le déplacement de l'eau et donc la propagation de

contaminants. Ainsi, il sera intéressant d'identifier quel est le flux d'oxygène admissible sur le terrain pour empêcher la génération et la propagation de contaminant dans le milieu, et non mettre uniquement l'emphase sur l'oxydation des minéraux sulfureux.

RÉFÉRENCES

Aachib, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2002). *Laboratory measurements and predictive equations for gas diffusion coefficient of unsaturated soils.* Paper presented at the 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Speciality Conference, Niagara Falls, Ontario.

Aachib, M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2004). Measurement and Prediction of the Oxygen Diffusion Coefficient in Unsaturated Media, with Applications to Soil Covers. *Water, Air, & Soil Pollution, 156*(1), 163-193.

Ahonen, L., & Tuovinen, O. H. (1992). Bacterial oxidation of sulfide minerals in column leaching experiments at suboptimal temperatures. *Applied and Environmental Microbiology, 58*(2), 600-606.

Allard, M. (2012). *Le pergélisol et le changement climatique au Québec nordique : les défis pour le développement.* Québec Mine, 26-29 novembre 2012. Québec, Canada.

AMEC. (2002a). *Tailings Stack Reclamation Cover Design.* Mississauga, Ontario.

AMEC. (2002b). *Tailings Stack Reclamation Cover Design - Design Adjustments and Short Term Deposition and Progressive Reclamation Plans*.

AMEC. (2007a). *2006 Field Investigation Program and Test Results at Test Pad of Tailings Stack Cover.* Mississauga, Ontario.

AMEC. (2007b). *2006 Geothermal Evaluations for the Tailings Stack Cover Design.* Mississauga, Ontario.

AMEC. (2007c). *Five Years Tailings Deposition Plan.* Mississauga, Ontario.

AMEC. (2007d). *Recouvrement du parc à résidus 2007.*

AMEC. (2008). *Recouvrement du parc à résidus 2008*.

AMEC. (2009). *Short, medium and long term design, planning and optimization of the tailings area design report.* Mississauga, Ontario.

AMEC. (2010). *Recouvrement du parc à résidus 2010.* Pointe-Claire, Québec.

Andersland, O., & Ladanyi, B. (2004). *Frozen Groung Engineering* (2nd Edition ed.). Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.

Apogee instruments inc. *Oxygen sensor SO-110 & 200 Series Manual*.

Archambault, C. L. (2009). Évaluation de la réactivité des rejets de concentrateur du parc à résidus de la mine Raglan, Qc, projet de fin d'étude. Rouyn-Noranda: Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Arenson, L., & Sego, D. C. (2007). Protection of mine waste tailings ponds using cold air convection. *Assessment and Remediation of Contaminated Sites in Arctic and Cold Climates*.

Aubertin, M., Aachib, M., & Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomembranes, 18*(2–4), 215-233.

Aubertin, M., B. Bussière, M. Monzon, A.-M. Joanes, D. Gagnon, J.-M. Barbera, . . . Bernier., L. (1999). *Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers Phase II: Essais en place* (2.22.2c). MEND/NEDEM.

Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des résidus miniers* Presses Internationales Polytechnique. Manuel sur cédérom.

Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E. M., Martin, V., Pépin, G., . . . Chapuis, R. P. (2011). *Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers*. Paper presented at the Symposium 2011 sur l'environnement et es mines, Rouyn-Noranda, Québec.

Aubertin, M., Chapuis, R. P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J. F., & Tremblay, L. (1995). *Étude en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers* (NEDEM 2.22a). Montréal: CANMET.

Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(6), 1104-1122.

Aubertin, M., Ricard, J.-F., & Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal, 35*(1), 55-69.

Awoh, S. (2012). *Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau.* Thèse, Université du Québec en Abitibi-témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.

Banin, A., & Anderson, D. M. (1974). Effects of Salt Concentration Changes During Freezing on the Unfrozen Water Content of Porous Materials. *Water Resour. Res., 10*(1), 124-128.

Benzaazoua, M., Belem, T., & Bussière, B. (2002). Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. *Cement and Concrete Research, 32*(7), 1133-1144.

Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., McLaughlin, J., & Marion, P. (2000). Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International Journal of Mineral Processing, 60*(1), 57-74.

Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P., & Verburg, R. (1999). Cementitious backfill with high sulfur content Physical, chemical, and mineralogical characterization. *Cement and Concrete Research, 29*(5), 719-725.

Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2010). *A modified protocol of the ASTM normalized humudity cell test as a laboratory weathering method of concentrator tailings.* Paper presented at the International Mine Water Association Conference, Sydney, Nova Scotia, Canada 5 – 9 September 2010.

Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2012). *Modification and automation of the humidity cell test protocol to favor tailings reactivity.* Paper presented at the 9th International Conference on Acid Rock Drainage, Ottawa, Ontario, May 20-26.

Bouzahzah, H., Califice, A., Benzaazoua, M., Mermillod-Blondin, R., & Pirard, E. (2008). *Modal analysis of mineral blends using optical image analysis versus X-ray diffraction.* Paper presented at the Ninth International Congress for Applied Mineralogy, Brisbane, QLD.

Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques.* Thèse, École polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal, 44*(9), 1019-1052.

Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2004). A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology, 45*(5), 609-622.

Bussière, B., Dagenais, A.-M., Mbonimpa, M., & Aubertin, M. (2002). *Modification of oxygen-consumption testing for the evaluation of oxygen barrier performance.* Paper presented at the 55th Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint International Association of Hydrogeologists - Canadian National Chapter Canadian Geotechnical Society (IAH-CNC/CGS) Conferences: Ground and Water: Theory to Practice, Niagara Falls, pp. 139-146. CD-ROM.

Bussière, B., & Hayley, D. W. (2010). Effects of Climate Change on Mine Waste Disposal in the Arctic. *Geo-Strata, 14(5)*, 42,44-46

Cassie, J., Claypool, G., & Carreau, B. (2009). *Nanisivik mine tailings disposal : an exemple of a mining best practice*. Paper presented at the Thirteenth International Conference on Tailings and Mine Waste Alberta, Canada.

Claypool, G., Cassie, J., & Carreau, G. (2009, June 23-26). *Reclamation of a tailing Disposal Area in the Canadian Arctic.* Paper presented at the 8th International Conference on Acid Rock Drainage, Skelleftea, Suisse.

Collin, M. (1987). Mathematical modeling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of pyritic mine tailings: Licenciate Treatise. Royal Institute of Technology. Department of Chemical Engineering. S-10044 Stockholm, Sweden.

Collin, M. (1998). *The Bersbo Pilot Project. Numerical simulation of water and oxygen transport in the soil covers at mine waste deposits.* (4763). Swedish Environmental Protection Agency.

Collin, M., & Rasmuson, A. (1988). A Comparison Of Gas Diffusivity Models For Unsaturated Porous Media. *Soil Sci. Soc. Am. J., 52*(6), 1559-1565.

Côté, J., & Konrad, J. M. (2005a). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal, 42*(2), 443-458.

Côté, J., & Konrad, J. M. (2005b). Thermal conductivity of base-course materials. *Canadian Geotechnical Journal, 42*(1), 61-78.

Côté, J., & Konrad, J. M. (2007). Indirect methods to assess the solid particle thermal conductivity of Quebec marine clays. *Canadian Geotechnical Journal, 44*(9), 1117-1127.

Dagenais, A.-M. (2005). *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires.* Thèse, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Dagenais, A. M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Aubertin, M. (2012). A Modified Oxygen Consumption Test to Evaluate Gas Flux Through Oxygen Barrier Cover Systems. *ASTM Geotechnical Testing Journal, 35*(1).

Davé, N., Blanchette, M., & Giziewicz, E. (1996). Role of ice, in the water cover option, and permafrost in controlling acid generation from sulphide tailings. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.61.1*.

Davies, M. (2011). *Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals.* Paper presented at the Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, November 6 to 9, 2011.

Dawson, R. F., & Morin, K. A. (1996). Acid Mine Drainage in Permafrost Regions : Issues, Control Strategies and Research Requierements. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.61.2*. Ottawa.

Decagon Devices. (2008-2009). *MPS-1 Dielectric Water Potential Sensor Operator's Manual, Version 3.0* Pullman, WA.

Decagon Devices Inc. (2010). *5TM water content and Temperature sensors Operator's Manual Version 0*.

Demers, I., Bussière, B., Mbonimpa, M., & Benzaazoua, M. (2009). Oxygen diffusion and consumption in low-sulphide tailings covers. *Canadian Geotechnical Journal, 46*(4), 454-469.

Derycke, V. (2012). *Optimisation de la désulfuration de produits miniers en vue de la diminution de leur potentiel polluant : effet de la granulométrie, du type de sulfures, et évaluation de la qualité des eaux de drainage post-traitement.* Thèse, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.

EcoMetrix. (2008). *Assessment of the freezing point depression in Raglan tailings.* Mississauga, Ontario.

Elberling, B. (1998). Processes controlling oxygen uptake rates in frozen mine tailings in the Arctic. *Ice in surface waters: proceedings of the 14th international symposium on ice, New York, 27-31 July 1998. Volume 1*, 183-188.

Elberling, B. (2001). Environmental controls of the seasonal variation in oxygen uptake in sulfidic tailings deposited in a permafrost-affected area. *Water Resources Research, 37*(1), 99-107.

Elberling, B. (2005). Temperature and oxygen control on pyrite oxidation in frozen mine tailings. *Cold Regions Science and Technology, 41*(2), 121-133.

Elberling, B., & Langdahl, B. R. (1998). Natural heavy-metal release by sulphide oxidation in the High Arctic. *Canadian Geotechnical Journal, 35*(5), 895-901.

Elberling, B., & Nicholson, R. V. (1996). Field determination of sulphide oxidation rates in mine tailings. *Water Resources Research, 32*(6), 1773-1784.

Elberling, B., Nicholson, R. V., & David, D. J. (1993). Field evaluation of sulphide oxidation rates. *Nordic Hydrology, 24*(5), 323-338.

Elberling, B., Nicholson, R. V., Reardon, E. J., & Tibble, P. (1994). Evaluation of sulphide oxidation rates: a laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. *Canadian Geotechnical Journal, 31*(3), 375-383.

Elberling, B., Schippers, A., & Sand, W. (2000). Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures. *Journal of Contaminant Hydrology, 41*(3-4), 225-238.

Erickson, P. M. (1995). Reclamation of the North Rankin Nickel Mine tailing. Final report. : Goverment of the Northwest territories, Dept of Public Works and Services. Yellowknife.

Ethier, M.-P. (2011). *Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan.* Mémoire, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Fortier, R. (2006). *Étude du pergélisol de la zone 5-8 du plateau Katinniq au Nunavik (Québec)* Québec: Université Laval.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, Wiley International Sciences

Garneau, P. (2012). *Oxygen Consumption in a Northern Canada Tailings Storage Facility.* M. Sc. Thesis, Royal Roads University, Victoria, British-Columbia, Canada.

Godbout, J. (2012). *Réactivité des remblais miniers cimentés contenant de la pyrrhotite et étude de paramètre d'influence d'importance telles la passivation des surfaces et les propriétés hydrogéologiques.* Thèse, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.

Godbout, J., Bussière, B., Benzaazoua, M., & Aubertin, M. (2010). *Influence of pyrrhotite content on the mechanical and chemical behaviour of cemented paste backfill.* Paper presented at the 13th International Seminar on Paste & Thickened Tailings (Paste 2010), 3-6 may 2010, Toronto, ON.

Godwaldt, R. C. (2001). *Acid Mine Drainage at Sub-Zero temperatures.* M. Sc. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

Godwaldt, R. C., Biggar, K. W., & Sego, D. C. (1999). AMD generation at sub-zero temperatures. *Assessment and Remediation of Contaminated Sites in Arctic and Cold Climates*, 75-82.

Golder Associés. (2008). *Rapport synthèse activités du parc à résidus à la mine Raglan.* Montréal, Québec.

Gosselin, M. (2007). *Étude de l'influence des caractéristiques hydrogéochimiques des résidus miniers réactifs sur la diffusion et la consommation de l'oxygène.* Mémoire, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Gosselin, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2007). *Évaluation de l'effet du degré de saturation sur la diffusion et la consommation d'oxygène dans des résidus miniers sulfureux.* Paper presented at the 8th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference and 60th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, Canada.

Gouvernement du Québec. (1997). *Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec* Qubec: Ministère des ressources naturelles et de la faune.

Hamdi, J. (2011). *Mesures expérimentales des concentrations en oxygène sur le terrain et modélisations numériques pour élaluer le flux de diffusion dans le couverture du site mine LTA.* Mémoire, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Harlan, R. L. (1973). Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil *Water resourses, 9*(5).

Holubec, I. (1993). Preventing AMD by Disposing of Reactive Tailings in Permafrost. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 6.1*. Ottawa: CANMET.

Holubec, I. (2004). Covers For Reactive Tailings Located in Permafrost Regions Review. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.61.4*. Ottawa.

Hukseflux Thermal sensors. (2001). *TP08 Small Size Non-Steady-State Probe for Thermal Conductivity Measurement User Manual* (version 0607). The Netherlands: Hukseflux Thermal sensors.

Janzen, M. P., Nicholson, R. V., & Scharer, J. M. (2000). Pyrrhotite reaction kinetics: reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 64*(9), 1511-1522.

Joshi, B., Barbour, S. L., Krause, A. E., & Wilson, G. W. (1993). A finite element model for the coupled flow of heat and moisture in soils under atmospheric forcing. *Finite Elements in Analysis and Design, 15*(1), 57-68.

Kahimba, F. C., & Sri Ranjan, R. (2007). Soil temperature correction of field TDR readings obtained under near freezing conditions. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada, 49*, 1.19-11.26.

Kane, D. L., Hinkel, K. M., Goering, D. J., Hinzman, L. D., & Outcalt, S. I. (2001). Non-conductive heat transfer associated with frozen soils. *Global and Planetary Change, 29*(3-4), 275-292.

Kizito, F., Campbell, C. S., Campbell, G. S., Cobos, D. R., Teare, B. L., Carter, B., & Hopmans, J. W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology, 352*(3–4), 367-378.

Koopmans, R. W. R., & Miller, R. D. (1966). Soil Freezing and Soil Water Characteristic Curves. *Soil Sci. Soc. Am. J., 30*(6), 680-685.

Kwong, E. C. M. (1995). *Abiotic and biotic pyrrhotite dissolution.* M. Sc thesis, Waterloo, Ontario, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Kwong, Y. T. J. (1993). *Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective* (MEND Report 1.32.1). Ottawa: CANMET.

Kyhn, C., & Elberling, B. (2001). Frozen cover actions limiting AMD from mine waste deposited on land in Arctic Canada. *Cold Regions Science and Technology, 32*(2-3), 133-142.

Lee Black, D., McQuay, M. Q., & Bonin, M. P. (1996). Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications. *Progress in Energy and Combustion Science, 22*(3), 267-306.

Lesher, C. M. (2007). Ni-Cu-(PGE) Deposits in the Raglan Area, Cape Smith Belt, New Québec. *Goodfellow, W. D., ed.,Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods Special Publication, No 5*, 351-386.

Malazian, A., Hartsough, P., Kamai, T., Campbell, G. S., Cobos, D. R., & Hopmans, J. W. (2011). Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor. *Journal of Hydrology, 402*(1–2), 126-134.

Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2006). *Modification of the Predictive MK Model to Integrate Hysteresis of the Water Retention Curve.* Paper presented at the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, United States.

Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2012). Predicting Hysteresis of the Water Retention Curve from Basic Properties of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering, 30*(5), 1147-1159.

Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Wilson, W. G. (2007). *Instrumentation and monitoring techniques for oxygen barrier covers used to control acid mine drainage*. Paper presented at the Mining Industry Conference, CIM, Montréal CD-rom.

Martin, V., McMullen, J., & Aubertin, M. (2005). *Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur*. Paper presented at the Symposium 2005 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., & Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(5), 916-932.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal, 43*(8), 773-787.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2011). Oxygen consumption test to evaluate the diffusive flux into reactive tailings: interpretation and numerical assessment. *Canadian Geotechnical Journal, 48*(6), 878-890.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P., & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering, 20*(3), 235-259.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Bussière,B. (2011). The Oxygen Consumption Test to Evaluate the Diffusive Flux into Reactive Tailings: Interpretation and Numerical Assessment. *Canadian Geotechnical Journal*, 47.

McCarthy, D. (2008). *Essentials of Soil Mechanics and Foundations : Basic Geotechnics* (7th ed.). International Edition. 864 p.

Meldrum, J. L. (1998). *The determination of sulphide oxidation potential of mine tailings from Rankin Inlet, Nunavut, at subzero temperature* M.Sc. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Meldrum, J. L., & Jamieson, H. E., Dyke, L. D. (2001). Oxidation of mine tailings from Rankin Inlet, Nunavut, at subzero temperatures. *Canadian Geotechnical Journal, 38*(5), 957-966.

MEND. (1998). Acid Mine Drainage Behaviour in Low Temperature Regimes - Thermal Properties of Tailings. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.62.2*.

Miller, R. D. (1972). Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. *Frost Action in Soils. Highway Research Record, 393*, 1-11.

Nemcsok, G. (2009). Raglan Basalt, Argillite and Peridotite Densities. Xstrata Nickel Mine Raglan.

Newman, G. P. (1995). *Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing.* M. Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A., & Reardon, E. J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal, 26*(1), 1-8.

Nicholson, R. V., Gillham, R. W., & Reardon, E. J. (1988). Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta, 52*(5), 1077-1085.

Nixon, F. M., Duchesne, C., & Wright, J. F. (2000). *Thermal Conductivity of Tailings.* Carleton University, Ottawa, ON, Canada.

Nordstrom, D. K. (2000). Advances in the Hydrogeochemistry and Microbiology of Acid Mine Waters. *International Geology Review, 42*(6), 499-515.

O'Kane Consultants Inc. (2012). Cold Regions Cover System Design Technical Guidance Document. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.61.5c*.

Ouangrawa, M. (2007). *Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement submergés.* Thèse, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J. W., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2010). Preventing acid mine drainage with an elevated water table: Long-term column experiments and parameter analysis. *Water, Air, and Soil Pollution, 213*(1-4), 437-458.

Outcalt, S. I., Nelson, F. E., & Hinkel, K. M. (1990). The zero-curtain effect: heat and mass transfer across an isothermal region in freezing soil. *Water Resources Research, 26*(7), 1509-1516.

Peregoedova, A. (2012). *Etude expérimentales des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire.* Mémoire, École polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

Pham, N., Sego, D. C., Arenson, L., Blowes, D., Smith, L., Neuner, M. G. M., & Amos, R. (2009). *Diavik waste rock project:heat tranfer in experiemental waste rock piles at Diavik under permafrost environment.* Paper presented at the 8th ICARD International Conference on acid Rock Drainage, Skelleftea, Sweden.

Ressources Naturelles Canada. (2009). Atlas du Canada, from http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/francais/maps/environment/land/permafrost/1

Robinson, D. A., Bell, J. P., & Batchelor, C. H. (1994). Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. *Journal of Hydrology, 161*(1–4), 169-180.

Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D., & Friedman, S. P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal, 2*(4), 444-475.

Robitaille, A., & Allard, M. (1996). *Guide pratique d'identification des dépôts de surface aux Québec (notions élémentaires de géomorphologie).* Québec, Les Publications du Québec.

Rykaart, M., & Hockley, D. (2009). Mine Waste Covers in Cold Regions. *Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier Rapport 1.61.5a*.

Singer, P. C., & Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage: the rate determining step. *Science, 167*, 1121-1123.

Skoog, D. A., & Leary, J. J. (1992). *Principles of instrumental analysis, Fourth Edition. Sauders College Publishing*.

SNC Lavalin. (2000). *Hydrology study, technical memorandum*.

SNC Lavalin. (2009). *Caractérisation du parc à résidus miniers de la mine Raglan - Rapport final*.

Spaans, E. J. A., & Baker, J. M. (1996). The soil freezing characteristic: Its measurement and similarity to the soil moisture characteristic. *Soil Science Society of America Journal, 60*(1), 13-19.

Taylor, J. C., & Hinczak, I. (2001). *Rietveld made easy : A practical Guide to the Understanding of the MEthod and Successful Phase quantification*: J.C. Taylor and I. Hinczak.

Tibble, P. A., & Nicholson, R. V. (1997). *Oxygen Consumption on Sulphide Tailings and Tailings Covers : Measured Rates ans Applications.* Paper presented at the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, B.C. Canada.

van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Sci. Soc. Am. J., 44*(5), 892-898.

van Genuchten, M. T., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils* (EPA Report 600/2-91/065). Riverside, California: U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

Watanabe, K., Kito, T., Wake, T., & Sakai, M. (2011). Freezing experiments on unsaturated sand, loam and silt loam. *Annals of Glaciology, 52*(58), 37-43.

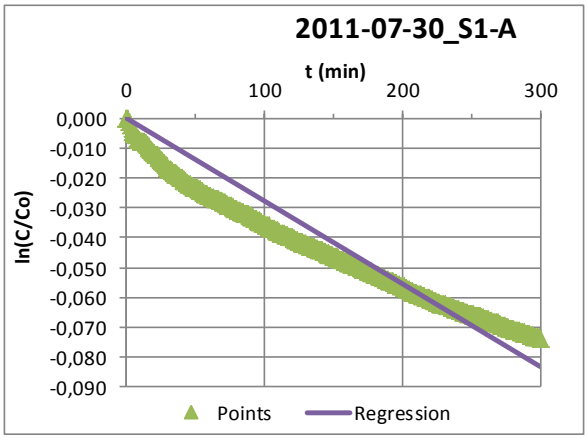
ANNEXE A – Interprétation des tests de consommation d'oxygène

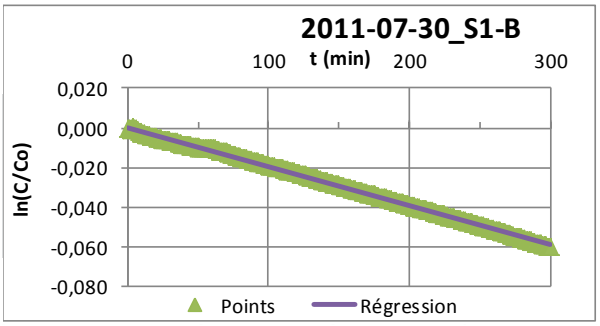
Annexe A.1 : test de consommation d'oxygène pour les stations non-couvertes (S1 à S3) et pour les stations couvertes de 1,2 m (S4 à S6) et de 0,4 m (S7)

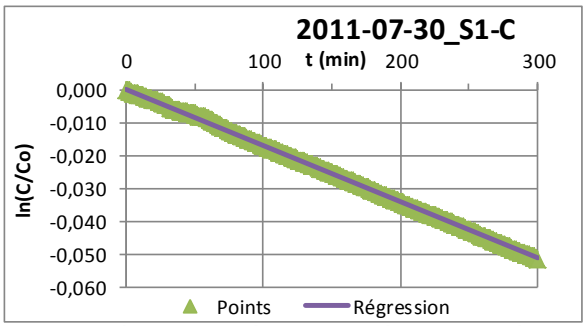
Station S1

Géométrie :			
	S1-A	S1-B	S1-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	96,0	101,0	107,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	1,75E-03	1,84E-03	1,95E-03

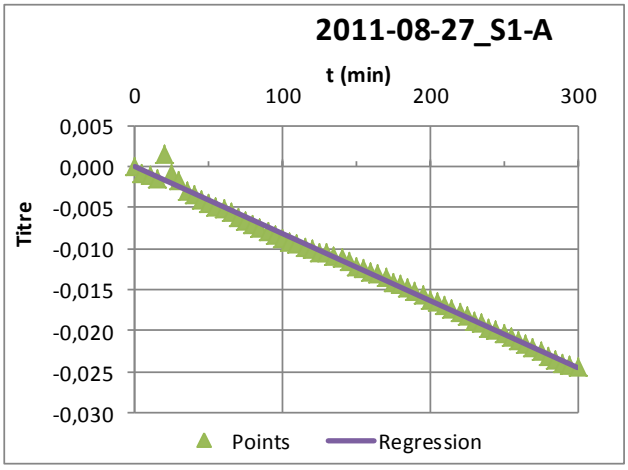
Identification:			
Date de l'essai:	2011-07-30		
Température (°C)	10,60		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	8,970	8,951	8,951
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,77E-04	-1,97E-04	-1,70E-04
Flux (moles/m^2/an)	**125**	**93**	**86**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	1,49	1,22	1,04
Pente:	3,625	2,78	2,47
m	-0,00028	-0,00020	-0,00017
b	0	0	0
R^2	0,9830	0,9987	0,9997

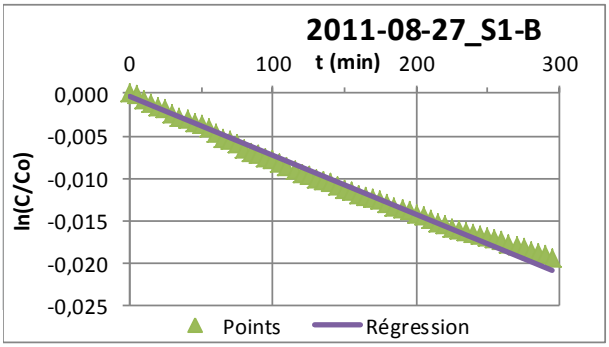


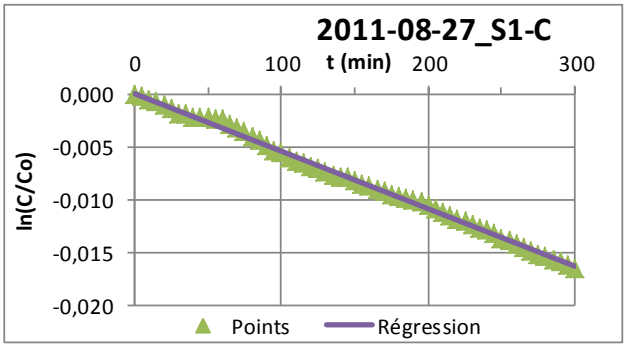




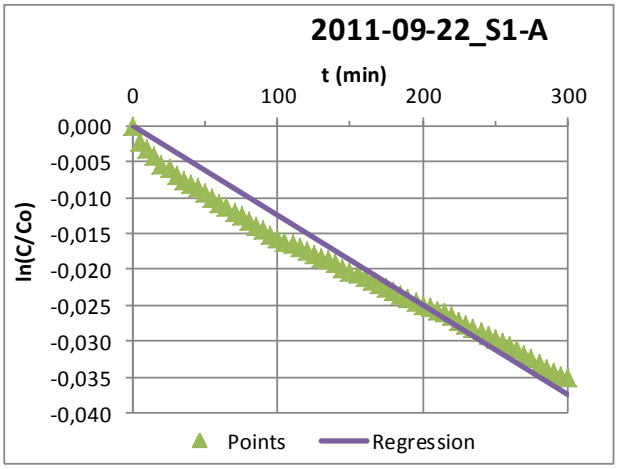
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-27		
Température (°C)	5,70		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,128	9,128	9,128
Pente (ln (C/C0)-t)	-8,16E-05	-6,96E-05	-5,43E-05
Flux (moles/m^2/an)	**38**	**34**	**28**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,51	0,41	0,34
Pente:			
m	-0,00008	-0,00007	-0,00005
b	0	0	0
R^2	0,9943	0,9920	0,9971

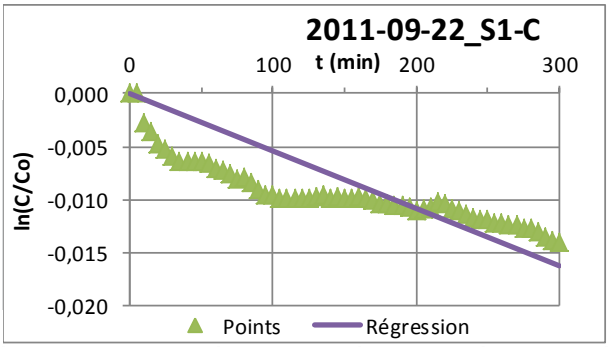




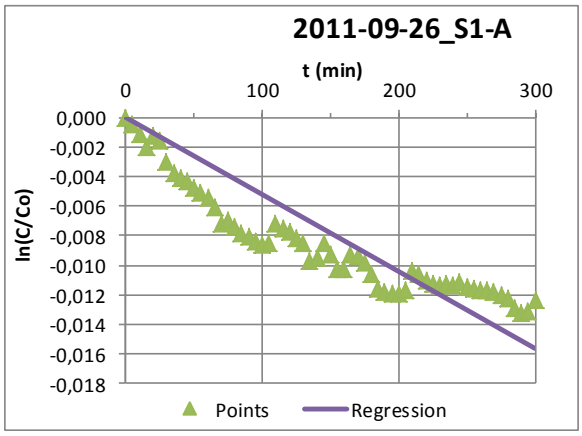


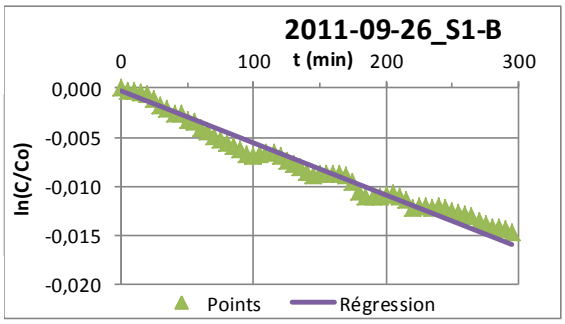
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-22		
Température (°C)	-0,70		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,342	-	9,342
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,25E-04	-	-5,42E-05
Flux (moles/m^2/an)	**59**	-	**28**
Durée du test (h)	5	-	5
Baisse d'O_2 (%)	0,72	-	0,29
Pente:			0,67
m	-0,00012	-	-0,00005
b	0	-	0
R^2	0,9912	-	0,8308

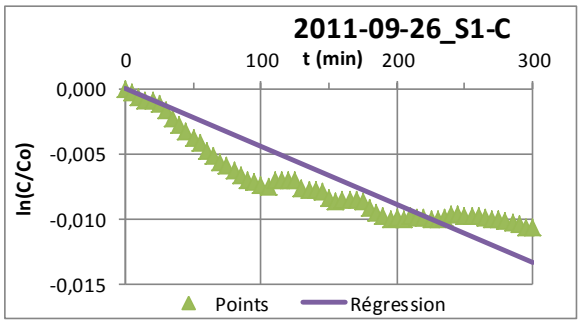




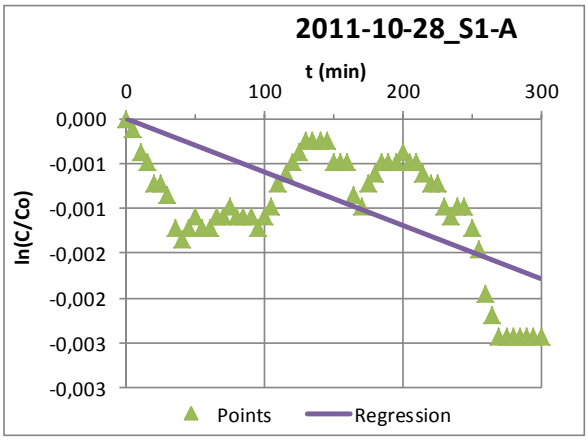
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-26		
Température (°C)	-2,90		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,418	9,418	9,418
Pente (ln (C/C0)-t)	-5,21E-05	-5,32E-05	-4,44E-05
Flux (moles/m^2/an)	**25**	**27**	**24**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,26	0,31	0,22
Pente:			
m	-0,00005	-0,00005	-0,00004
b	0	0	0
R^2	0,8716	0,9778	0,8506

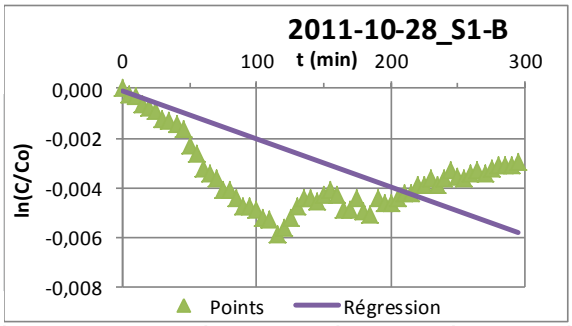


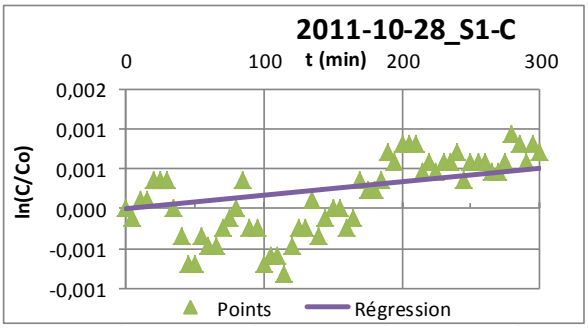




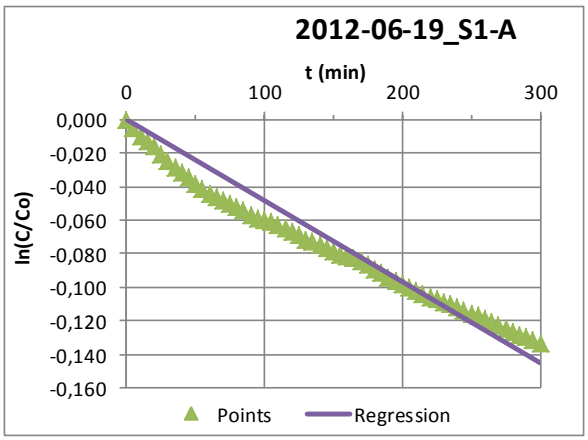
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-28		
Température (°C)	-8,40		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,614	9,614	9,614
Pente (ln (C/C0)-t)	8,10E-06	9,02E-05	3,52E-05
Flux (moles/m^2/an)	**0**	**0**	**0**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	-0,04	-0,35	-0,16
Pente:			
m	0,00001	0,00009	0,00004
b	0	0	0
R^2	0,77180	0,2257	0,5003

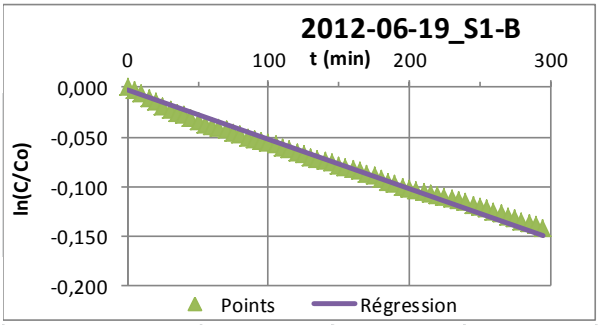


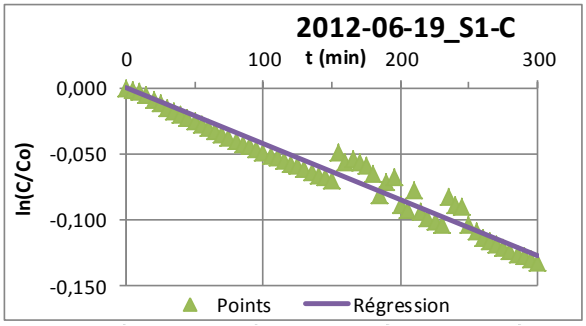




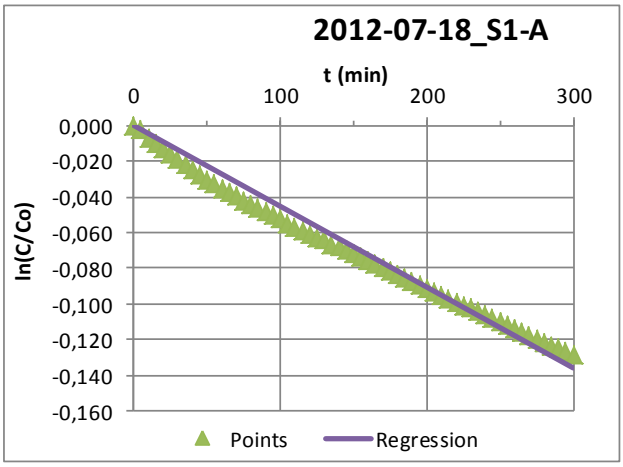
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-19		
Température (°C)	6,2		
Paramètres:	S1-A	S1-B	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,111	9,111	9,111
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,83E-04	-4,99E-04	-4,24E-04
Flux (moles/m^2/an)	**222**	**241**	**217**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,62	2,80	2,58
Pente:			
m	-0,00048	-0,00050	-0,00042
b	0	0	0
R^2	0,9877	0,9958	0,9589

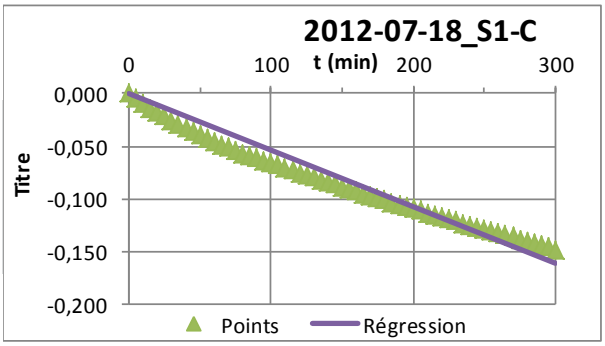






Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-18		
Température (°C)	9,00		
Paramètres:	S1-A	S1-C	S1-C
C_0 (mole/m^3)	9,021	-	9,021
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,53E-04	-	-5,38E-04
Flux (moles/m^2/an)	**206**	**-**	**273**
Durée du test (h)	5,0	-	5
Baisse d'O_2 (%)	2,52	-	2,88
Pente:			
m	-0,00045	-	-0,00054
b	0	-	0
R^2	0,9947	-	0,9873

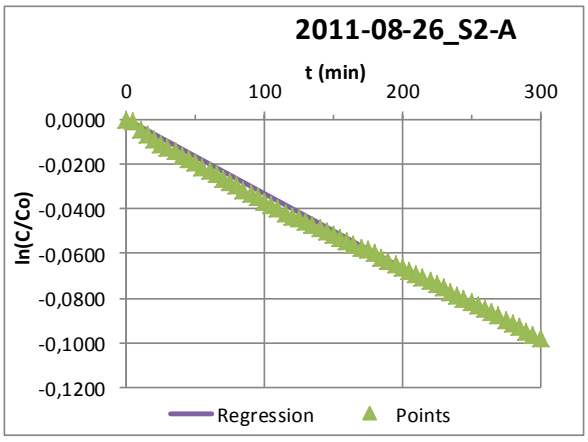


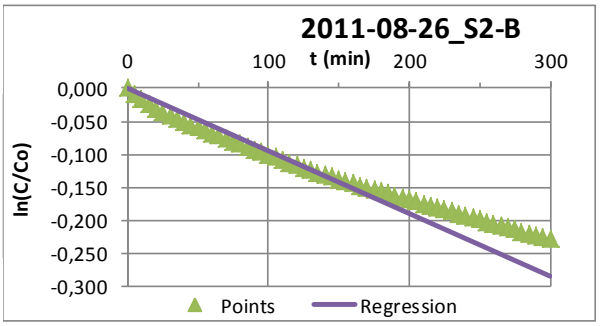


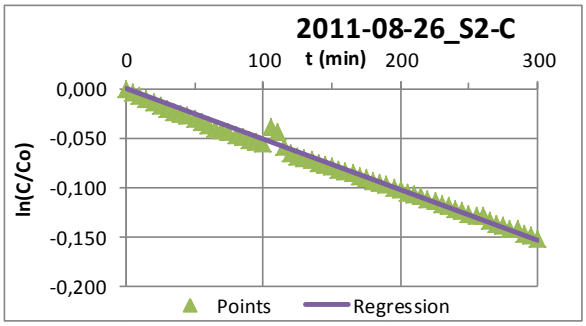
Station S2

Géométrie :			
	S2-A	S2-B	S2-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	107,0	102,0	108,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	1,95E-03	1,86E-03	1,97E-03

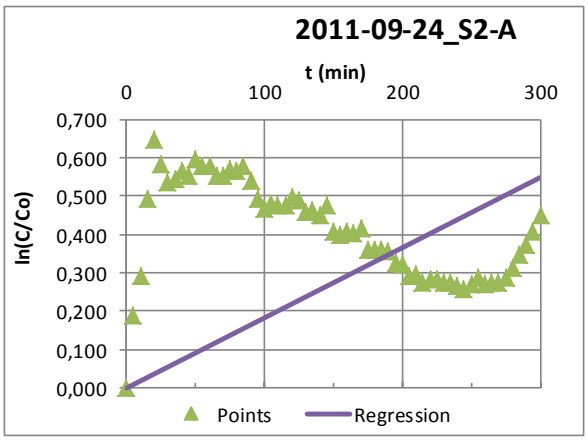
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-26		
Température (°C)	7,0		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	9,085	9,085	9,085
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,32E-04	-9,50E-04	-5,11E-04
Flux (moles/m^2/an)	**170**	**463**	**264**
Durée du test (h)	5,0	3,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,95	3,02	2,93
Pente:			
m	-0,00033	-0,00095	-0,00051
b	0	0	0
R^2	0,9983	0,9897	0,9940

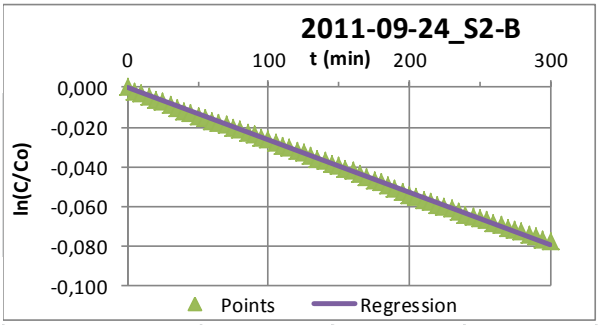


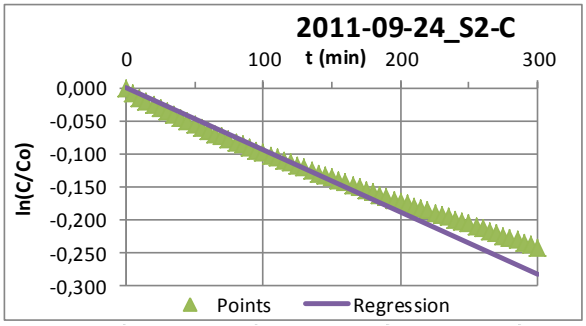




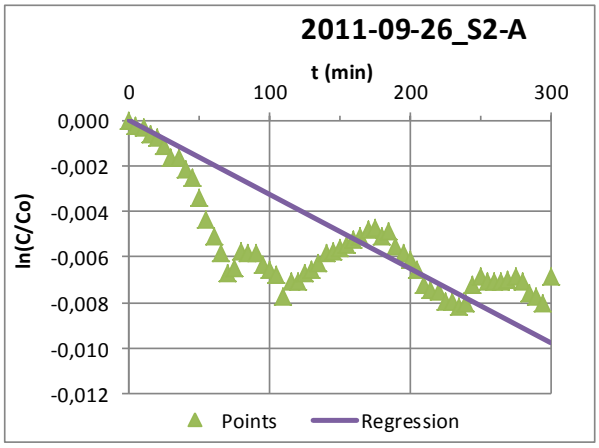
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-24		
Température (°C)	3,3		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	-	9,207	9,207
Pente (ln (C/C0)-t)	-	-2,65E-04	-9,42E-04
Flux (moles/m^2/an)	**-**	**131**	**492**
Durée du test (h)	-	5,0	2,9
Baisse d'O_2 (%)	-	1,57	3,00
Pente:			
m	0,00183	-0,00026	-0,00094
b	0	0	0
R^2	0,2918	0,9994	0,9940

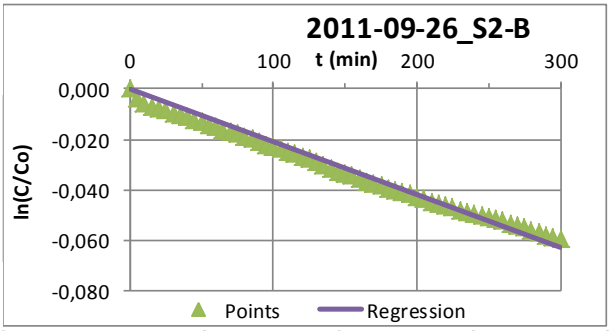


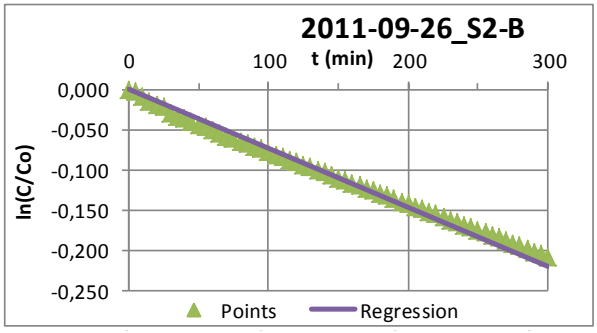




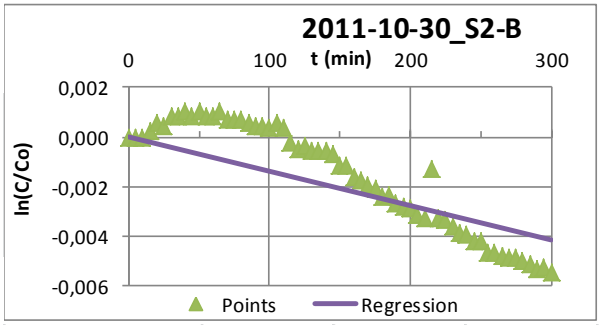
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-26		
Température (°C)	-1,0		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	9,352	9,352	9,352
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,25E-05	-2,10E-04	-7,32E-04
Flux (moles/m^2/an)	**17**	**105**	**389**
Durée du test (h)	5,0	5,0	3,7
Baisse d'O_2 (%)	0,14	1,21	3,00
Pente:			
m	-0,00003	-0,00021	-0,00073
b	0	0	0
R^2	0,5920	0,9971	0,9968

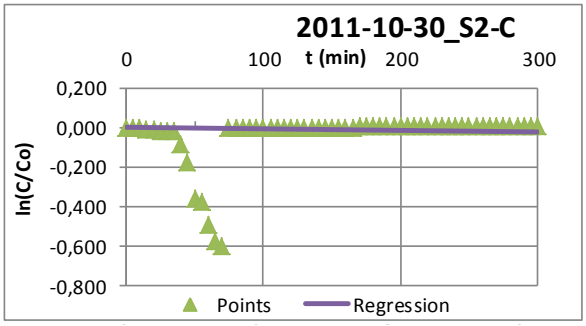




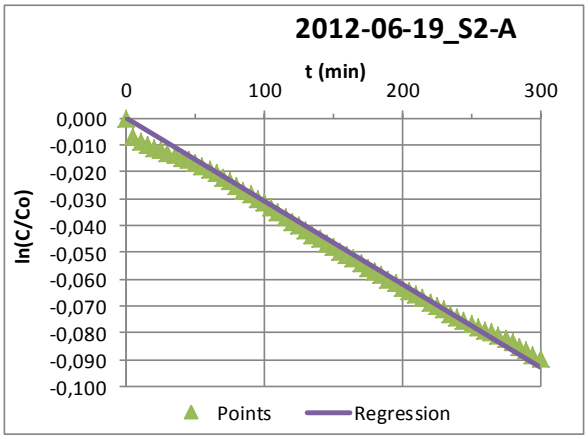


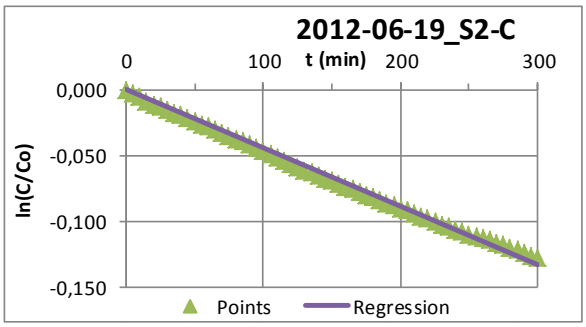
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-30		
Température (°C)	-7,7		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	-	9,588	9,588
Pente (ln (C/C0)-t)	-	-1,39E-05	-7,87E-05
Flux (moles/m^2/an)	**-**	**7**	**43**
Durée du test (h)	-	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	-	0,11	-0,05
Pente:			
m	-	-0,00001	-0,00008
b	-	0	0
R^2		0,8994	0,1258



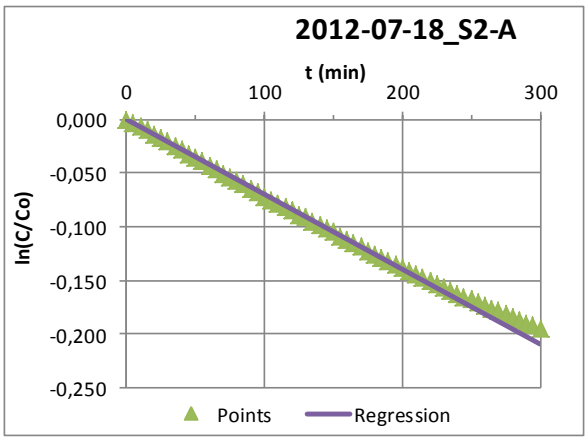


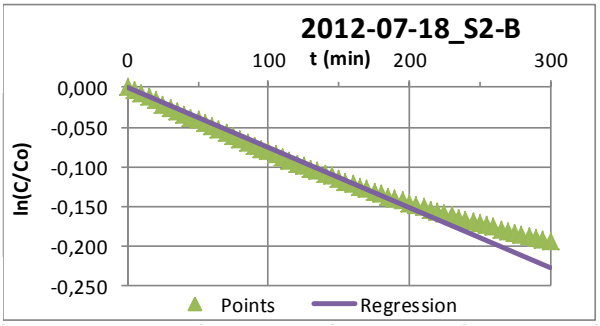
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-19		
Température (°C)	4,9		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	9,154	-	9,154
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,09E-04	-	-4,42E-04
Flux (moles/m^2/an)	**159**	**-**	**230**
Durée du test (h)	5,0	-	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,79	-	2,51
Pente:			
m	-0,00031	-	-0,00044
b	0	-	0
R^2	0,9977	-	0,9980

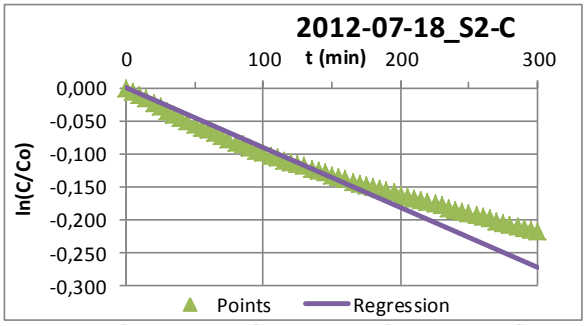




Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-18		
Température (°C)	13,5		
Paramètres:	S2-A	S2-B	S2-C
C_0 (mole/m^3)	8,879	8,879	8,879
Pente (ln (C/C0)-t)	-6,97E-04	-7,59E-04	-9,07E-04
Flux (moles/m^2/an)	**348**	**361**	**457**
Durée du test (h)	3,8	3,6	3,1
Baisse d'O_2 (%)	2,98	2,99	2,98
Pente:			
m	-0,00070	-0,00076	-0,00091
b	0	0	0
R^2	0,9994	0,9959	0,9869



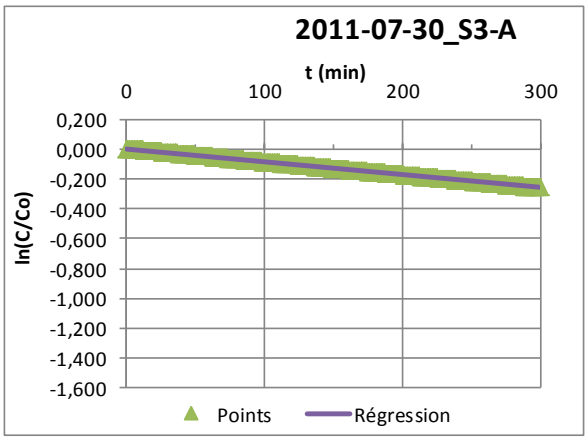


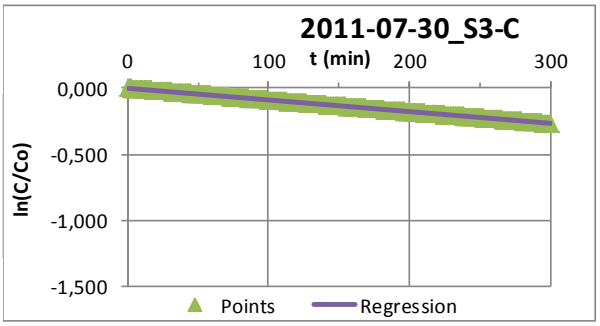


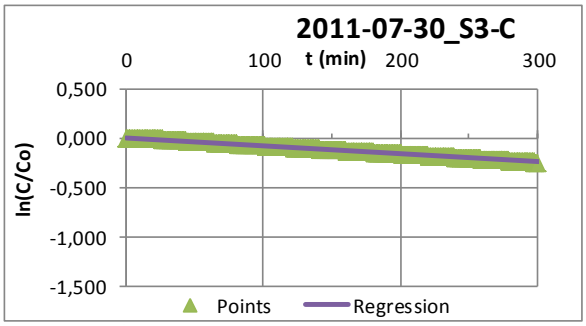
Station S3

Géométrie :			
	S3-A	S3-B	S3-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	139,0	133,0	142,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	2,54E-03	2,43E-03	2,59E-03

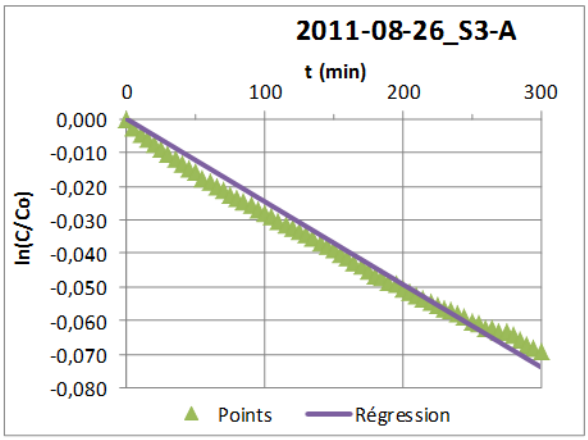
Identification:			
Date de l'essai:	2011-07-29		
Température (°C)	12,8		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	8,901	8,901	8,901
Pente (ln (C/C0)-t)	-8,53E-04	-8,84E-04	-7,92E-04
Flux (moles/m^2/an)	**555**	**550**	**526**
Durée du test (h)	3,0	2,9	3,2
Baisse d'O_2 (%)	2,99	2,99	2,96
Pente:			
m	-0,00085	-0,00088	-0,00079
b	0	0	0
R^2	0,9999	0,9998	0,9993

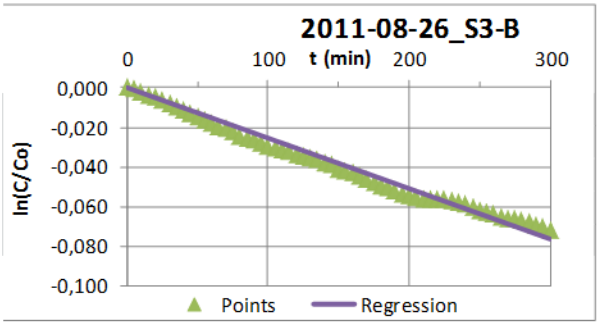


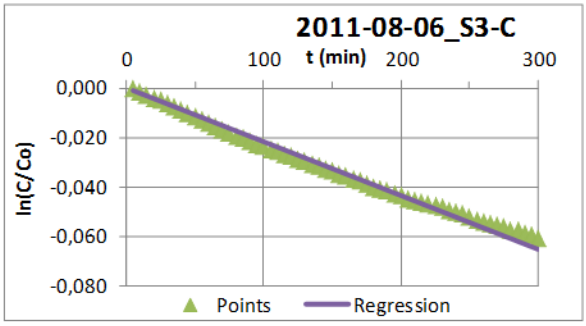




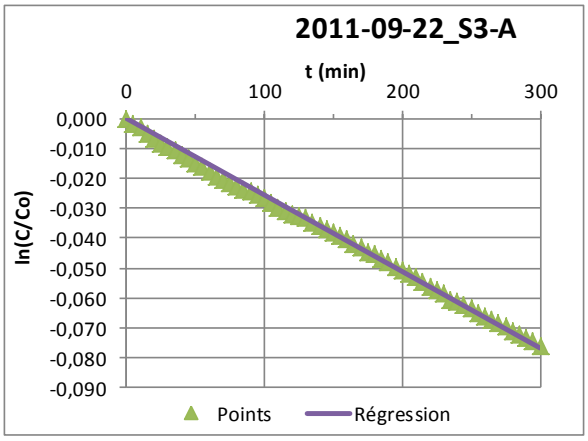
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-26		
Température (°C)	7,5		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,069	9,069	9,069
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,46E-04	-2,55E-04	-2,17E-04
Flux (moles/m^2/an)	**163**	**161**	**147**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,40	1,44	1,25
Pente:			
m	-0,00025	-0,00025	-0,00022
b	0	0	0
R^2	0,9944	0,9887	0,9941

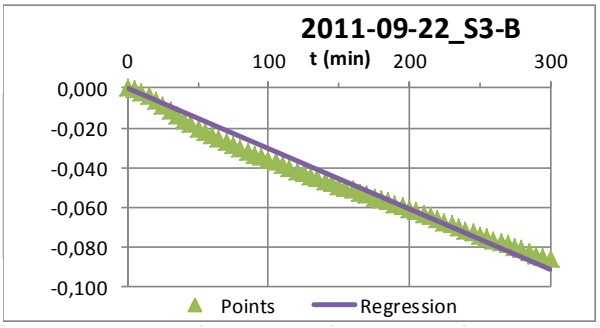


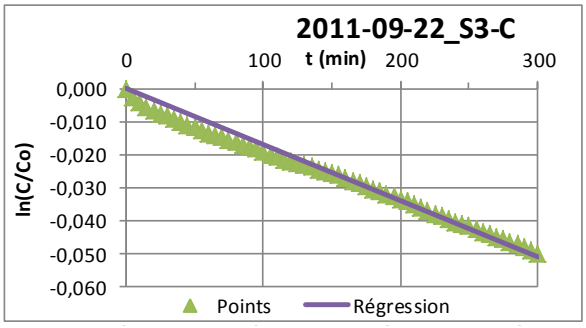




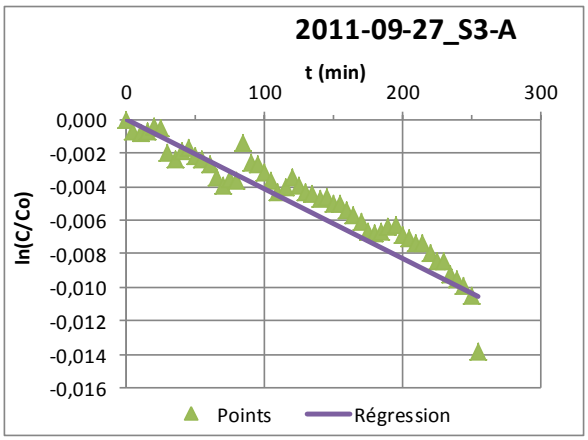
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-22		
Température (°C)	-1,8		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,380	9,380	9,380
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,56E-04	-3,05E-04	-1,70E-04
Flux (moles/m^2/an)	**175**	**200**	**119**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,53	1,73	1,01
Pente:			
m	-0,00026	-0,00030	-0,00017
b	0	0	0
R^2	0,9990	0,9899	0,9975

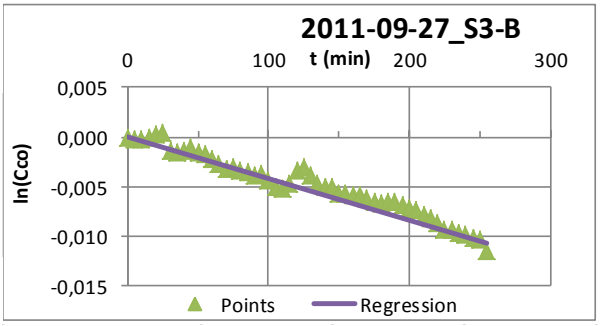




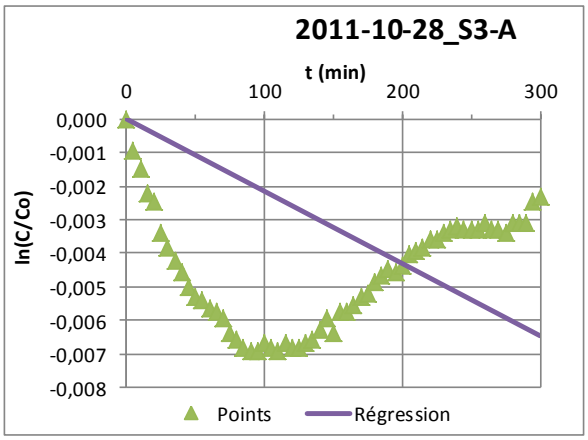


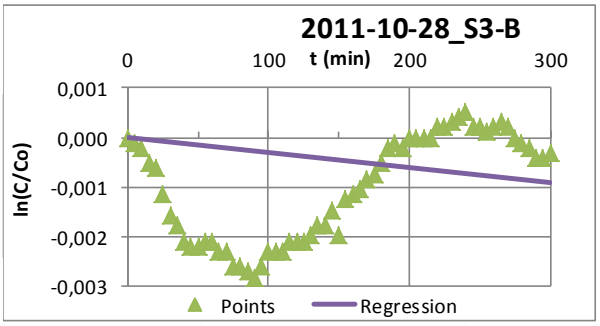
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-27		
Température (°C)	-0,3		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,328	9,328	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,13E-05	-4,21E-05	-
Flux (moles/m^2/an)	**28**	**27**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,29	0,32	-
Pente:	0,66	0,72	
m	-0,00004	-0,00004	-
b	0	0	-
R^2	0,9188	0,9533	-



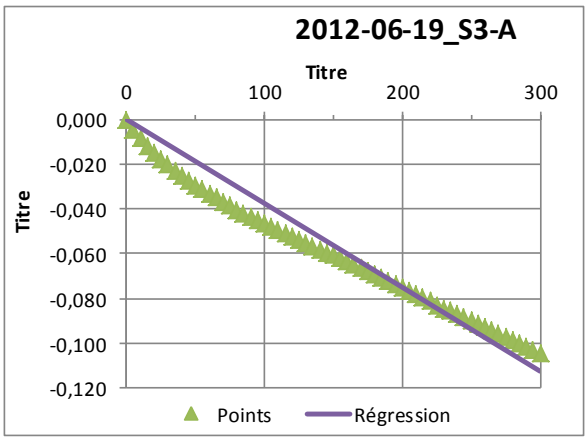


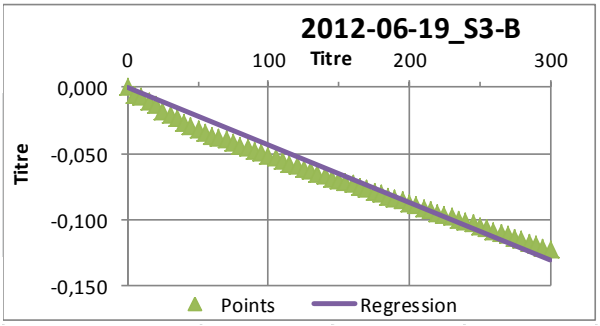
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-28		
Température (°C)	-8,4		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,614	9,614	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,15E-05	-3,04E-06	-
Flux (moles/m^2/an)	**15**	**2**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	-
Baisse d'O_2 (%)	0,05	0,01	-
Pente:			
m	-0,00002	0,00000	-
b	0	0	-
R^2	0,0517	0,4061	-

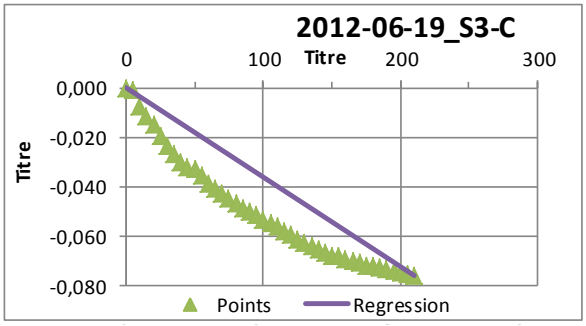




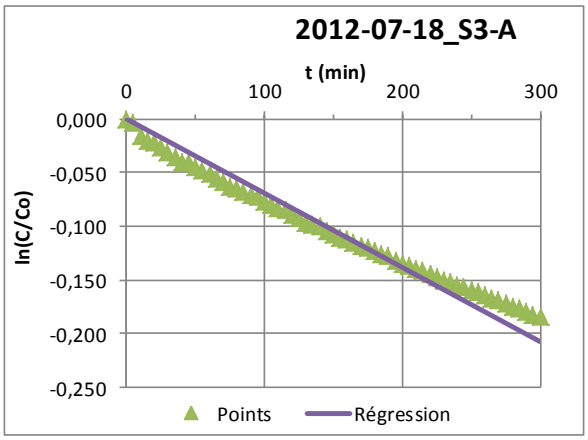
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-19		
Température (°C)	4,4		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,170	9,170	9,170
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,75E-04	-4,36E-04	-3,61E-04
Flux (moles/m^2/an)	**251**	**279**	**247**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,08	2,42	1,75
Pente:	4,74	5,255	3,81
m	-0,00037	-0,00044	-0,00036
b	0	0	0
R^2	0,9899	0,9926	0,9075

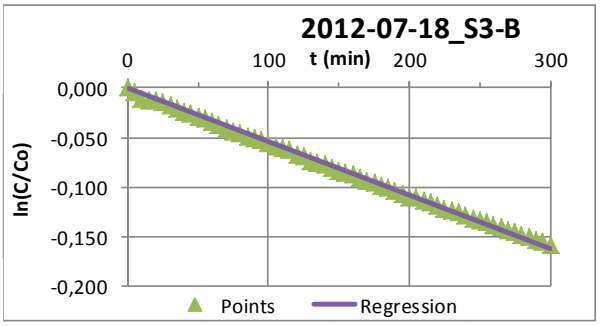


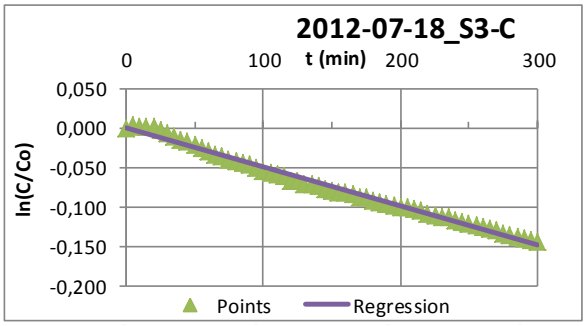




Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-18		
Température (°C)	7,7		
Paramètres:	S3-A	S3-B	S3-C
C_0 (mole/m^3)	9,063	9,063	9,063
Pente (ln (C/C0)-t)	-6,91E-04	-5,41E-04	-4,93E-04
Flux (moles/m^2/an)	**457**	**343**	**333**
Durée du test (h)	4,0	4,8	5,0
Baisse d'O_2 (%)	3,00	2,96	2,79
Pente:			
m	-0,00069	-0,00054	-0,00049
b	0	0	0
R^2	0,9934	0,9992	0,9911



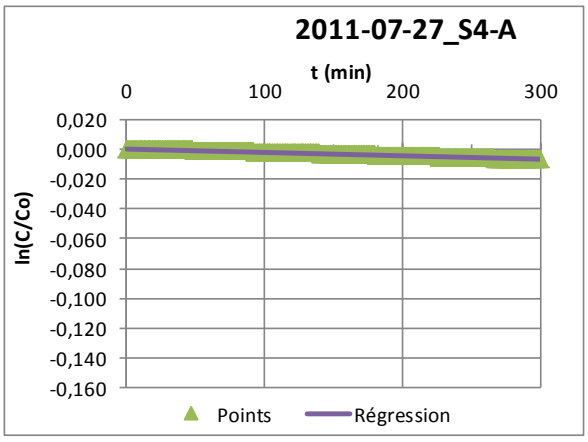


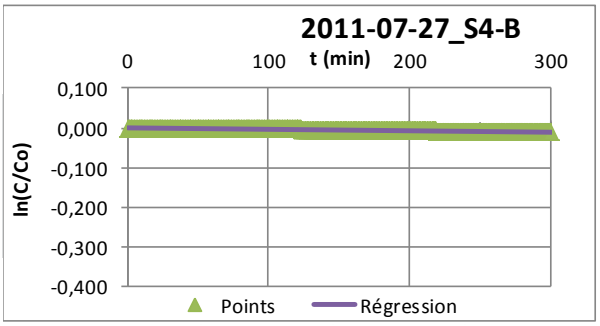


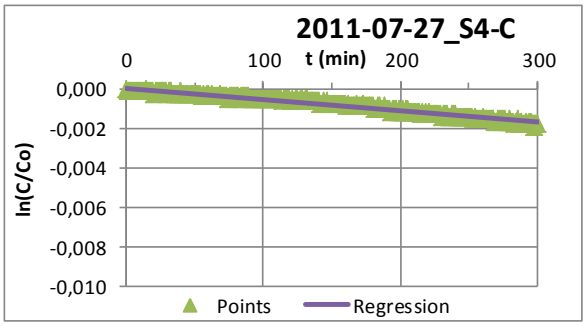
Station S4

Géométrie :			
	S4-A	S4-B	S4-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	222,0	206,0	229,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	4,05E-03	3,76E-03	4,18E-03

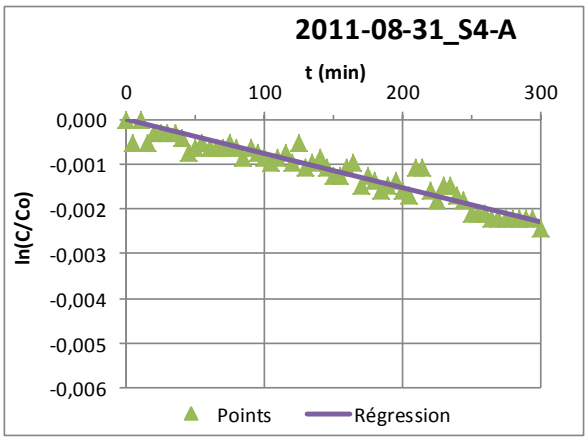
Identification:			
Date de l'essai:	2011-07-27		
Température (°C)	1,1		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,281	9,281	9,281
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,25E-05	-3,67E-05	-5,64E-06
Flux (moles/m^2/an)	**24**	**37**	**6**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,15	0,24	0,04
Pente:			
m	-0,00002	-0,00004	-0,00001
b	0	0	0
R^2	0,9978	0,9958	0,9742

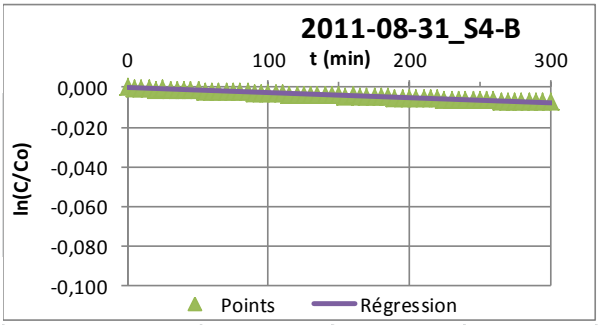


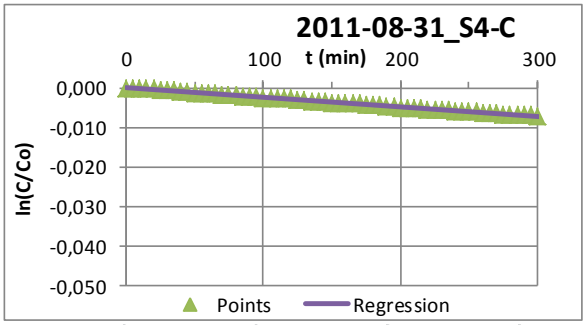




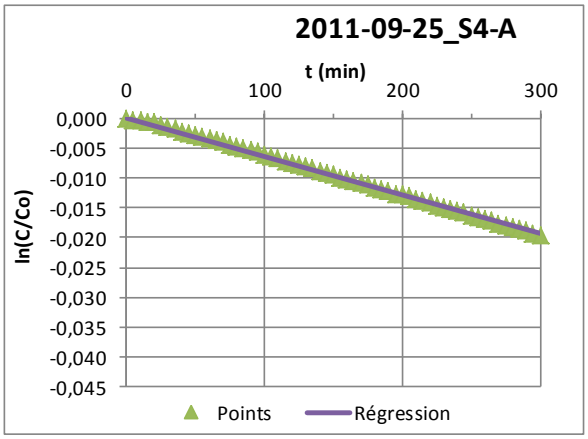
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-31		
Température (°C)	1,4		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,271	9,271	9,271
Pente (ln (C/C0)-t)	-7,62E-06	-2,58E-05	-2,43E-05
Flux (moles/m^2/an)	**8**	**26**	**27**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,05	0,15	0,15
Pente:			
m	-0,00001	-0,00003	-0,00002
b	0	0	0
R^2	0,9138	0,9935	0,9982

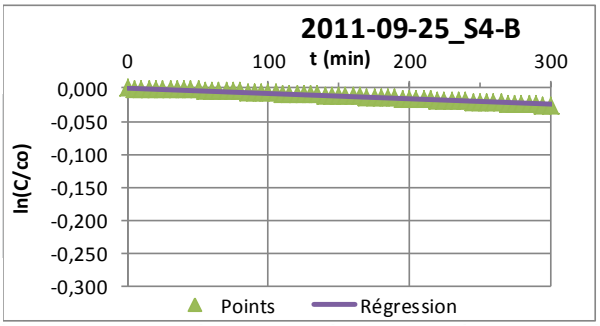


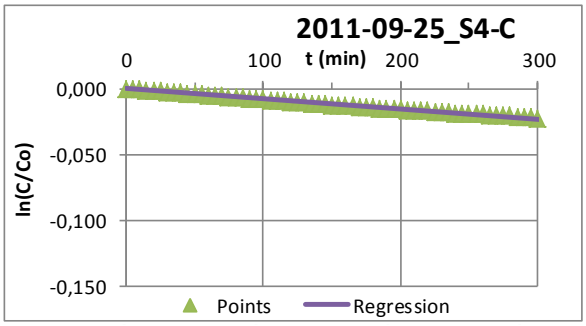




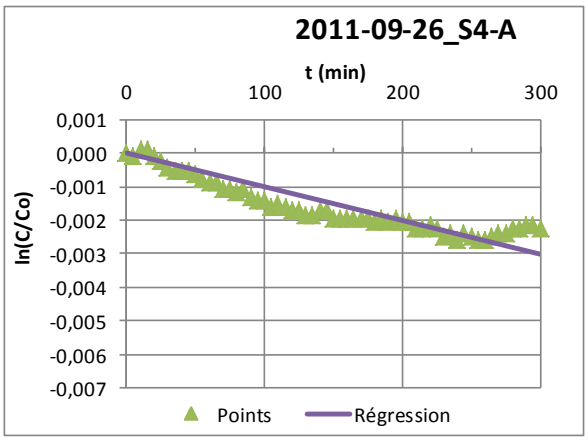
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-25		
Température (°C)	0,1		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,315	9,315	9,315
Pente (ln (C/C0)-t)	-6,43E-05	-8,01E-05	-7,82E-05
Flux (moles/m^2/an)	**70**	**81**	**88**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,40	0,53	0,46
Pente:			
m	-0,00006	-0,00008	-0,00008
b	0	0	0
R^2	0,9995	0,9952	0,9956

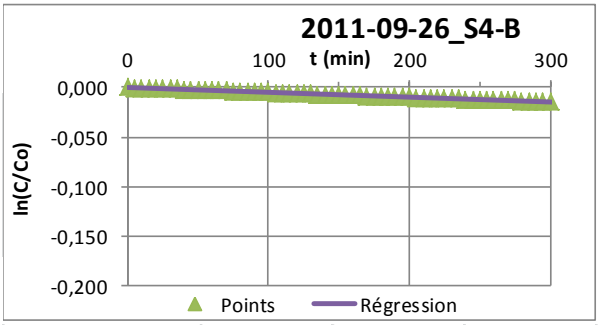


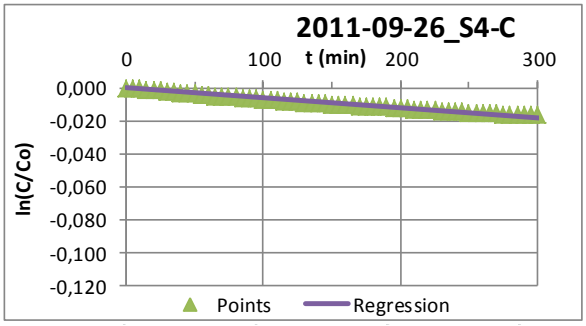




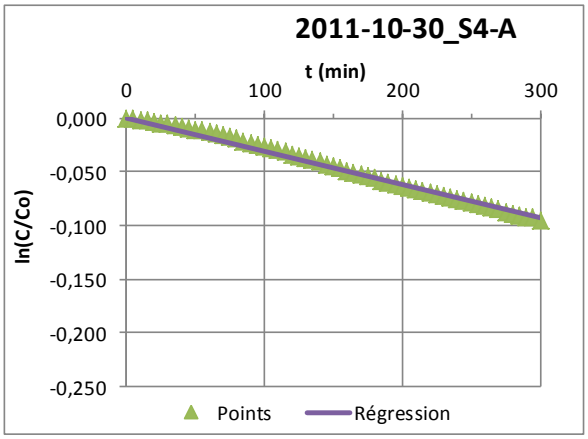
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-26		
Température (°C)	0,1		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,315	9,315	9,315
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,00E-05	-4,89E-05	-6,11E-05
Flux (moles/m^2/an)	**11**	**49**	**68**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,05	0,30	0,35
Pente:			
m	-0,00001	-0,00005	-0,00006
b	0	0	0
R^2	0,8738	0,9974	0,9890

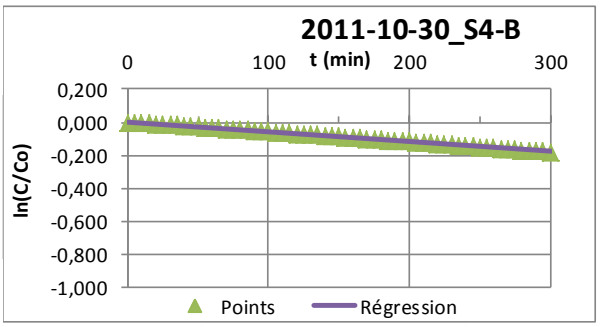




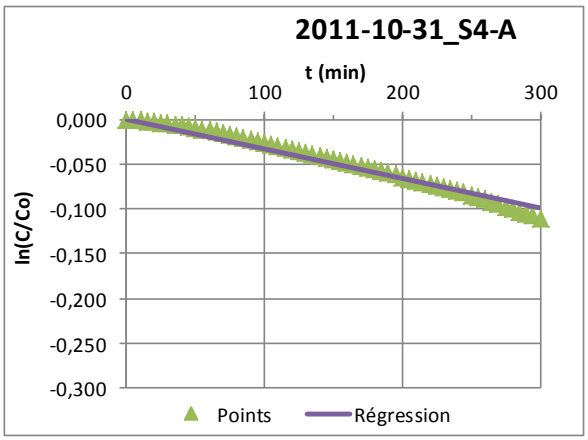


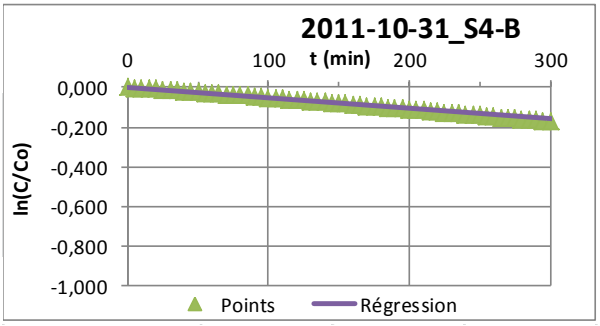
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-30		
Température (°C)	-0,8		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,346	9,346	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,09E-04	-5,85E-04	-
Flux (moles/m^2/an)	**337**	**592**	**-**
Durée du test (h)	5,0	2,8	-
Baisse d'O_2 (%)	1,89	2,00	-
Pente:			
m	-0,00031	-0,00058	-
b	0	0	-
R^2	0,9974	0,9997	-



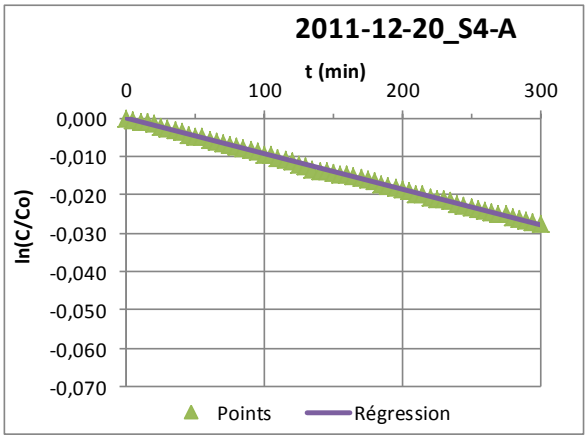


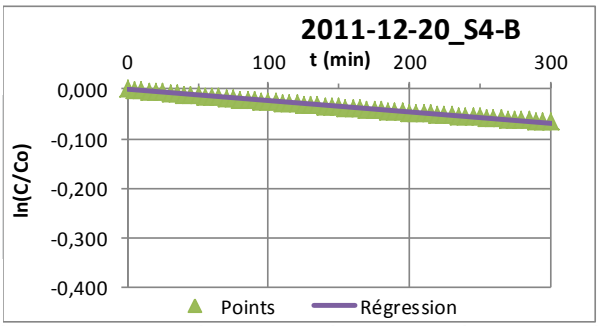
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-31		
Température (°C)	-0,9		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,349	9,349	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,29E-04	-5,24E-04	-
Flux (moles/m^2/an)	**359**	**530**	**-**
Durée du test (h)	5,0	3,1	-
Baisse d'O_2 (%)	2,18	2,00	-
Pente:			
m	-0,00033	-0,00052	-
b	0	0	-
R^2	0,9910	0,9979	-

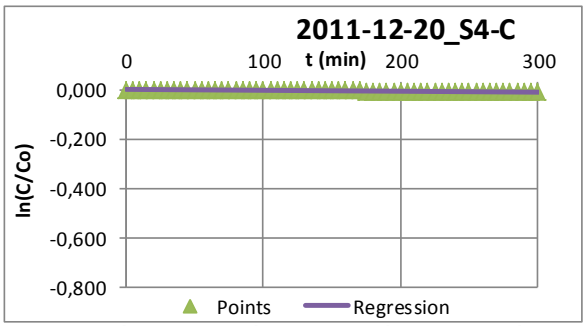




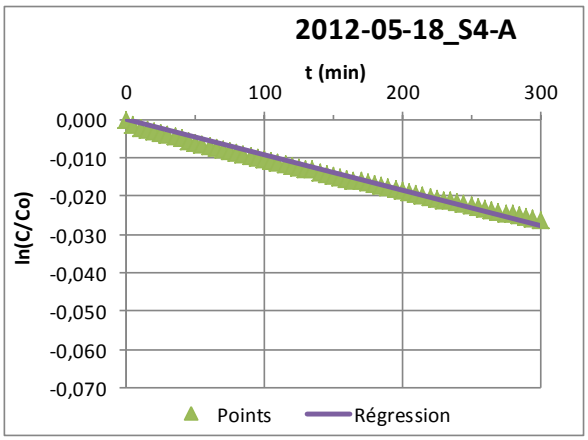
Identification:			
Date de l'essai:	2011-12-20		
Température (°C)	-7,1		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,567	9,567	9,567
Pente (ln (C/C0)-t)	-9,26E-05	-2,30E-04	-3,79E-05
Flux (moles/m^2/an)	**103**	**238**	**44**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,56	1,33	0,23
Pente:			
m	-0,00009	-0,00023	-0,00004
b	0	0	0
R^2	0,9991	0,9966	0,9940

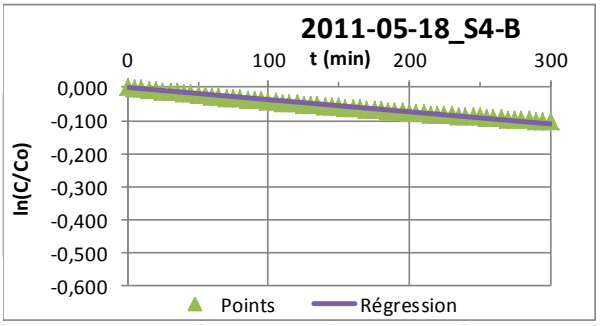


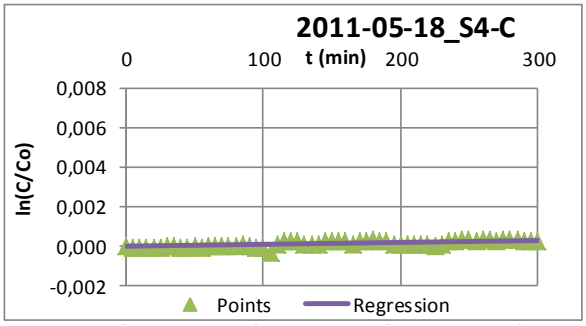




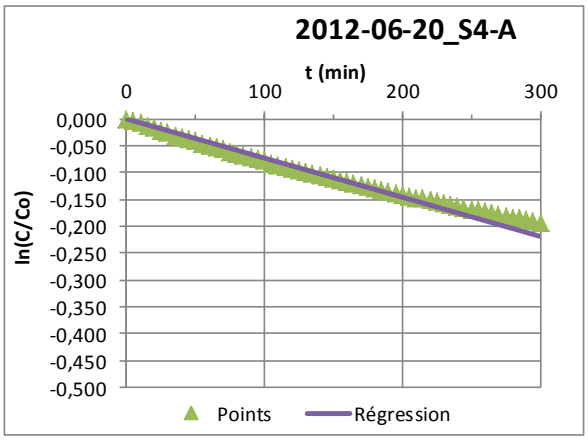
Identification:			
Date de l'essai:	2012-05-18		
Température (°C)	-4,0		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,457	9,457	9,457
Pente (ln (C/C0)-t)	-9,21E-05	-3,69E-04	9,51E-07
Flux (moles/m^2/an)	**102**	**377**	**0**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,54	2,03	0,00
Pente:	1,11	3,975	-0,01
m	-0,00009	-0,00037	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9976	0,9909	0,6051

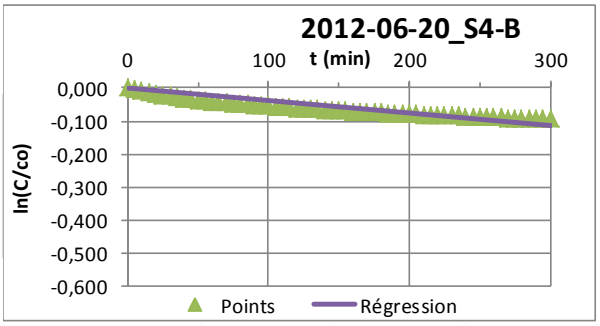


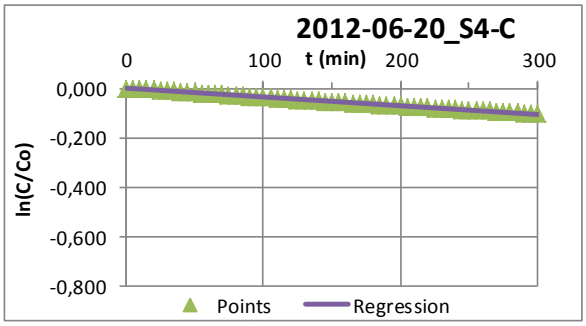




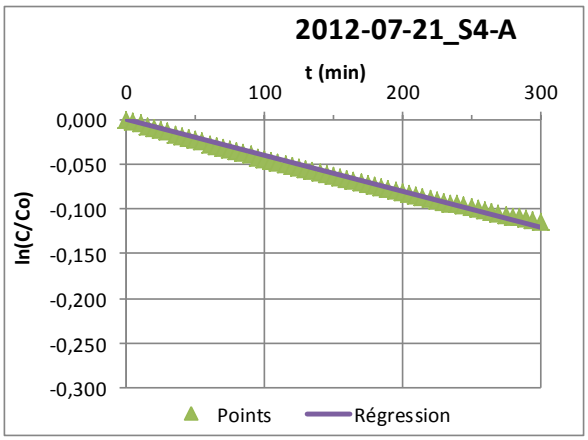
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-20		
Température (°C)	-0,60		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,339	9,339	9,339
Pente (ln (C/C0)-t)	-7,28E-04	-3,79E-04	-3,55E-04
Flux (moles/m^2/an)	**793**	**383**	**399**
Durée du test (h)	3,8	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,99	1,89	2,05
Pente:			
m	-0,00073	-0,00038	-0,00035
b	0	0	0
R^2	0,9949	0,9320	0,9979

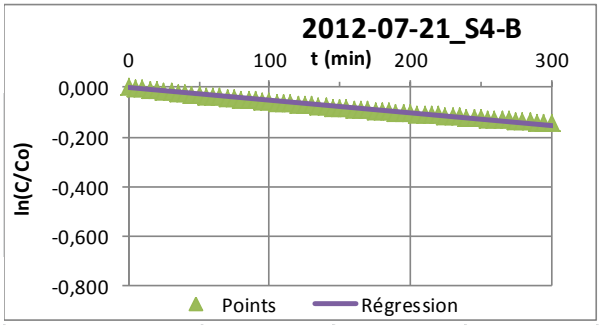


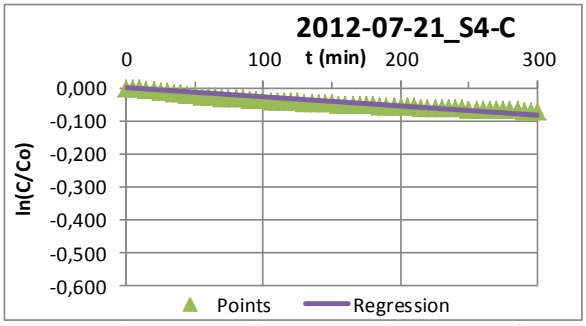




Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-21		
Température (°C)	-0,10		
Paramètres:	S4-A	S4-B	S4-C
C_0 (mole/m^3)	9,322	9,322	9,322
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,01E-04	-5,13E-04	-2,78E-04
Flux (moles/m^2/an)	**436**	**518**	**312**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,26	2,80	1,44
Pente:			
m	-0,00040	-0,00051	-0,00028
b	0	0	0
R^2	0,9968	0,9934	0,9499



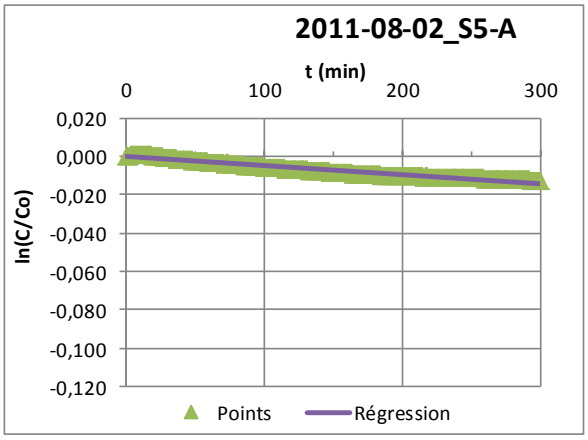


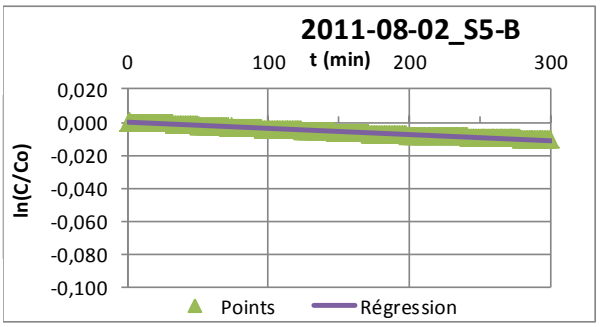


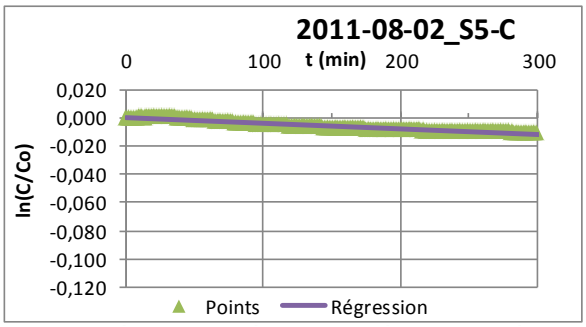
Station S5

Géométrie :			
	S5-A	S5-B	S5-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	128,0	110,0	107,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	2,33E-03	2,01E-03	1,95E-03

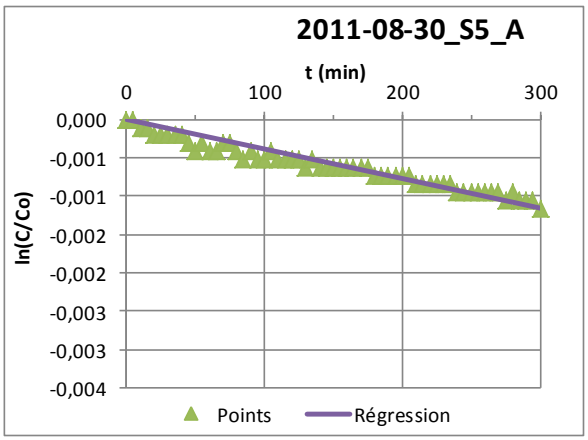
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-02		
Température (°C)	12,5		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	8,910	8,910	8,910
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,75E-05	-3,76E-05	-3,98E-05
Flux (moles/m^2/an)	**28**	**19**	**20**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,26	0,22	0,22
Pente:			
m	-0,00005	-0,00004	-0,00004
b	0	0	0
R^2	0,9544	0,9877	0,9406

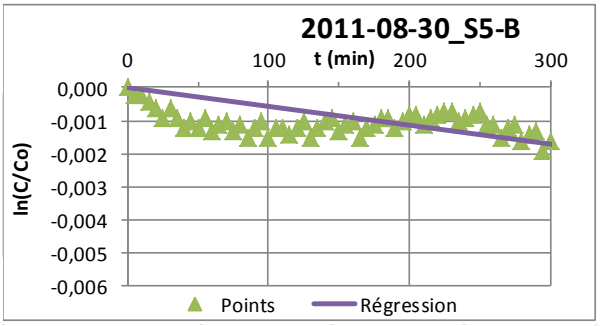


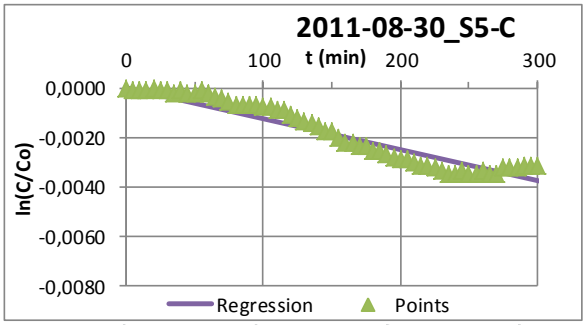




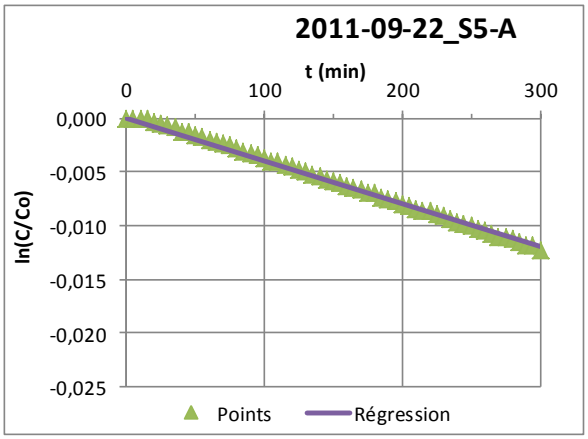
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-30		
Température (°C)	1,8		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,257	9,257	9,257
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,85E-06	-5,70E-06	-1,25E-05
Flux (moles/m^2/an)	**2**	**3**	**7**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,02	0,03	0,07
Pente:			
m	-0,00005	-0,00001	-0,00001
b	0	0	0
R^2	0,9544	0,1647	0,9403

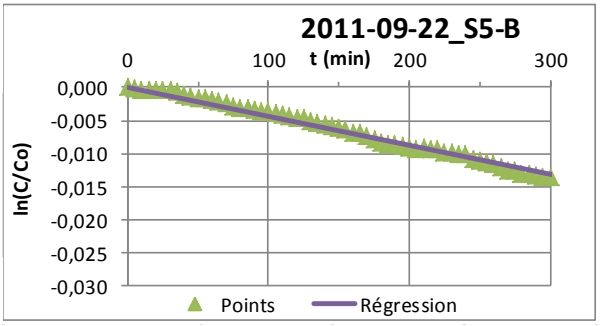


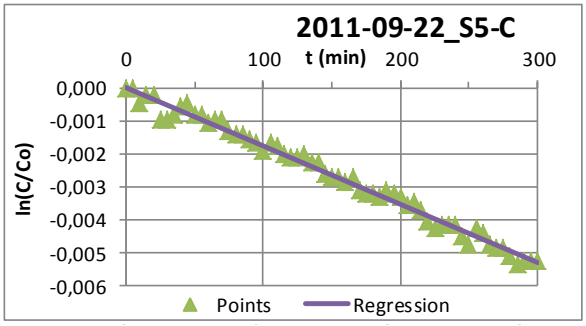




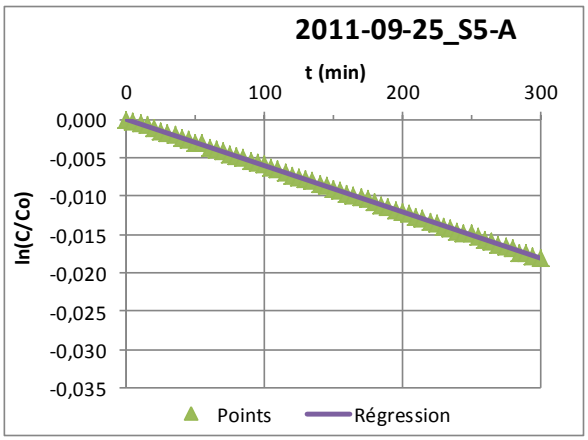
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-22		
Température (°C)	0,3		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,308	9,308	9,308
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,97E-05	-4,38E-05	-1,77E-05
Flux (moles/m^2/an)	**25**	**24**	**9**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,25	0,28	0,11
Pente:			
m	-0,00004	-0,00004	-0,00002
b	0	0	0
R^2	0,9993	0,9948	0,9873

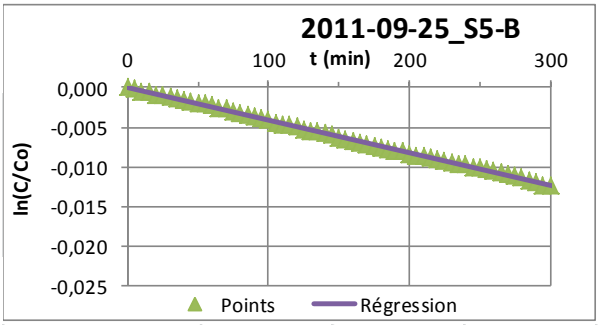


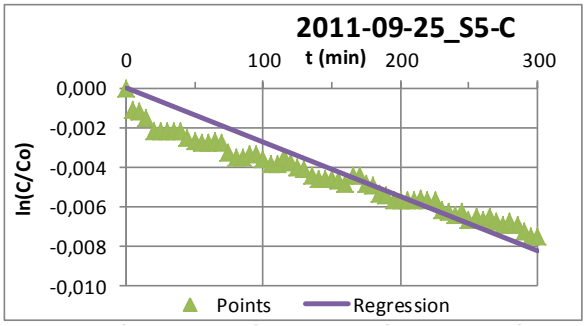




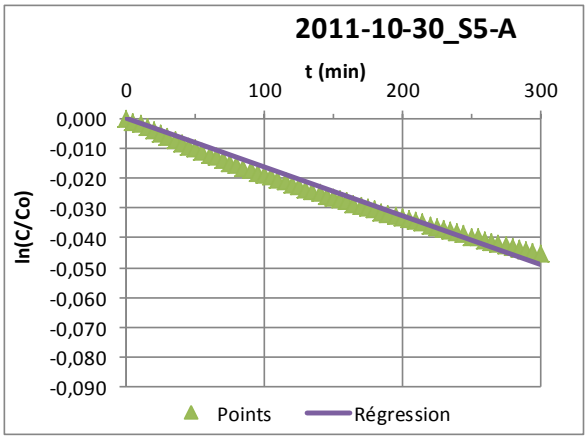
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-25		
Température (°C)	0,1		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,315	9,315	9,315
Pente (ln (C/C0)-t)	-6,02E-05	-4,11E-05	-2,74E-05
Flux (moles/m^2/an)	**38**	**22**	**1**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,37	0,26	0,16
Pente:			
m	-0,00006	-0,00004	-0,00003
b	0	0	0
R^2	0,9999	0,9988	0,9754

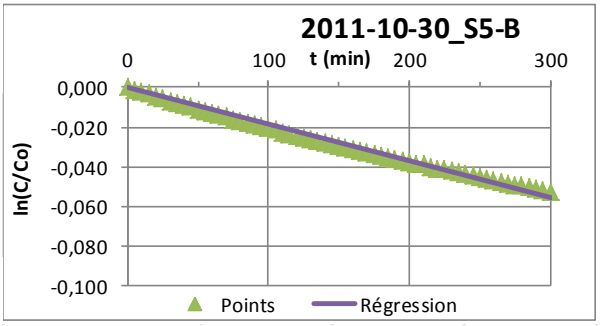


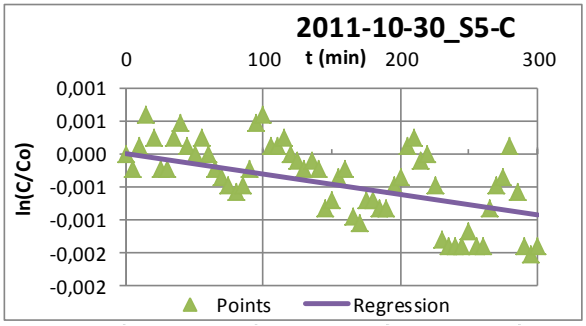




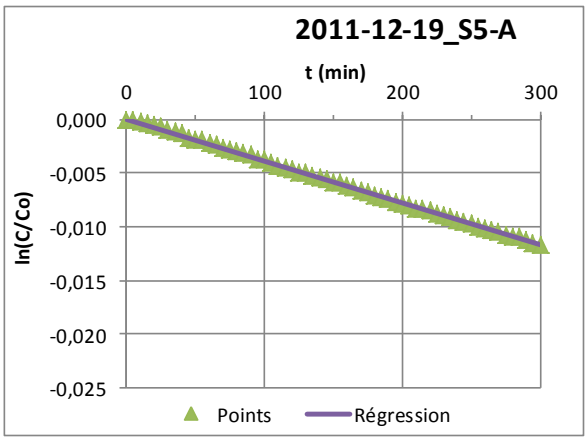
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-30		
Température (°C)	-0,8		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,346	9,346	9,346
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,63E-04	-1,85E-04	-3,09E-06
Flux (moles/m^2/an)	**103**	**100**	**2**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,91	1,08	0,03
Pente:			
m	-0,00016	-0,00019	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9916	0,9960	0,4371

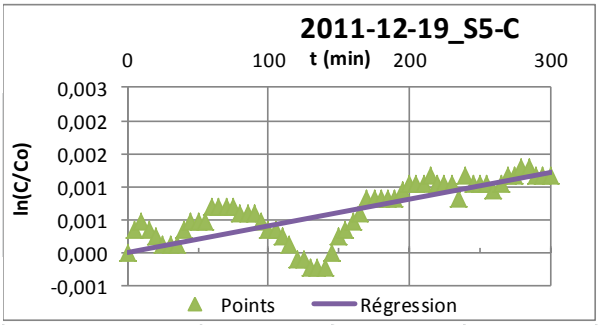


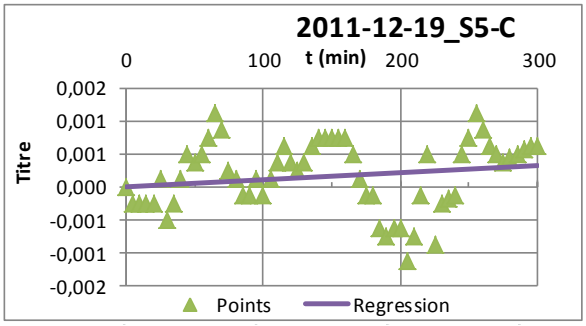




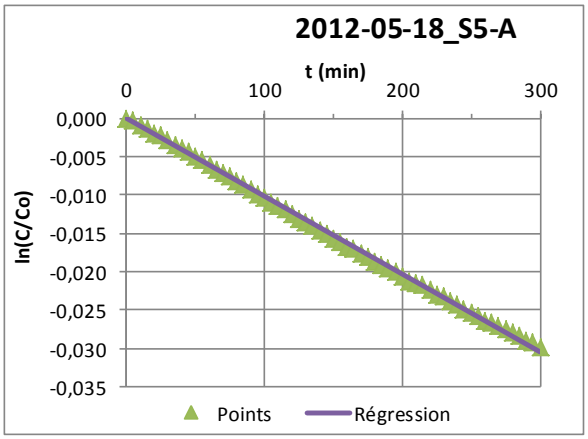
Identification:			
Date de l'essai:	2011-12-19		
Température (°C)	-7,0		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,563	9,563	9,563
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,88E-05	4,04E-06	1,07E-06
Flux (moles/m^2/an)	**25**	**0**	**0**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,24	-0,02	0,00
Pente:			
m	-0,00004	0,00000	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9995	0,5362	0,0151

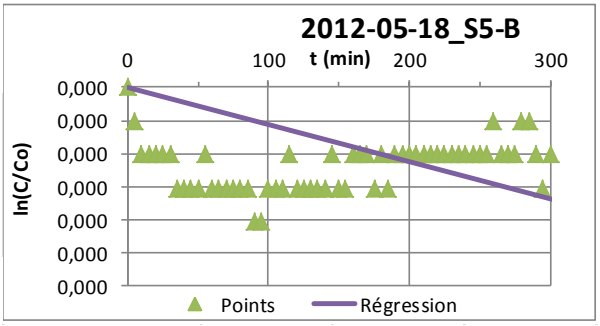


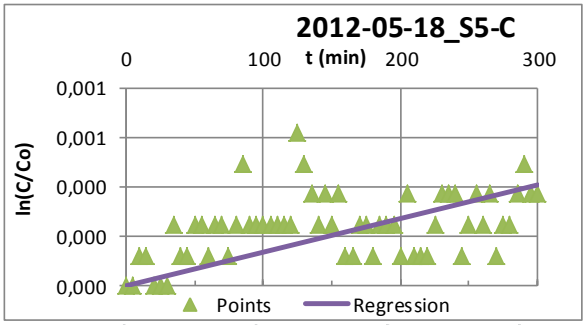




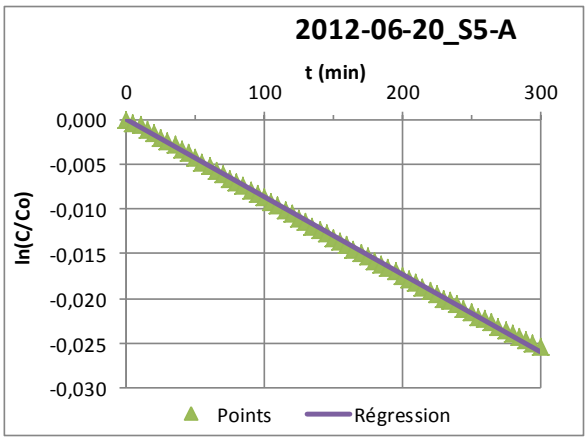
Identification:			
Date de l'essai:	2012-05-18		
Température (°C)	-3,6		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,443	9,443	9,443
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,01E-04	-2,25E-08	1,36E-06
Flux (moles/m^2/an)	**65**	**0**	**0**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,61	0,00	-0,01
Pente:			
m	-0,00010	0,00000	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9990	0,0777	0,1890

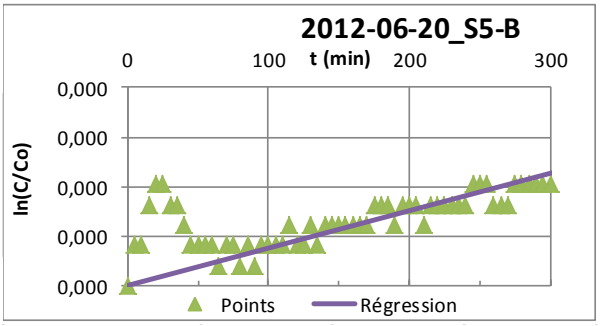


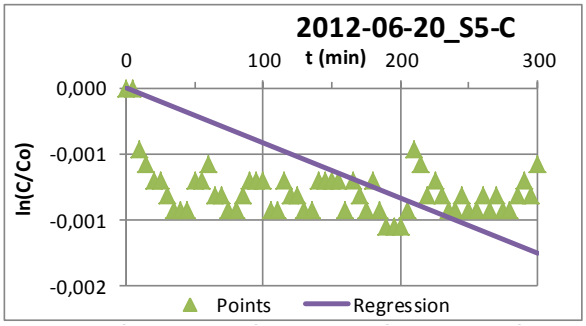




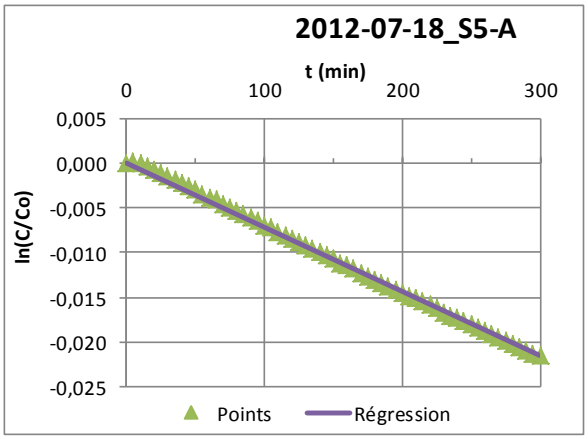
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-20		
Température (°C)	-0,9		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,349	9,349	9,349
Pente (ln (C/C0)-t)	-8,64E-05	3,78E-08	-4,17E-06
Flux (moles/m^2/an)	**54**	**0**	**2**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,52	0,00	0,01
Pente:			
m	-0,00009	0,00000	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9994	0,4405	0,1299

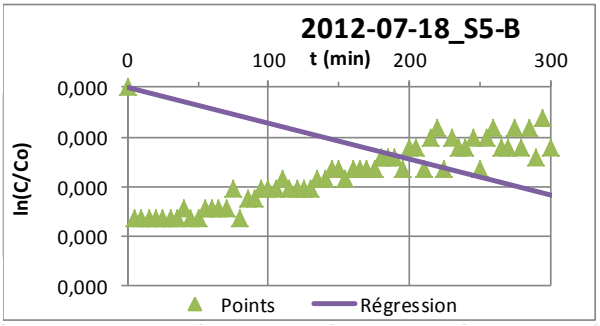


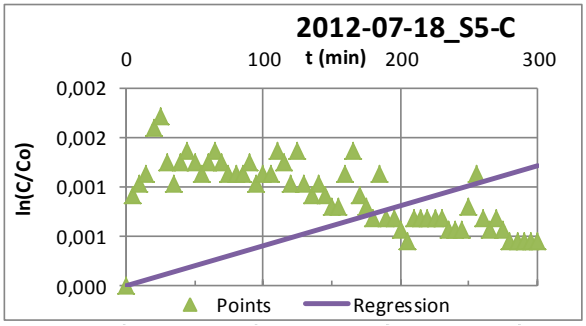




Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-18		
Température (°C)	1,7		
Paramètres:	S5-A	S5-B	S5-C
C_0 (mole/m^3)	9,261	9,261	9,261
Pente (ln (C/C0)-t)	-7,16E-05	-7,24E-08	4,04E-06
Flux (moles/m^2/an)	**45**	**0**	**0**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,44	0,00	-0,01
Pente:			
m	-0,00007	0,00000	0,00000
b	0	0	0
R^2	0,9995	0,6094	0,4438



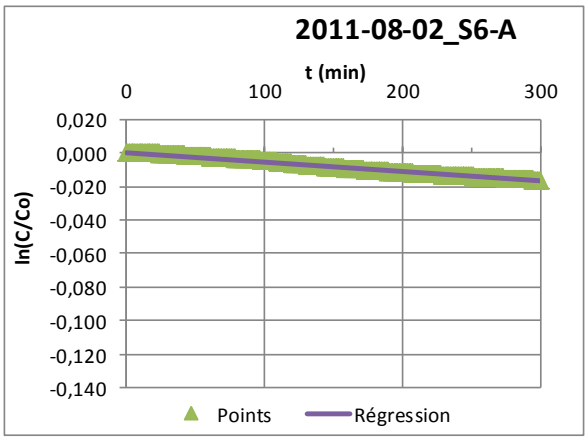


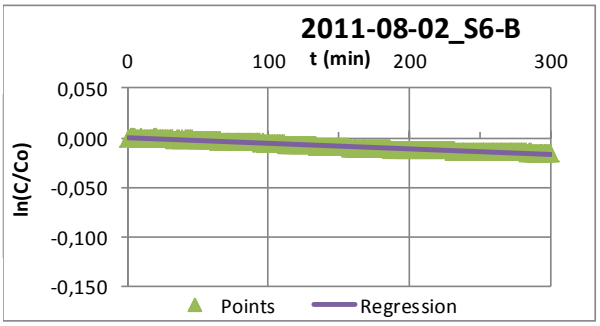


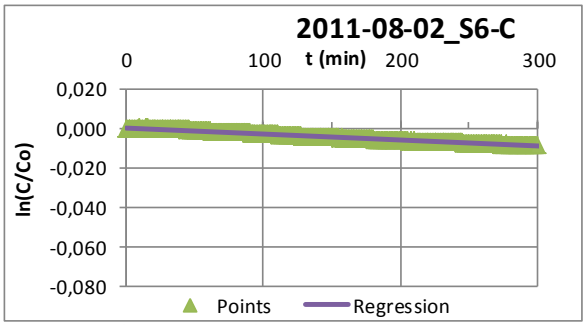
Station S6

Géométrie :			
	S6-A	S6-B	S6-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	186,0	217,0	175,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	3,39E-03	3,96E-03	3,19E-03

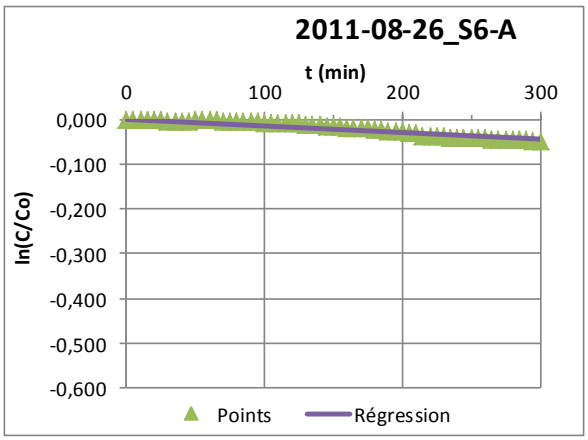
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-02		
Température (°C)	8,6		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,034	9,034	9,034
Pente (ln (C/C0)-t)	-5,56E-05	-5,62E-05	-3,01E-05
Flux (moles/m^2/an)	**49**	**58**	**25**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,34	0,32	0,19
Pente:			
m	-0,00006	-0,00006	-0,00003
b	0	0	0
R^2	0,9917	0,9735	0,9906

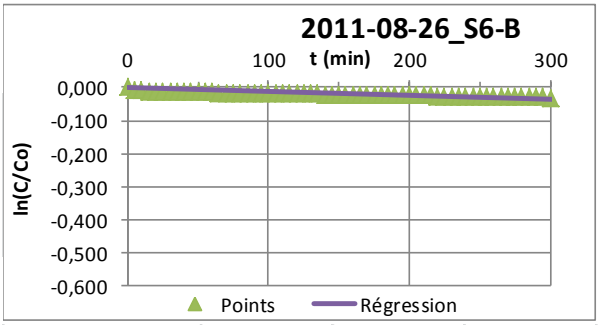


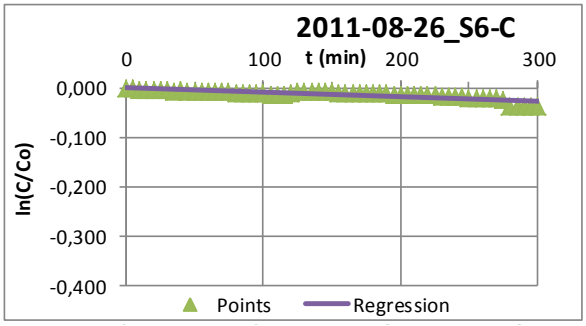




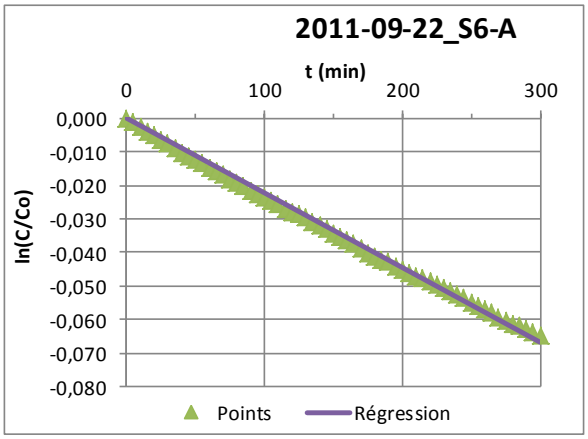
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-26		
Température (°C)	1,4		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,271	9,271	9,271
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,46E-04	-1,19E-04	-9,13E-05
Flux (moles/m^2/an)	**133**	**126**	**82**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,98	0,62	0,81
Pente:			
m	-0,00015	-0,00012	-0,00009
b	0	0	0
R^2	0,9435	0,9463	0,7150

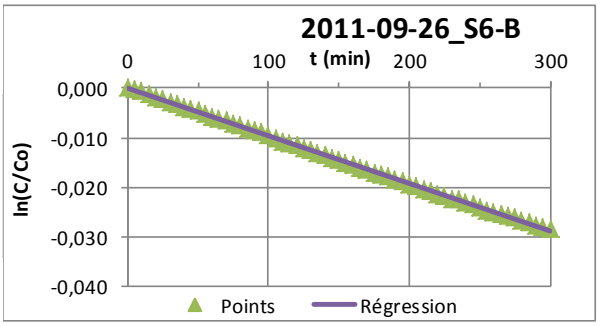


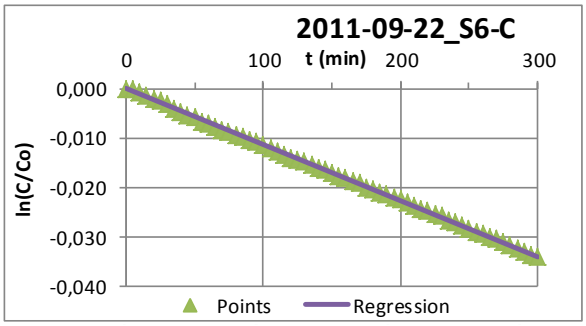




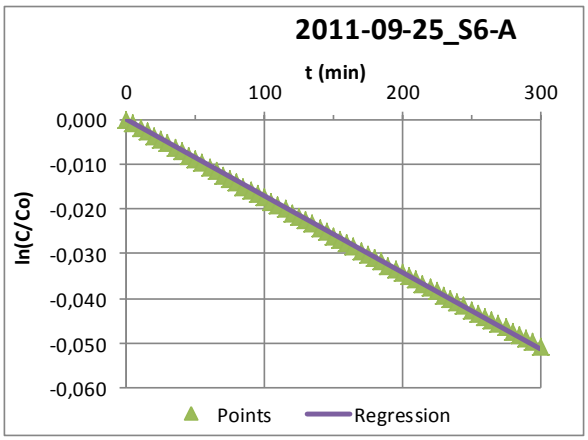
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-22		
Température (°C)	0,3		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,308	9,308	9,308
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,93E-04	-9,62E-05	-1,13E-04
Flux (moles/m^2/an)	**176**	**102**	**97**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,20	0,59	0,70
Pente:			
m	-0,00019	-0,00010	-0,00011
b	0	0	0
R^2	0,9921	0,9997	0,9996

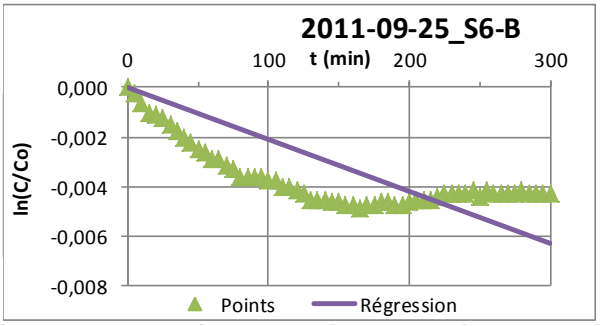


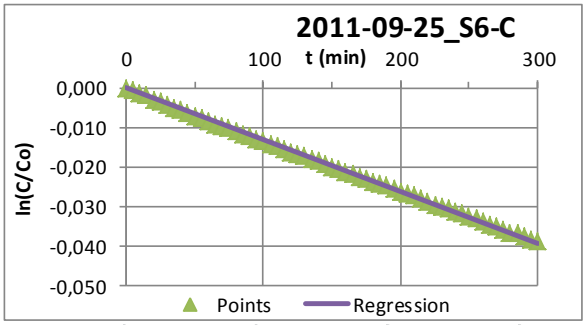




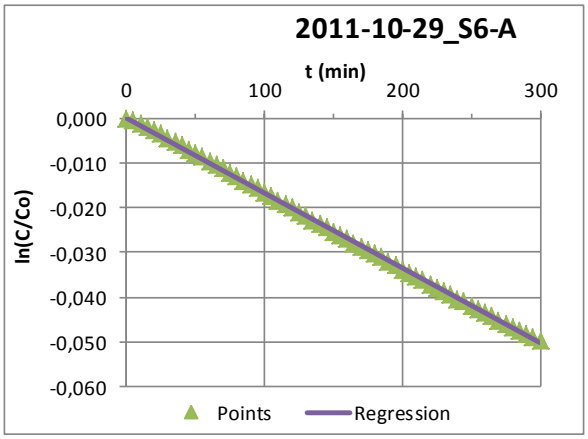
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-25		
Température (°C)	0,2		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,311	9,311	9,311
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,71E-04	-2,10E-05	-1,31E-04
Flux (moles/m^2/an)	**155**	**22**	**112**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,03	0,09	0,80
Pente:			
m	-0,00017	-0,00002	-0,00013
b	0	0	0
R^2	0,9998	0,5842	0,9997

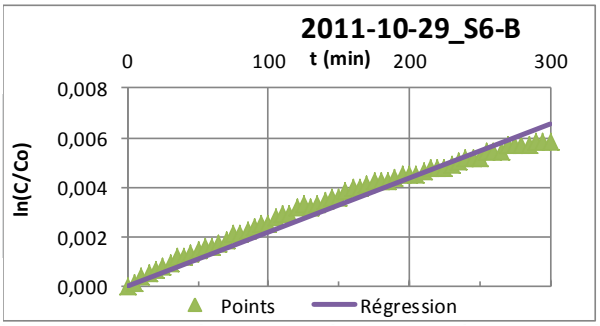


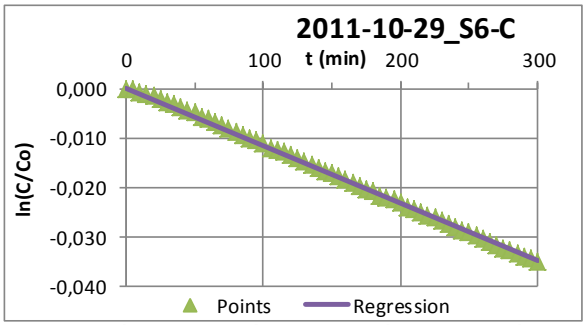




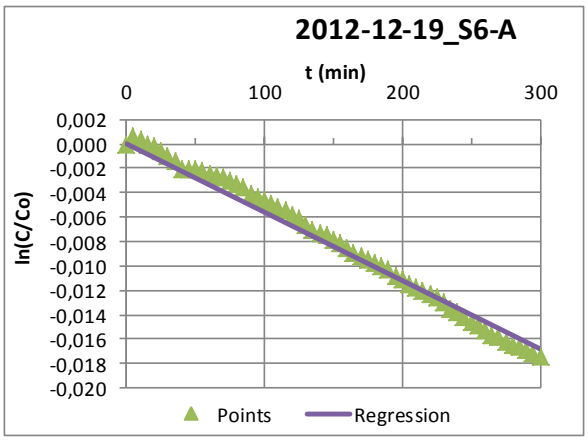
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-29		
Température (°C)	0,2		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,311	9,311	9,311
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,67E-04	-	-1,16E-04
Flux (moles/m^2/an)	**152**	**0**	**99**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	1,01	-	0,72
Pente:			
m	-0,00017	0,00002	-0,00012
b	0	0	0
R^2	0,9997	0,9830	0,9998

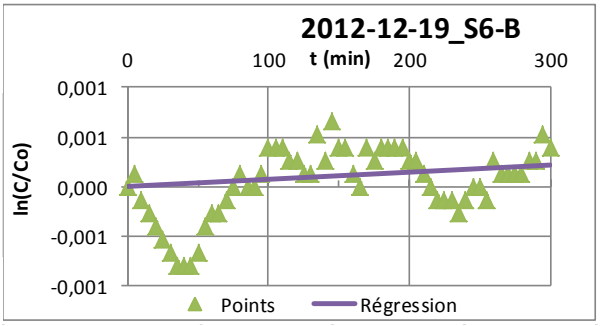


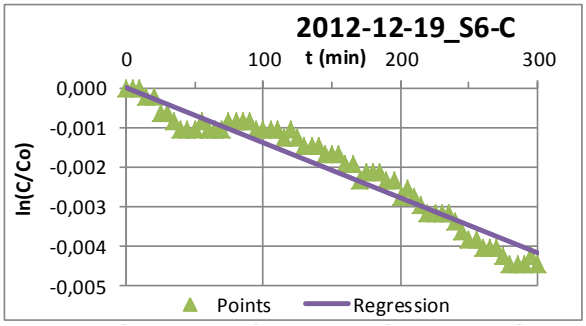




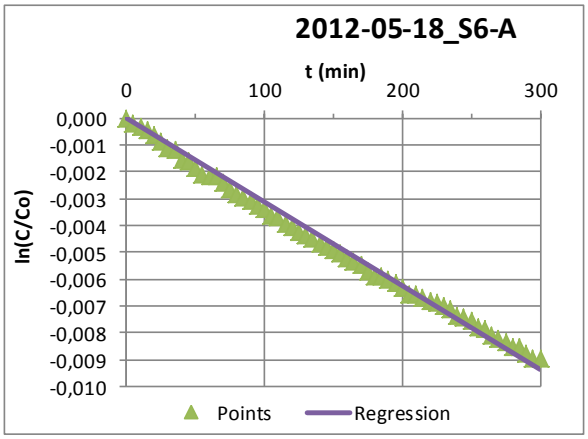
Identification:			
Date de l'essai:	2012-12-19		
Température (°C)	-7,60		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,585	9,585	9,585
Pente (ln (C/C0)-t)	-5,60E-05	7,19E-07	-1,39E-05
Flux (moles/m^2/an)	**52**	**0**	**12**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	0,36	-0,01	0,09
Pente:			
m	-0,00006	0,00000	-0,00001
b	0	0	0
R^2	0,9965	0,2312	0,9460

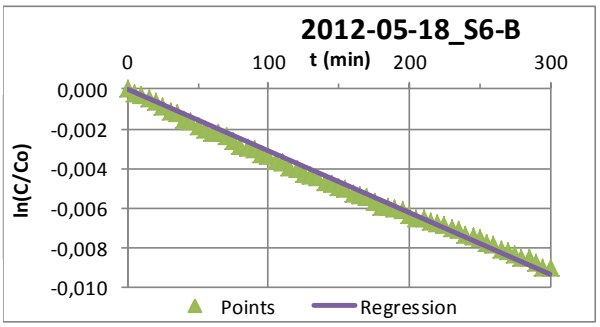




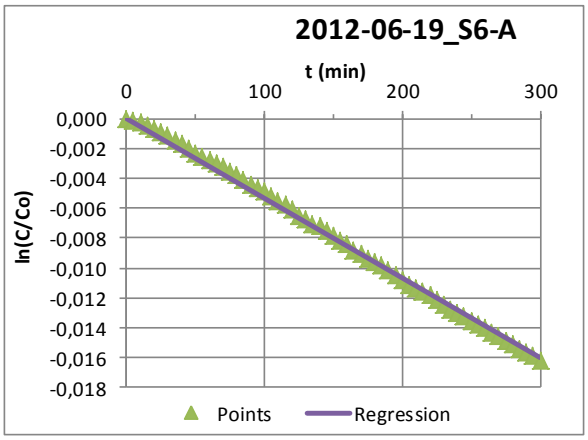


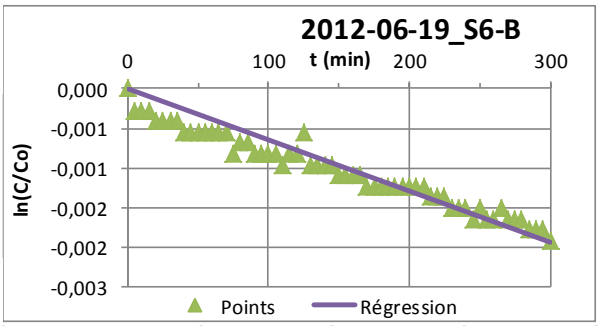
Identification:			
Date de l'essai:	2012-05-18		
Température (°C)	-4,50		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,474	9,474	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,12E-05	1,87E-07	-
Flux (moles/m^2/an)	**29**	**0**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	-
Baisse d'O_2 (%)	0,19	0,00	-
Pente:	0,41	0	
m	-0,00003	0,00000	-
b	0	0	-
R^2	0,9963	0,4038	-



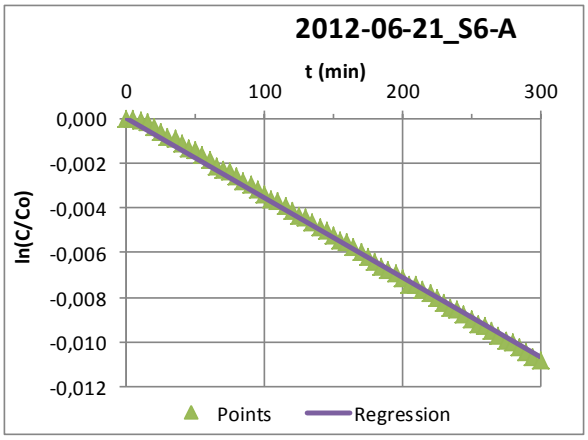


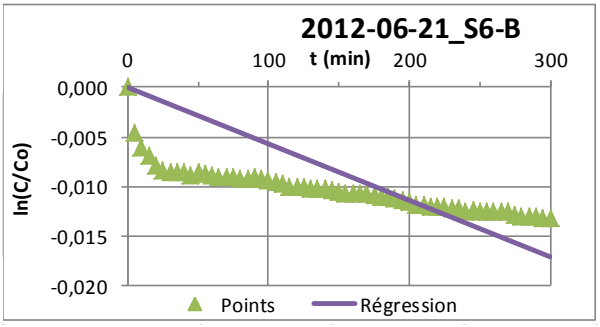
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-19		
Température (°C)	-1,70		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,377	9,377	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-5,34E-05	-6,47E-06	-
Flux (moles/m^2/an)	**49**	**7**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	-
Baisse d'O_2 (%)	0,34	0,04	-
Pente:	0,735	0,07	
m	-0,00005	-0,00001	-
b	0	0	-
R^2	0,9993	0,9696	-



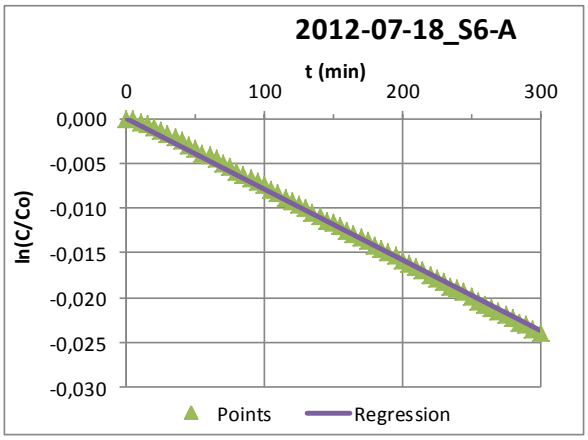


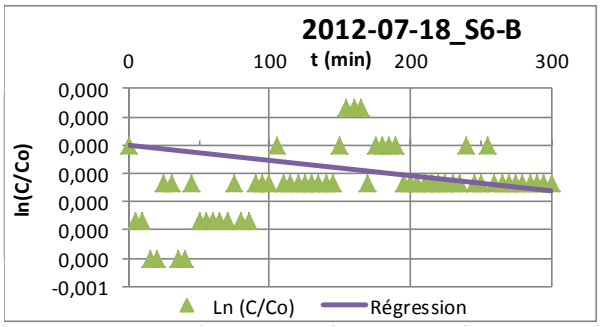
Identification:			
Date de l'essai:	2012-06-21		
Température (°C)	-1,60		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,373	9,373	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-3,55E-05	-5,71E-05	-
Flux (moles/m^2/an)	**33**	**61**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	-
Baisse d'O_2 (%)	0,23	0,28	-
Pente:			
m	-0,00004	-0,00006	-
b	0	0	-
R^2	0,9996	0,7992	-





Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-18		
Température (°C)	0,04		
Paramètres:	S6-A	S6-B	S6-C
C_0 (mole/m^3)	9,317	9,317	-
Pente (ln (C/C0)-t)	-7,88E-05	-5,38E-07	-
Flux (moles/m^2/an)	**72**	**1**	**-**
Durée du test (h)	5,0	5,0	-
Baisse d'O_2 (%)	0,49	0,00	-
Pente:			
m	-0,00008	0,00000	-
b	0	0	-
R^2	0,9997	0,1917	-

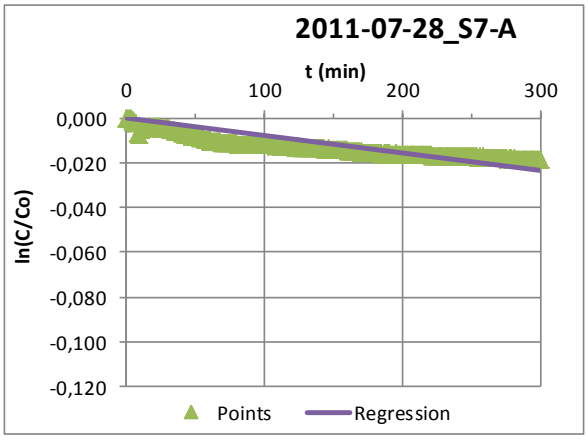


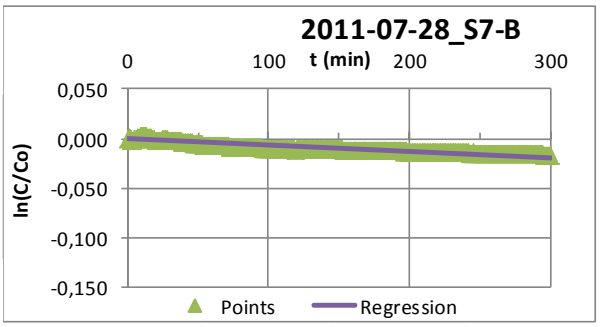


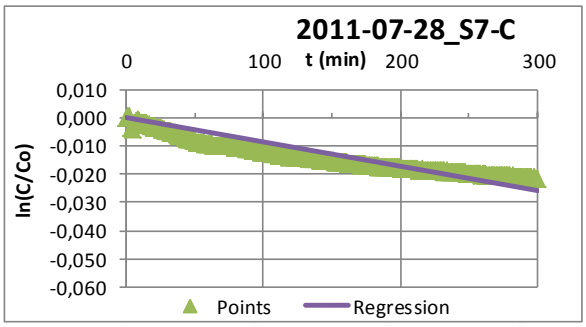
Station S7

Géométrie et résultats:			
	S7-A	S7-B	S7-C
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	202,0	206,0	208,0
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	3,68E-03	3,76E-03	3,79E-03

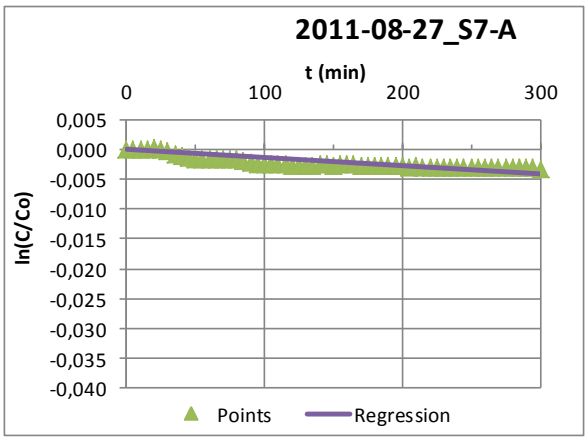
Identification:			
Date de l'essai:	2011-07-28		
Température (°C)	15,8		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	8,809	8,809	8,809
Pente (ln (C/C0)-t)	-7,80E-05	-6,52E-05	-8,60E-05
Flux (moles/m^2/an)	**73**	**62**	**83**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,39	0,36	0,44
Pente:			
m	-0,00008	-0,00007	-0,00009
b	0	0	0
R^2	0,8897	0,8717	0,9334

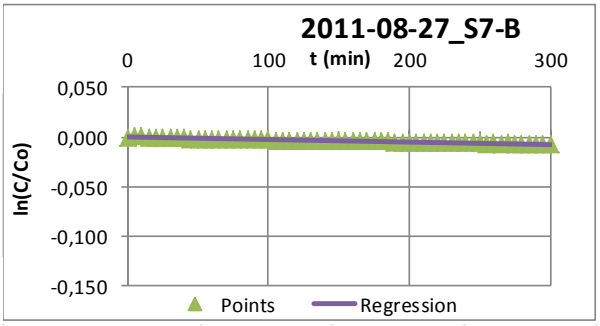


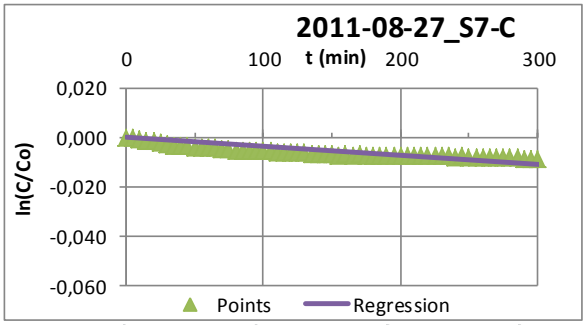




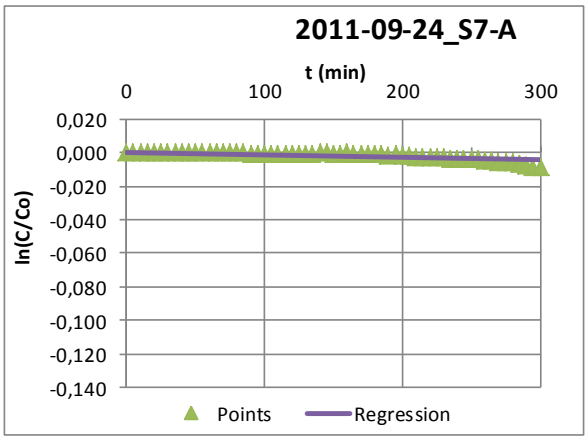
Identification:			
Date de l'essai:	2011-08-27		
Température (°C)	5,8		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	9,124	9,124	9,124
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,37E-05	-2,59E-05	-3,66E-05
Flux (moles/m^2/an)	**13**	**26**	**36**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,07	0,42	0,21
Pente:			
m	-0,00001	-0,00003	-0,00004
b	0	0	0
R^2	0,7606	0,9655	0,8600

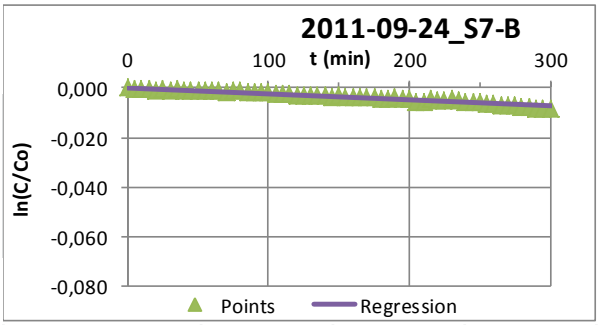


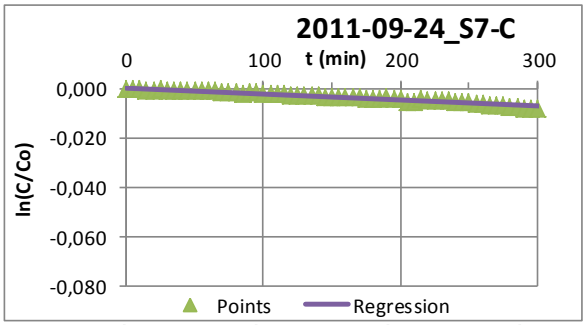




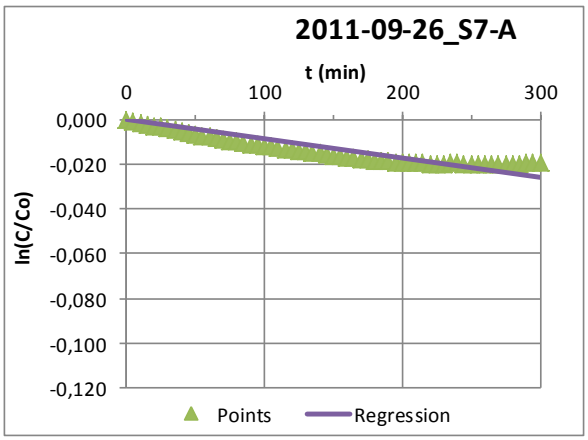
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-24		
Température (°C)	3,6		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	9,197	9,197	9,197
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,42E-05	-2,39E-05	-3,24E-05
Flux (moles/m^2/an)	**14**	**24**	**33**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,18	0,17	0,15
Pente:			
m	-0,00001	-0,00002	-0,00003
b	0	0	0
R^2	0,7227	0,9690	0,9229

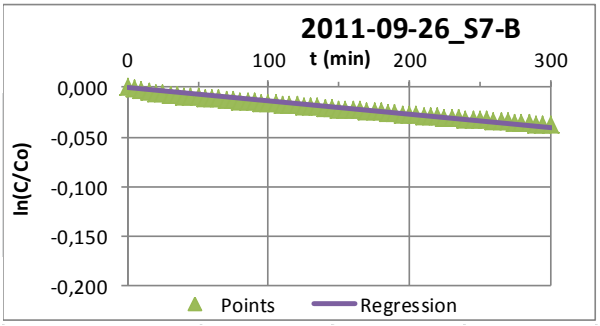


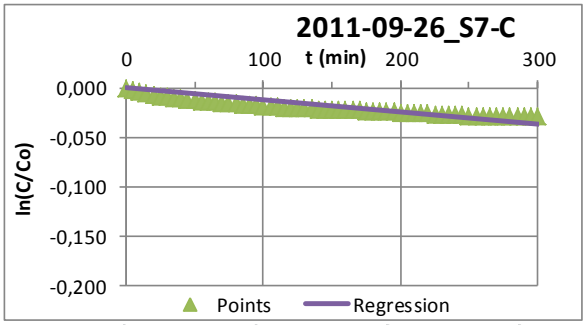




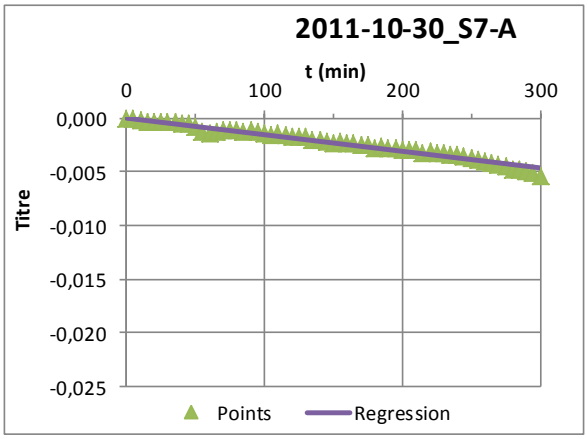
Identification:			
Date de l'essai:	2011-09-26		
Température (°C)	-1,0		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	9,352	9,352	9,352
Pente (ln (C/C0)-t)	-8,62E-05	-1,35E-04	-1,23E-04
Flux (moles/m^2/an)	**86**	**137**	**125**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,40	0,77	0,61
Pente:			
m	-0,00009	-0,00014	-0,00012
b	0	0	0
R^2	0,8956	0,9947	0,9232

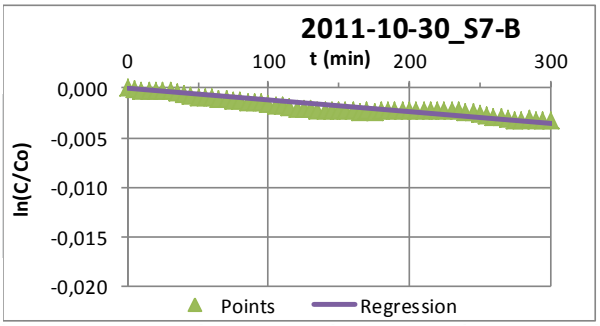


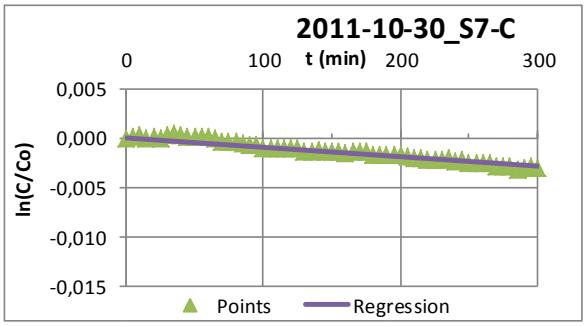




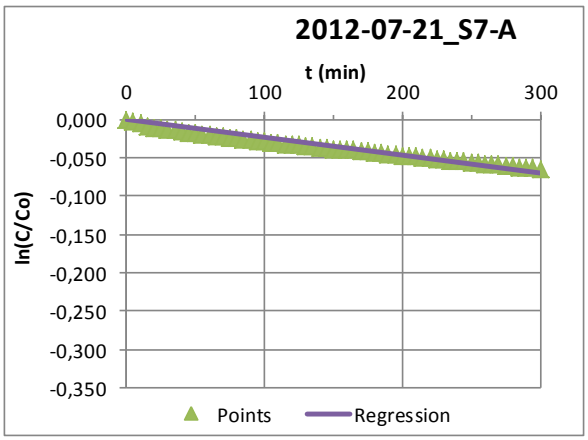
Identification:			
Date de l'essai:	2011-10-30		
Température (°C)	-8,00		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	9,599	9,599	9,599
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,54E-05	-1,18E-05	-9,49E-06
Flux (moles/m^2/an)	**16**	**12**	**10**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	0,11	0,07	0,06
Pente:			
m	-0,00002	-0,00001	-0,00001
b	0	0	0
R^2	0,9744	0,9047	0,9721

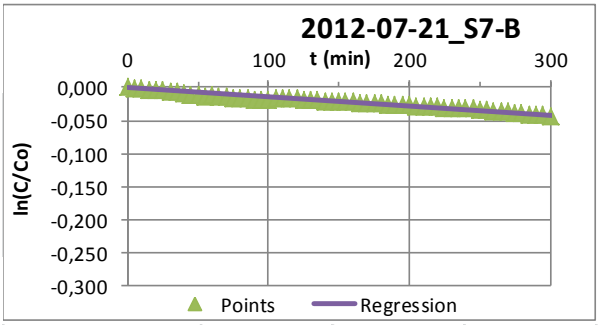


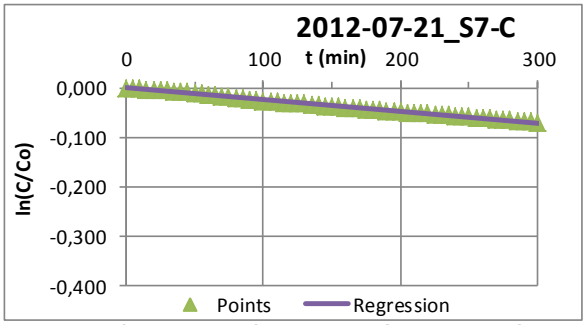




Identification:			
Date de l'essai:	2012-07-21		
Température (°C)	21,20		
Paramètres:	S7-A	S7-B	S7-C
C_0 (mole/m^3)	8,647	8,647	8,647
Pente (ln (C/C0)-t)	-2,33E-04	-1,41E-04	-2,40E-04
Flux (moles/m^2/an)	**214**	**132**	**227**
Durée du test (h)	5	5	5
Baisse d'O_2 (%)	1,31	0,88	1,41
Pente:	2,975	1,89	2,71
m	-0,00023	-0,00014	-0,00024
b	0	0	0
R^2	0,9903	0,9757	0,9954



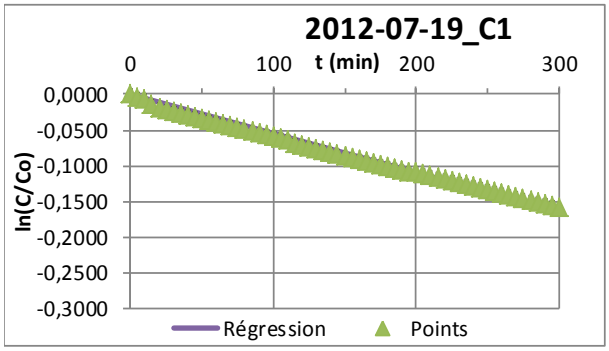


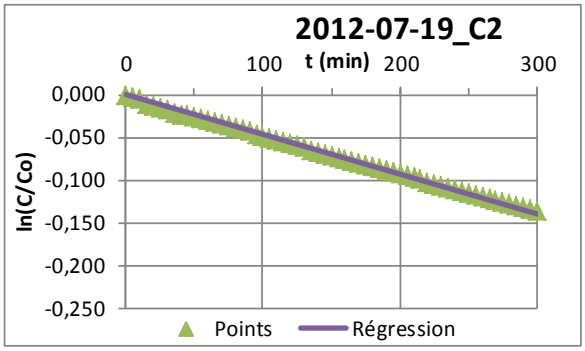


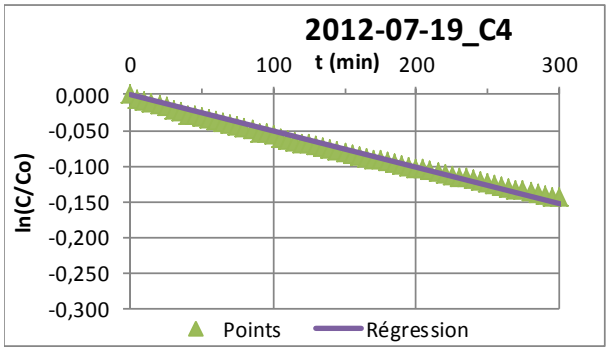
A.2 Variabilité sur le terrain

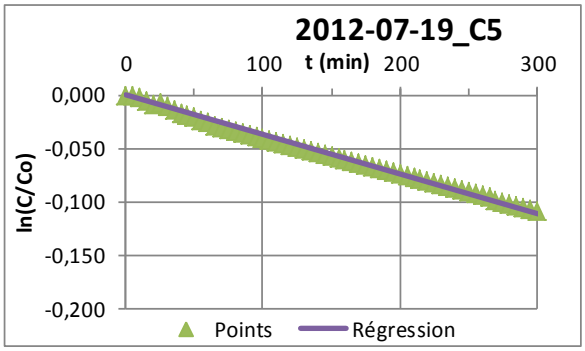
Géométrie :							
	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9
Diamètre (mm)	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4	152,4
Dégagement (mm)	110,00	120,00	117,50	117,50	115,00	118,75	117,50
Aire (m^2)	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02
Volume (m^3)	2,01E-03	2,19E-03	2,14E-03	2,14E-03	2,10E-03	2,17E-03	2,14E-03

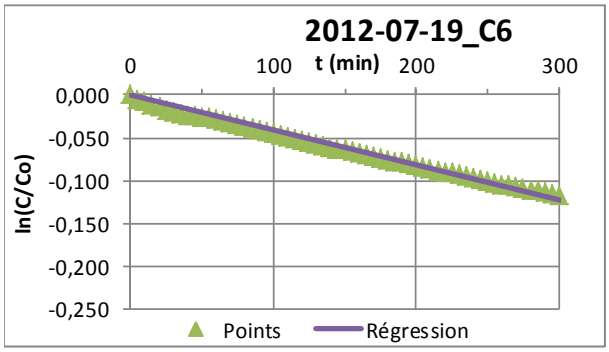
Identification:							
Date de l'essai:	2012-07-19						
Température (°C)	11,00						
Paramètres:	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9
C_0 (mole/m^3)	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957
Pente (ln (C/C0)-t)	-5,48E-04	-4,64E-04	-5,09E-04	-3,69E-04	-4,09E-04	-5,39E-04	-5,65E-04
Flux (moles/m^2/an)	**284**	**262**	**282**	**204**	**221**	**301**	**312**
Durée du test (h)	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0	4,8	4,6
Baisse d'O_2 (%)	2,97	2,66	2,81	2,14	2,31	3,00	2,97
Pente:							
m	-0,00055	-0,00046	-0,00051	-0,00037	-0,00041	-0,00054	-0,00056
b	0	0	0	0	0	0	0
R^2	0,9984	0,9995	0,9965	0,9972	0,9982	0,9997	0,99881

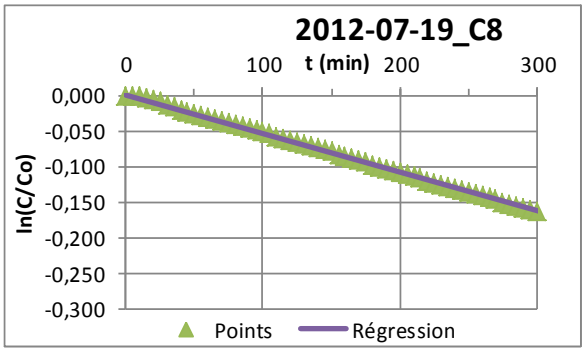

2012-07-19_C1
t (min)
0
100
200
300
0,0000
-0,0500
-0,1000
-0,1500
-0,2000
-0,2500
-0,3000
ln(C/Co)
Régression
Points

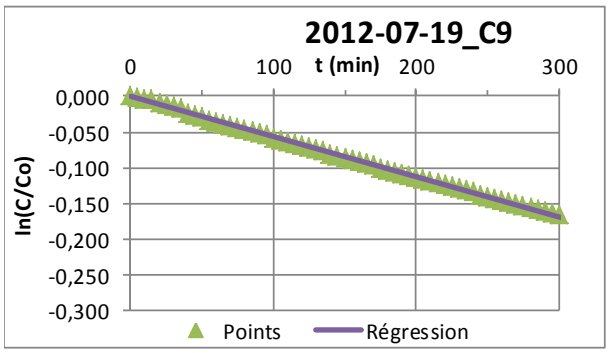

2012-07-19_C2
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
ln(C/Co)
Points
Régression


2012-07-19_C4
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
ln(C/Co)
Points
Régression

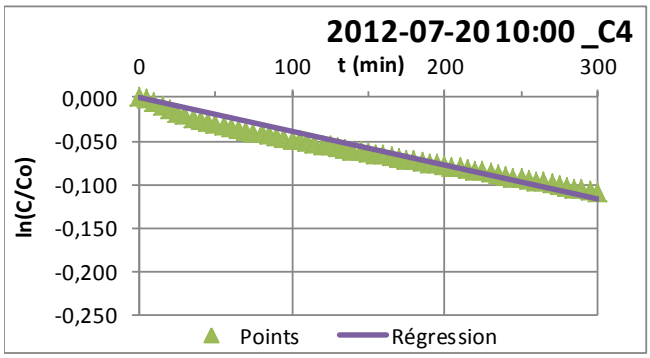

2012-07-19_C5
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
ln(C/Co)
Points
Régression

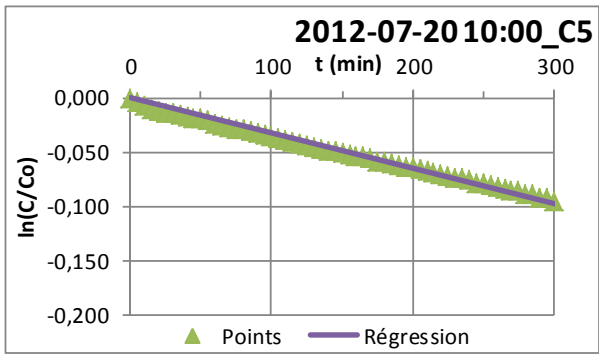

2012-07-19_C6
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
ln(C/Co)
Points
Régression

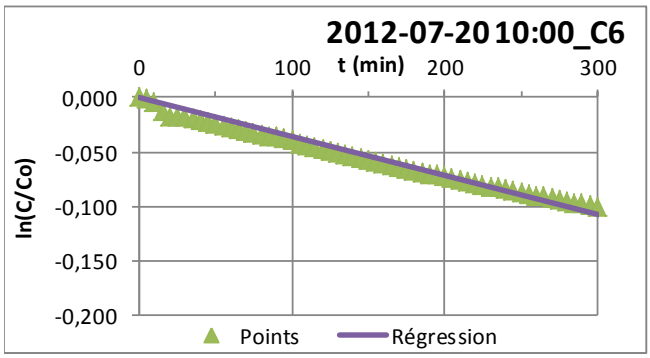

2012-07-19_C8
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
ln(C/Co)
Points
Régression

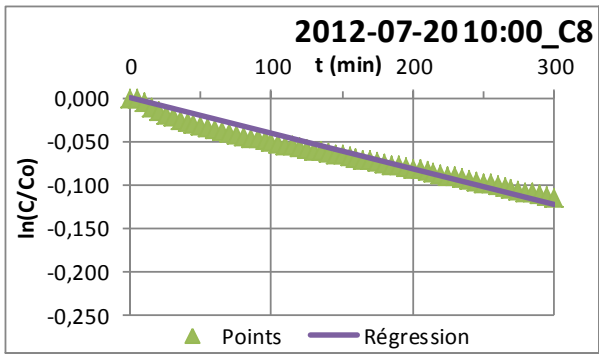

2012-07-19_C9
t (min)
0
100
200
300
0,000
-0,050
-0,100
-0,150
-0,200
-0,250
-0,300
ln(C/Co)
Points
Régression

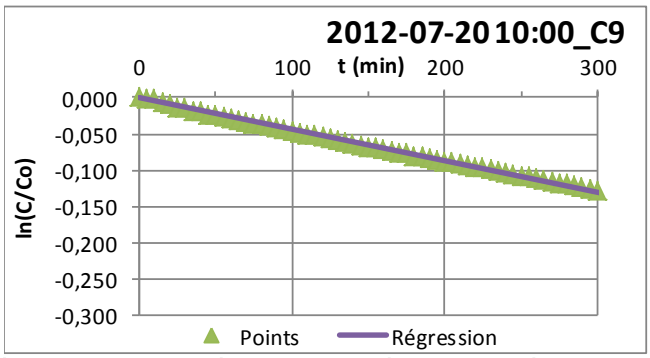
Identification:							
Date de l'essai:	12-07-20 10:00						
Température (°C)	16,0						
Paramètres:	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9
C_0 (mole/m^3)	-	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957
Pente (ln (C/C0)-t)	-	-3,16E-04	-3,89E-04	-3,24E-04	-3,58E-04	-4,08E-04	-4,35E-04
Flux (moles/m^2/an)	**-**	**178**	**215**	**179**	**194**	**228**	**241**
Durée du test (h)	-	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	-	1,77	2,15	1,88	2,00	2,27	2,51
Pente:							
m	-	-0,00032	-0,00039	-0,00032	-0,00036	-0,00041	-0,00044
b	-	0	0	0	0	0	0
R^2	-	0,9895	0,9877	0,9983	0,9941	0,9859	0,99868

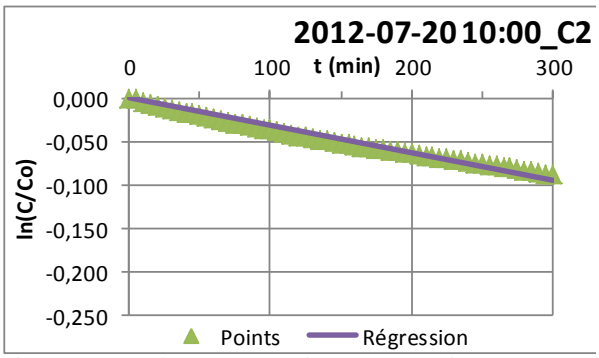




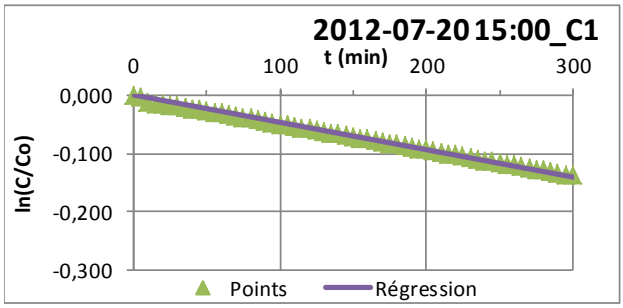


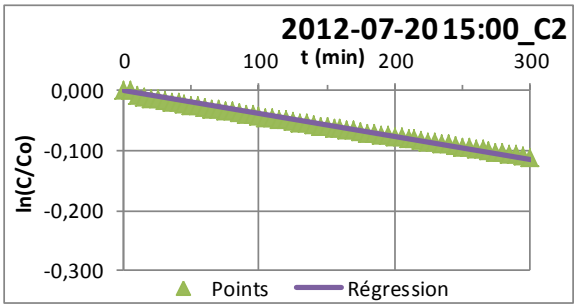


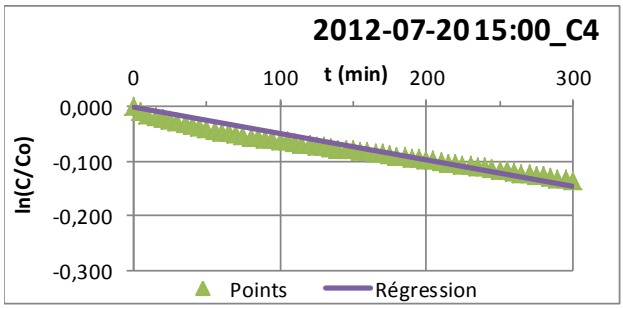


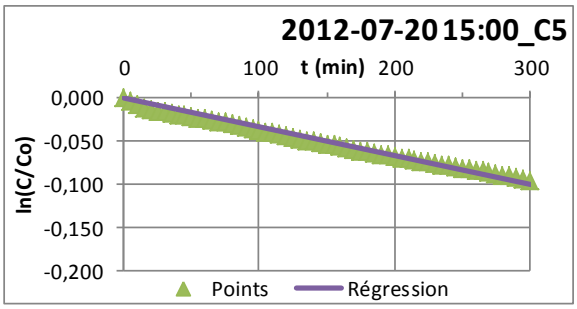


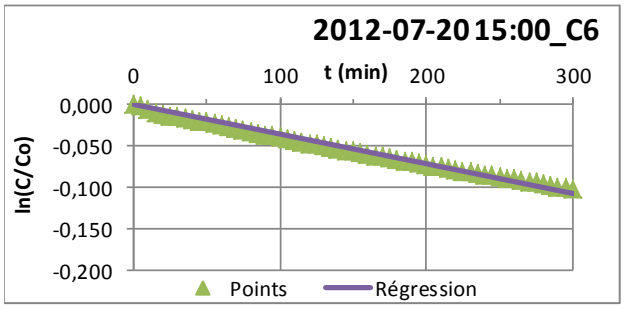
Identification:							
Date de l'essai:	12-07-20 15:00						
Température (°C)	19,00						
Paramètres:	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9
C_0 (mole/m^3)	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,69E-04	-3,82E-04	-4,84E-04	-3,32E-04	-3,58E-04	-4,56E-04	-4,72E-04
Flux (moles/m^2/an)	**243**	**216**	**268**	**184**	**194**	**255**	**261**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,70	2,19	2,64	1,88	2,03	2,68	2,77
Pente:							
m	-0,00047	-0,00038	-0,00048	-0,00033	-0,00036	-0,00046	-0,00047
b	0	0	0	0	0	0	0
R^2	0,9991	0,9974	0,9868	0,9963	0,9972	0,9985	0,99993

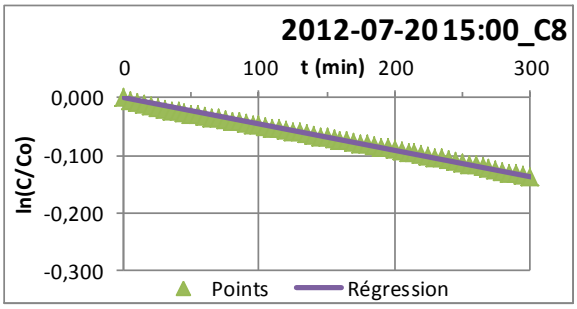


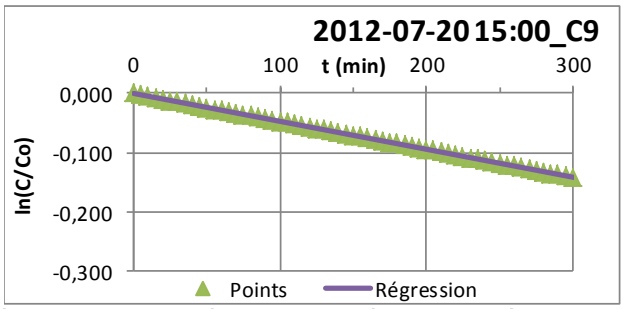




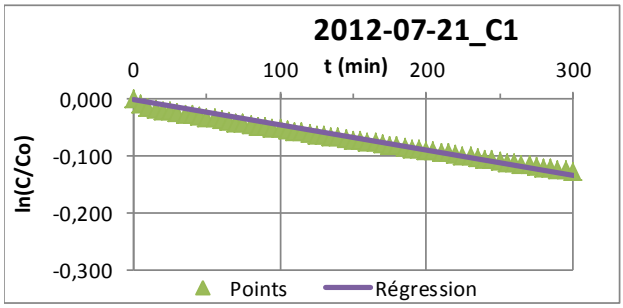


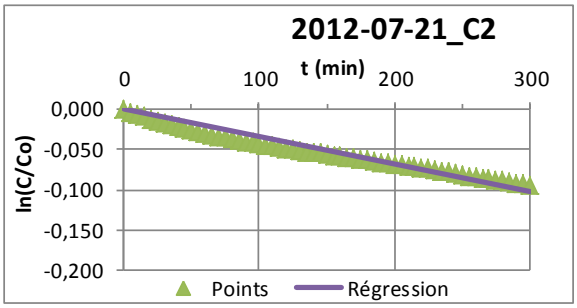


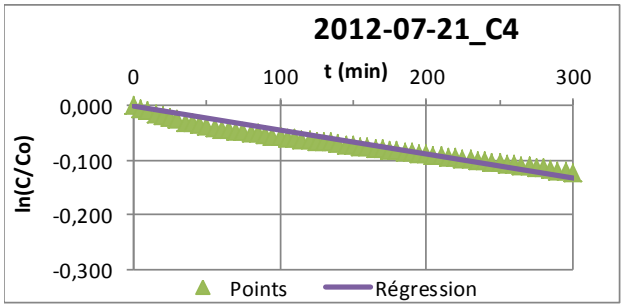


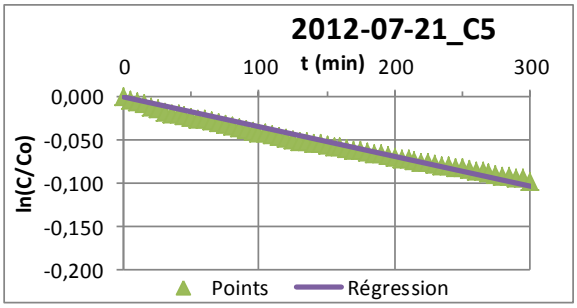


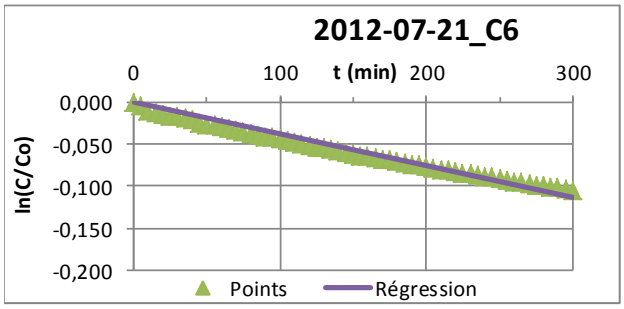
Identification:							
Date de l'essai:	2012-07-21						
Température (°C)	17,00						
Paramètres:	C1	C2	C4	C5	C6	C8	C9
C_0 (mole/m^3)	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957	8,957
Pente (ln (C/C0)-t)	-4,44E-04	-3,40E-04	-4,39E-04	-3,43E-04	-3,78E-04	-4,54E-04	-4,14E-04
Flux (moles/m^2/an)	**230**	**192**	**243**	**190**	**204**	**254**	**229**
Durée du test (h)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,48	1,89	2,39	1,93	2,09	2,49	2,42
Pente:							
m	-0,00044	-0,00034	-0,00044	-0,00034	-0,00038	-0,00045	-0,00041
b	0	0	0	0	0	0	0
R^2	0,9971	0,9853	0,9830	0,9918	0,9934	0,9844	0,99969

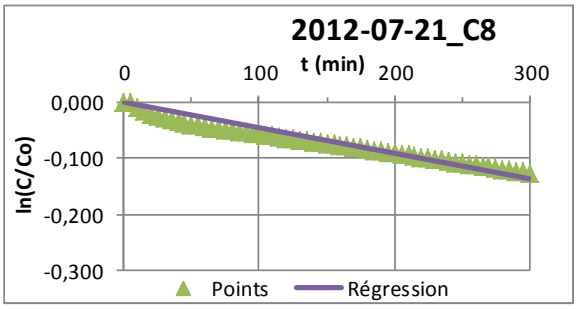


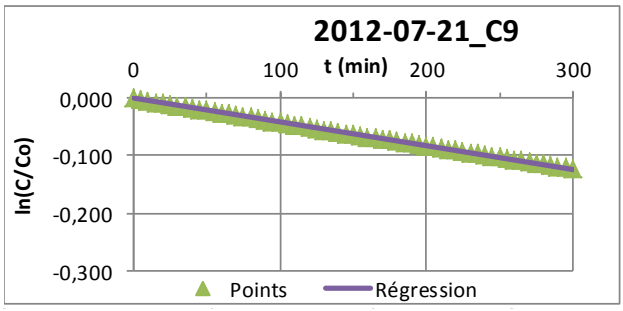


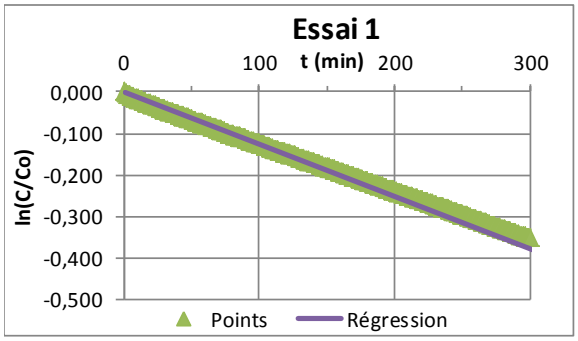
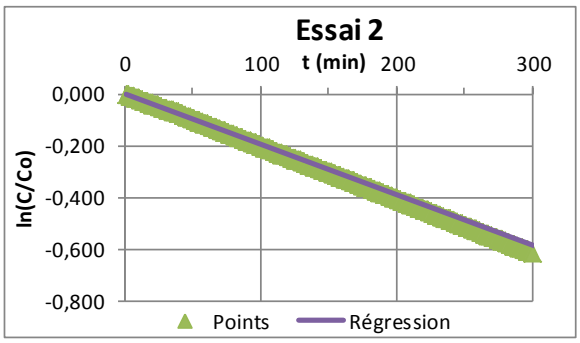
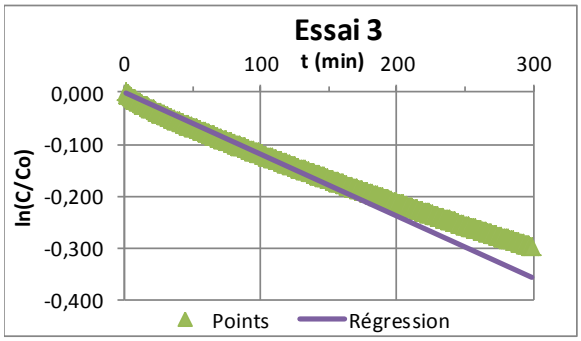
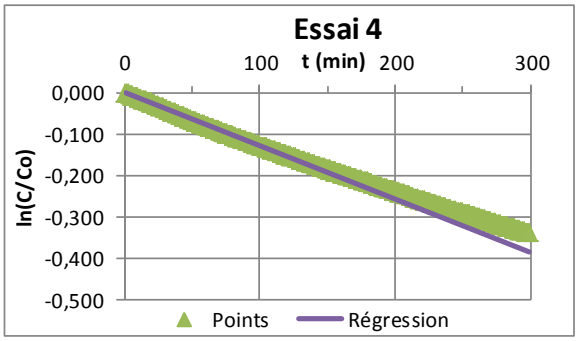
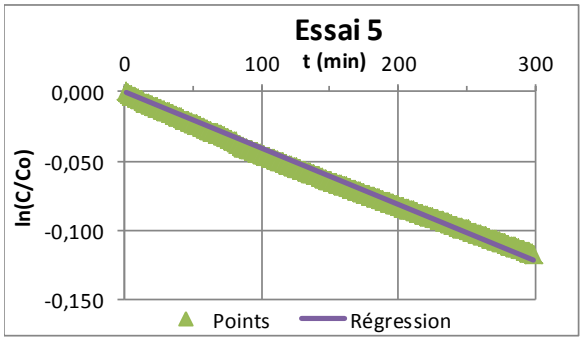










A.3 Réactivité selon le degré de saturation en laboratoire

Identification:					
Date de l'essai:	2012-04-10				
Température (°C)	22,00				
Paramètres:	1	2	3	4	5
Diamètre (mm)	142,0	142,0	142,0	142,0	142,0
Dégagement (mm)	102,0	107,5	198,5	161,0	210
Aire (m^2)	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
Volume (m^3)	1,62E-03	1,70E-03	3,14E-03	2,55E-03	3,33E-03
C_0 (mole/m^3)	8,624	8,624	8,624	8,624	8,624
Pente (ln (C/C0)-t)	-1,26E-03	-1,94E-03	-1,19E-03	-1,29E-03	-4,07E-04
Flux (moles/m^2/an)	**583**	**945**	**1073**	**938**	**387**
Durée du test (h)	2,1	3,0	2,2	2,0	5,0
Baisse d'O_2 (%)	2,96	2,99	2,96	2,96	2,32
Pente:					
m	-0,00126	-0,00194	-0,00119	-0,00129	-0,00041
b	0	0	0	0	0
R^2	0,9991	0,9993	0,9960	0,9986	0,9972