

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Influence des changements climatiques sur la performance de couverture à
effets de barrière capillaire: étude du cas Lorraine**

GWENDOLINE HOTTON

Département de Génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie minéral

Avril 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Influence des changements climatiques sur la performance de couverture à effets de barrière capillaire: étude du cas Lorraine

présenté par **Gwendoline HOTTON**

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

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

Benoît PLANTE, président

Bruno BUSSIÈRE, membre et directeur de recherche

Thomas PABST, membre et codirecteur de recherche

François DUHAIME, membre externe

DÉDICACE

*“There was nowhere to go but everywhere,
so just keep on rolling under the stars*

Jack Kerouac, *On the road*, 1957

À ma famille et à mes amis

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Bruno Bussière, pour sa disponibilité, son encadrement et son soutien constant tout au long de ma maîtrise. Je suis très reconnaissante de l'appui et de la disponibilité de mon codirecteur de Polytechnique Montréal, Thomas Pabst.

J'aimerais remercier chaleureusement Emilie Bresson, pour son aide, son expérience et sa gentillesse plus que précieuses tout au long du projet.

Je remercie l'équipe d'Ouranos, notamment Philippe Roy, Dominique Paquin et Yann Chavaille pour leur accueil et leur collaboration.

Mes remerciements vont également à Isabelle Demers, Marie Guittonny, Abdelkadir Maqsood, Bruno Bossé, Anne-Marie Dagenais, Yves-Dady Botula et Gary Schudel pour leur aide et leur appui lors de ce projet.

Je remercie l'équipe environnement de la mine Goldex – Agnico Eagle ainsi qu'Yves Leblanc de Richelieu Hydrogéologie Inc. de m'avoir permis d'effectuer un stage MITACS et de bénéficier de leur expérience.

Merci à tous mes amis et collègues de l'UQAT: Nathalie, Gabrielle, Youssef, Chloé, Véronique, Andrée, Emma, Lucile, Loïc, Faneva, Guillaume, Vincent, William, Tomy, Elodie, Khadija, Bini, Chérif, Valérie, Marie-Pier, Noureddine, Abdellatif, Mohamed, Aurélie et tous ceux que j'oublie tellement ils sont nombreux.

Un grand merci aux équipes de l'IRME, de l'URSTM et de l'UQAT pour leur aide et leur gentillesse.

Je remercie également mes amis en France qui malgré la distance sont toujours présents pour moi. Finalement, un merci plus que spécial à ma famille pour leurs encouragements dans tous mes projets.

RÉSUMÉ

La restauration des aires d'accumulation des rejets miniers (parcs à résidus, haldes à stériles), en particulier pour les sites générateurs de drainage minier acide (DMA), constitue un des principaux défis environnementaux auxquels doivent faire face l'industrie minière et les gouvernements responsables des sites abandonnés. De plus, à ces risques environnementaux intrinsèques aux activités minières, s'ajoutent désormais les enjeux liés aux changements climatiques (CC). En effet, d'importantes variations de températures et de précipitations sont à prévoir sur l'ensemble du Canada au cours des prochaines décennies. En particulier, au sud du 50^{ème} parallèle, une augmentation de la fréquence et de la durée des événements de sécheresse ainsi qu'une augmentation des moyennes annuelles de précipitations et de température sont anticipées. Actuellement, les travaux de restauration minière prennent peu en considération les CC dans leur conception et augmentent ainsi les risques environnementaux associés aux problèmes de stabilité chimique et physique des rejets miniers.

Le site minier Lorraine a été abandonné à la fin de l'exploitation en 1968 sans aucune considération environnementale, laissant ainsi les résidus contenant des minéraux sulfureux s'oxyder et générer du DMA pendant plus de 30 ans. La restauration entreprise par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) a permis la construction en 1999 d'une couverture à effets de barrière capillaire (CEBC) visant à limiter la production de DMA. La performance de cette technique se base sur le maintien d'un degré de saturation (S_r) supérieur à 85 % dans l'une des couches du recouvrement, appelée couche de rétention d'eau, afin de limiter la migration de l'oxygène vers les résidus réactifs sous-jacents. Cependant, plusieurs incertitudes liées à l'influence des CC sur la performance des CEBC émergent en raison de leur interaction avec le milieu environnement, en particulier les conditions climatiques. En effet, l'augmentation des précipitations peut avoir un effet positif sur le degré de saturation réduisant le flux d'oxygène vers les rejets réactifs. Cependant, les événements de sécheresse pourraient causer la désaturation de la couche de rétention d'eau et donc, induire une augmentation du flux d'oxygène à travers le recouvrement et générer du DMA.

Le principal objectif de cette étude est d'évaluer l'influence des CC sur la performance à long-terme de la CEBC du site Lorraine. De façon plus spécifique, les objectifs du projet consistent à :

- (i) développer un modèle numérique capable de représenter le comportement hydrogéologique

actuel de la CEBC du site Lorraine, (ii) évaluer l'influence des conditions climatiques annuelles moyennes d'ici 2100 et (iii) évaluer l'influence de conditions extrêmes de sécheresse sur la performance à long-terme de la CEBC.

Un modèle numérique 2D a ainsi été développé avec le logiciel SEEP/W (Geo-Slope International Ltd.). Le modèle a premièrement été validé à partir de trois années de données météorologiques et hydrogéologiques mesurées sur le terrain entre 2001 et 2003. Les données journalières de six paramètres climatiques ont pu être appliquées comme condition frontière de surface grâce à la condition land-climate-interaction (LCI) : la température, les précipitations, l'humidité relative et la vitesse du vent obtenues de la station météorologique de l'aéroport d'Earlton, l'albédo défini à 0,2 et correspondant à un sol peu végété comme sur le site Lorraine et les variations du rayonnement solaire estimées par SEEP/W en fonction de la latitude du site (47,7°).

Le modèle validé a ensuite été utilisé avec 3 scénarios de CC pour la période 2098-2100 (IPSL, MIROC et GFDL). Le scénario IPSL a été choisi car il simule le pire changement climatique attendu pour le comportement hydrogéologique de la CEBC. Il projette la combinaison d'une augmentation élevée de température (+ 7 °C) et d'une faible augmentation des précipitations (+ 0,7 %), pouvant conduire à une plus importante désaturation de la couche de rétention d'eau. GFDL a été sélectionné comme scénario médian avec une augmentation de température d'environ 5 °C et une augmentation de précipitations de 26,1 %. MIROC a quant à lui été choisi comme scénario présentant les plus fortes augmentations de température et de précipitations, + 9,9 °C et + 51,1 %, respectivement.

Des conditions extrêmes de sécheresse ont également été appliquées au modèle de la CEBC de Lorraine. La méthodologie développée dans cette étude consistait à se concentrer sur deux paramètres : la durée de la sécheresse (d) et le cumul des précipitations des 30 jours précédents la sécheresse (CPBD). La sécheresse historique maximale observée à la station de l'aéroport d'Earlton a pu être caractérisée avec une durée de 42 jours pour un CPBD de 3 mm. Le même travail de caractérisation a été effectué sur les données climatiques projetées avec le scénario IPSL et a permis de calculer le changement relatif entre les sécheresses de la période historique et celles de la période future. Ainsi, une augmentation de 22 % de la durée des sécheresses et une augmentation de 50 % du CPBD ont été calculée pour l'horizon 2100. Une sécheresse future a ainsi

été définie et appliquée au scénario IPSL en considérant une durée de 51 jours et un CPBD de 6 mm.

Les résultats des différentes simulations effectuées indiquent que le comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine est impacté par les scénarios et les conditions climatiques extrêmes testés. Les niveaux piézométriques baissent de 14 cm en moyenne avec le scénario climatique le plus pessimiste (IPSL) et baissent au maximum de 42 cm lorsqu'une sécheresse future est appliquée. Cependant, les teneurs en eau volumique simulées dans le recouvrement indiquent que les effets de barrière capillaire persistent malgré les CC et les évènements de sécheresse et le critère de performance ($S_r > 85\%$ dans la couche de rétention) a été atteint avec tous les scénarios et conditions climatiques testés.

Ce projet a permis de mettre en avant l'influence des CC sur la CEBC du site Lorraine et confirme que le design de ce recouvrement est robuste face aux CC et aux conditions extrêmes de sécheresse testés. Plus généralement, cette étude illustre l'utilité des modélisations numériques pour quantifier l'influence des CC sur la performance à long terme des CEBC à contrôler la génération de DMA. De tels travaux permettraient par la suite de développer des indices climatiques adaptés au secteur minier, adaptables à chaque site en tenant compte des scénarios climatiques locaux. Ils pourraient s'intégrer dans une approche méthodologique permettant de prendre en considération les CC et les futures conditions climatiques extrêmes dès la conception des ouvrages de restauration minière et faciliteraient l'intégration des CC dans les cadres réglementaires.

Mots clés : Couverture à effets de barrière capillaire (CEBC), Drainage minier acide (DMA), Restauration de site minier, Modélisation numérique, Changements climatiques

ABSTRACT

Mine site reclamation, especially for acid mine drainage (AMD) generating sites, is one of the main environmental issues faced by the mining industry and the governments responsible for abandoned sites. In addition to these environmental risks specific to mining activities, climate change (CC) issues are now added. Significant variations in temperature and precipitation are expected across Canada in the coming decades. Mean annual precipitation, temperature, and the frequency and the duration of drought events are expected to increase in Québec south of the 50th parallel. At present, most mining reclamation works integrate superficially CC in their design increasing the environmental risks associated with the chemical and physical stability problems of mine wastes.

The Lorraine mine site was abandoned at the end of the operation in 1968 without environmental consideration. Tailings were exposed to oxygen and water and sulfide oxidation occurred, leading to AMD generation for more than 30 years. The Ministry of Energy and Natural Resources (MERN) started reclamation of the Lorraine site in 1997 and a cover with capillary barrier effects (CCBE) was built as oxygen barrier in 1999 to limit the production of DMA. The performance of this technique depends on maintaining a high degree of saturation (S_r) (> 85 %) in one of the cover layers, called the moisture-retaining layer (MRL), in order to limit the migration of oxygen to the underlying reactive tailings. However, several uncertainties related to the influence of CCs on the CCBE performance are emerging because of their interaction with the environment, especially with climatic conditions. Increases in precipitation may have positive effects on maintaining the saturation of the MRL and reducing the oxygen flux to the reactive tailings. However, drought events could cause temporary desaturation of the MRL and, consequently, increase the potential for acid generation.

The main objective of this study is to evaluate the influence of CC on the long-term performance of the Lorraine CCBE. More specifically, the objectives of the project are: (i) to develop a numerical model representing the current hydrogeological behavior of the Lorraine CCBE, (ii) to evaluate the influence of the mean annual climatic conditions by 2100 and (iii) to evaluate the influence of extreme drought conditions on the long-term performance of the CCBE.

A 2D numerical model was developed with SEEP/W software (Geo-Slope International Ltd.). The model was first validated using three years of meteorological and hydrogeological data measured in the field between 2001 and 2003. The daily data of six climatic parameters were applied as a

surface boundary condition thanks to the land-climate-interaction condition. (LCI): temperature, precipitation, relative humidity and wind speed obtained from the Earlington airport meteorological station, albedo defined as 0.2 and corresponding to a low vegetated soil as on the Lorraine site and solar radiation variations estimated by SEEP/W with the latitude of the site (47.7°).

The validated model was then used with 3 CC scenarios for the period 2098-2100 (IPSL, MIROC and GFDL). The IPSL scenario is expected to be the worst case for the CCBE hydrogeological behavior. It projects a combination of a high increase of temperatures (+ 7 °C) and a low increase in precipitation (+ 0.7 %), which may lead to the MRL desaturation. GFDL was selected as median climate scenario, with a temperature increase of about 5 °C and an increase of annual precipitation of 26.1 %. The MIROC scenario presents the most advantageous climate scenario, with temperature and precipitation increasing by +9.9 °C and +51.1 %, respectively.

Extreme drought conditions were also applied to the Lorraine CCBE numerical model. The methodology developed in this study consisted of focusing on two parameters: the duration of the drought (d) and the cumulative precipitation of the 30 days preceding the drought (CPBD). The maximum historical drought observed at the Earlington airport station was characterized with a duration of 42 days for a 3 mm CPBD. The same characterization work was performed on the projected climate data with the IPSL scenario and the relative change between the droughts of the historical period and the future period was calculated. Thus, an increase of 22 % in the duration of droughts and an increase of 50 % of the CPBD were calculated for the 2100 horizon. A future drought was thus defined and applied to the IPSL scenario considering a duration of 51 days and a CPBD of 6 mm.

The results of the different simulations performed in this study indicate that the hydrogeological behavior of the Lorraine CCBE is impacted by the climate scenarios and the extreme climatic conditions tested. Piezometric levels drop by an average of 14 cm with the most pessimistic climate scenario (IPSL) and drop to a maximum of 42 cm when a future drought is applied. However, simulated volumetric water contents in the cover indicate that capillary barrier effects are well developed despite CC and drought events and the performance criteria ($S_r > 85\%$ in the MRL) is reached with all scenarios and climatic conditions tested.

This project highlights the influence of CC on Lorraine CCBE and confirms that the design of the cover is robust with respect to CC and extreme drought conditions tested. More generally, this

study illustrates the utility of numerical modeling to quantify the influence of CC on the long-term performance of CEBCs to control AMD generation. Such works would then lead to the development of climatic indices adapted to the mining sector and modifiable for each site considering local climate scenarios. They could be part of a methodological approach to consider CC and future extreme climatic conditions into the design of mine reclamation infrastructures and facilitate the CC integration into regulatory frameworks.

Keywords: Cover with capillary barrier effects (CCBE), Acid mine drainage (AMD), Mine site reclamation, Numerical modeling, Climate change

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES	XVIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXIV
LISTE DES ANNEXES	XXX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Formation du DMA.....	2
1.2 Méthodes de prévention et de contrôle du DMA	4
1.2.1 Exclusion des sulfures.....	5
1.2.2 Exclusion de l'eau	5
1.2.3 Exclusion de l'oxygène	6
1.3 Impact des changements climatiques sur la restauration minière	7
1.4 Objectifs du projet de recherche.....	12
1.5 Contenu du mémoire	13
1.6 Contributions scientifiques et originalité du projet.....	14
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	16
2.1 Notions fondamentales de l'écoulement de l'eau et de la diffusion des gaz.....	16
2.1.1 Écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé	16
2.1.2 Courbe de rétention d'eau (CRE).....	17

2.1.3	Fonction de perméabilité.....	18
2.1.4	Flux de gaz en milieu poreux non saturé.....	19
2.2	Fonctionnement des CEBC	20
2.2.1	Effets de barrière capillaire	20
2.2.2	Configuration type d'une CEBC	21
2.3	Facteurs influençant la performance des CEBC	23
2.3.1	Types de matériaux	23
2.3.2	Effet de pente	24
2.3.3	Végétation et bio-intrusion.....	25
2.3.4	Climat.....	25
2.4	Scénarios climatiques	27
2.4.1	Définitions des concepts climatiques	27
2.4.2	Post-traitement	36
2.4.3	Scénario de changement climatique.....	38
2.5	Modélisation numérique du comportement hydrogéologique	44
2.5.1	Logiciel SEEP/W	45
2.5.2	Principe de résolution numérique de l'équation de Richards.....	45
2.5.3	Méthode des éléments finis	46
2.5.4	Propriétés des matériaux saturés/non saturés	49
2.5.5	Conditions aux frontières	51
2.6	Besoins en recherche sur la conception des CEBC.....	54
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE.....		55
3.1	Site à l'étude.....	55
3.1.1	Contexte et stratégie de restauration	56

3.1.2	CEBC et propriétés des matériaux	59
3.1.3	Instrumentation du site et suivi de performance	65
3.2	Simulation numérique hydrogéologique	69
3.2.1	Géométrie du modèle numérique	70
3.2.2	Paramètres de convergence	71
3.2.3	Propriétés des matériaux du modèle numérique	71
3.2.4	Conditions initiales et frontières	72
3.3	Sélection des données climatiques	73
3.3.1	Climat historique	74
3.3.2	Scénarios de changements climatiques	75
3.3.3	Conditions extrêmes de sécheresse	79
CHAPITRE 4 ARTICLE 1: INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE ABILITY OF A COVER WITH CAPILLARY BARRIER EFFECTS TO CONTROL ACID GENERATION ¹ 83		
4.1	Abstract	83
4.2	Résumé	85
4.3	Introduction	86
4.4	Materials and methods	87
4.4.1	Lorraine mine site.....	87
4.4.2	CCBE configuration and material properties	89
4.4.3	CCBE instrumentation and performance monitoring.....	89
4.5	Numerical model	91
4.5.1	Numerical model geometry	92
4.5.2	Material properties of the numerical model	92
4.5.3	Boundary conditions and initial conditions.....	94
4.6	Transient simulation results	99

4.6.1	Numerical model validation	99
4.6.2	Climate change simulations	102
4.6.3	Drought event simulations	104
4.7	Discussion	106
4.7.1	Influence of CCBE material properties	107
4.7.2	Influence of surface boundary conditions	108
4.8	Conclusions and recommendations	110
4.9	Acknowledgements	111
4.10	References	112
CHAPITRE 5 DISCUSSION		122
5.1	Influence de la géométrie du modèle numérique	122
5.1.1	Géométrie du modèle complet	123
5.1.2	Conditions initiales et frontières du modèle de taille complète	124
5.1.3	Analyse paramétrique de la condition de surface.....	126
5.2	Influence de la végétation	127
5.2.1	Sélection et propriétés de la végétation.....	128
5.2.2	Résultats des simulations avec végétation	132
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		136
6.1	Sommaire et principales conclusions	136
6.2	Recommandations	139
RÉFÉRENCES.....		142
ANNEXES		169

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Principales méthodes de prévention et de contrôle du DMA (adapté de Pabst, 2011 et Aubertin et al., 2002).....	5
Tableau 1.2 : Niveaux de risque et de vulnérabilité des principaux impacts liés à la restauration des sites miniers (Bussière et al., 2017)	9
Tableau 1.3 : Impacts positifs et négatifs des CC sur les différentes méthodes de restauration minière (d’après Bussière et al., 2017).....	10
Tableau 2.1 : Caractéristiques principales des types de modèles numériques utilisés dans l’étude des changements climatiques (Roy et al., 2017)	30
Tableau 2.2 : Caractéristiques principales des RCP (adapté de Moss et al., 2010)	31
Tableau 2.3 : Importance relative des trois sources principales d’incertitude au fil du temps (adapté de Charron, 2016).....	34
Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques des techniques de mise à l’échelle dynamique et statistique.....	36
Tableau 2.5 : Évolution des conditions climatiques au Québec à l’horizon 2050 (adapté de Desjarlais et al., 2010).....	39
Tableau 2.6 : Liste des indicateurs climatiques quantitatifs utilisés pour les simulations climatiques de la région Abitibi (adapté de Roy, 2015)	41
Tableau 2.7 : Augmentation relative des indicateurs climatiques quantitatifs pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région Abitibi (adapté de Roy, 2015).....	43
Tableau 2.8 : Liste des indicateurs climatiques qualitatifs utilisés pour les simulations climatiques de la région Abitibi (adapté de Roy, 2015)	44
Tableau 2.9 : Changement projeté des indicateurs climatiques qualitatifs pour la période 2080 (adapté de Roy, 2015)	44
Tableau 2.10 : Avantages et limites de la MEF (d’après Marceau, 2007 et Kalonji-Kabambi, 2014)	49

Tableau 2.11 : Paramètres d'entrée pour les modèles de matériaux saturés/non saturés de SEEP/W (d'après Geo-Slope International Ltd., 2017)	49
Tableau 2.12 : Paramètres d'entrées pour définir la condition LCI dans SEEP/W (d'après Geo-Slope International Ltd., 2017)	53
Tableau 3.1 : Composition minéralogique des résidus frais et oxydés du site Lorraine (d'après Bernier, 1996).....	57
Tableau 3.2 : Propriétés de base des matériaux (tiré de Aubertin et al., 1999b; Dagenais 2005).	60
Tableau 3.3 : Conductivité hydraulique des matériaux échantillonnés dans les bancs d'emprunts (tiré de Aubertin et al., 1999b)	60
Tableau 3.4 : Pression d'entrée d'air des matériaux échantillonnés dans les bancs d'emprunts (tiré de Aubertin et al., 1999b).....	61
Tableau 3.5 : Principales caractéristiques physique et hydriques des matériaux de la CEBC de Lorraine après son installation (tiré de Dagenais, 2005). k_{sat} k_C représente la conductivité hydraulique saturée prédite par la méthode Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003), ψ_a m_K la pression d'entrée d'air prédite par le modèle de Kovacs modifié (Aubertin et al., 2003), D_{10} le Diamètre des particules correspondant à 10 % du passant sur la courbe granulométrique et C_U le coefficient d'uniformité	65
Tableau 3.6 : Type de sondes et fréquences des mesures de θ , ψ et du niveau piézométrique pour les différentes stations de mesure et piézomètres.....	68
Tableau 3.7 : Principales propriétés des matériaux utilisées dans les simulations numériques....	72
Tableau 3.8 : Résumé des principales caractéristiques et informations sur les scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques	78
Tableau 3.9 : Résumé des principales caractéristiques des scénarios climatiques et des évènements de sécheresse appliquées dans les simulations numériques	82
Tableau 4.1 : Properties of the silt and sand used in the Lorraine CCBE (adapted from Dagenais et al., 2001). D_{10} is the diameter corresponding to 10 % passing on the cumulative grain-size distribution curve; C_U is the coefficient of uniformity; G_s is the specific gravity; k_{sat} is the saturated hydraulic conductivity; AEV is the air entry value and n is the porosity	89

Tableau 4.2: Type of probes and frequency of measurements for the different monitoring stations and piezometers.....	91
Tableau 4.3: Main material properties used in numerical simulations	93
Tableau 4.4: Summary of the climate scenarios used in the numerical simulations with relative increases in precipitation and temperature between the historical period (2001 – 2003) and projections (2098 – 2100). ΔT and ΔPr indicate the relative changes in temperature and precipitation, respectively, and RCP indicates the representative concentration pathway	96
Tableau 4.5: Summary of the main characteristics of drought events applied in the numerical simulations. CPBD is the cumulative precipitation before drought.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Courbe de rétention d'eau d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2015)	17
Figure 2.2 : Fonctions de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2015).....	18
Figure 2.3 : Coefficient de diffusion effectif D_e en fonction du degré de saturation S_r (Aubertin et al., 1999a).....	20
Figure 2.4 : Configuration typique d'une CEBC utilisée pour limiter la diffusion de l'oxygène ..	21
Figure 2.5 : Simulation de la teneur en eau volumique sur CEBC inclinée après 60 jours de drainage (Bussièrre, 1999).....	24
Figure 2.6 : Évolution de la courbe de rétention d'eau ($S_r - \psi$) d'un échantillon soumis aux cycles de gel-dégel (Yong et Mohamed, 1992; tirée de Dagenais, 2005).....	26
Figure 2.7 : Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite) (source : Ouranos)	28
Figure 2.8 : Changement de température globale comparé à la période 1986-2005 pour les scénarios RCP utilisés par le projet d'intercomparaison des modèles couplés CMIP5. Le nombre de modèles est indiqué entre parenthèses et les enveloppes de couleur représentent les résultats de tous les modèles (adapté de Knutti et Sedláček, 2013).....	32
Figure 2.9 : Concept de la mise à l'échelle et résolution des modèles utilisés et générés (source : D. Viner, Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK et S.Planton, Météo France, Centre national de recherches météorologiques, adapté de Adem et al., 2014).....	35
Figure 2.10 : Scénarios des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales pour la période 2041-2070 (Desjarlais et al., 2010).....	40
Figure 2.11 : Evolution temporelle de la température minimale annuelle (à gauche) et maximale annuelle (à droite) en Abitibi-Témiscamingue. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chaque RCP. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne. (Roy, 2015)	42
Figure 2.12 : Evolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitations (à gauche) et lors d'évènement de précipitations extrêmes (à droite; définie par 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chaque RCP. L'enveloppe	

représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne. (Roy, 2015)	43
Figure 3.1 : Localisation du site minier Lorraine et de la station météorologique d'Earlton	55
Figure 3.2 : Vue en plan du site Lorraine avant la restauration (tiré de Nastev et Aubertin, 2000)	56
Figure 3.3 : Vue du site minier Lorraine a) avant les travaux de restauration en 1997; b) après la construction de la CEBC en 1999; c) avec la croissance de la végétation en 2017 (d'après Dagenais, 2005 et Bussière et al., 2009)	59
Figure 3.4 : Coefficients de diffusion effectifs du silt en fonction du degré de saturation. La courbe bleue et celle en pointillés verts représentent le modèle de Collin et Rasmuson (1988) pour les porosités 0,38 et 0,43 respectivement (d'après Dagenais, 2005)	62
Figure 3.5 : Section de la CEBC dans le secteur de la digue sud (tirée de Fontaine, 1999a)	63
Figure 3.6 : Localisation des sondes des stations de mesures pour a) les axes A, B et C et b) l'axe D (adapté de Dagenais et al., 2001 et Maqsood et Bussière, 2008)	66
Figure 3.7 : Localisation des stations de mesures et des piézomètres du site Lorraine. Les stations surlignées sont étudiées plus en détails dans ces travaux. La ligne en pointillés rouges représente la section transversale utilisée pour la simulation numérique (adapté d'après Dagenais et al., 2001; Maqsood et Bussière, 2008)	67
Figure 3.8 : Évolution du degré de saturation dans la couche de rétention d'eau aux stations B3, B5 et B7. La ligne rouge correspond à $S_r = 85 \%$ correspondant au critère de performance visé pour une CEBC	69
Figure 3.9 : Modèle numérique de la CEBC de Lorraine dans a le secteur de la digue au sud du site et b la partie centrale du parc	71
Figure 3.10 : Fonctions de perméabilité et CRE des matériaux utilisés dans les modélisations numériques	72
Figure 3.11 : Conditions aux frontières appliquées au modèle numérique en régime permanent et transitoire	73

- Figure 3.12** : Evolution de la température et des précipitations entre le 1^{er} janvier 2001 et le 31 décembre 2003 issues des observations de la station météorologique de l'aéroport d'Earlton75
- Figure 3.13** : Augmentation relative de la température et des précipitations entre la période historique (2001-2003) et la période future (2098-2100) pour différents scénarios de CC du site Lorraine.....76
- Figure 3.14** : Evolution de la température et des précipitations entre 2001 et 2003 pour le scénario climatique historique et entre 2098 et 2100 pour les trois scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques77
- Figure 3.15** : Evolution de l'humidité relative, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de l'albédo entre 2001 et 2003 pour le scénario climatique historique et entre 2098 et 2100 pour les trois scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques78
- Figure 3.16** : Données de précipitations modifiées avec épisodes de sécheresses appliqués pour la période future (2098-2100) avec le scénario de changements climatiques IPSL. La flèche jaune en pointillés correspond à la période du CPBD et la flèche jaune pleine à la sécheresse future de 51 jours.....81
- Figure 3.17** : Données de précipitations modifiées avec épisodes de sécheresses appliqués pour la période historique (2001-2003) avec le scénario climatique historique. La flèche bleue correspond aux 2 mois sans précipitation, la flèche grise en pointillés correspond à la période du CPBD et la flèche grise pleine à la sécheresse future de 51 jours.82
- Figure 4.1**: Location of the Lorraine mine site. Province of Québec and Abitibi-Témiscamingue region are highlighted in red and orange respectively. The blue triangle indicates the location of the Lorraine mine site and the green cross shows the location of the Earlton airport meteorological station88
- Figure 4.2**: a Location of monitoring stations and piezometers at the Lorraine site. Highlighted stations and the red dashed line represent, respectively the stations and the cross-section used in the numerical simulations presented in this paper. The blue dotted line corresponds approximately to the limit between the unsaturated zone in the south and the saturated zone

in the north. b Location of the probes in the cover (adapted from Dagenais et al., 2001; Maqsood and Bussière, 2008; Bresson et al., 2018)	90
Figure 4.3: Numerical model of the Lorraine CCBE with SEEP/W at a) the south dike sector, and b) the north-east limit of the model. The total length of the model is 125 m	92
Figure 4.4: Permeability functions and WRCs of materials used in the numerical simulations ...	93
Figure 4.5: Evolution of temperature and precipitation from 2001 to 2003 for historical climate and from 2098 to 2100 for the three climate scenarios used in the numerical simulations ...	96
Figure 4.6: Precipitation levels used to simulate drought events for the period between 2098 and 2100 with the IPSL climate scenario. The yellow double arrow represents the duration of the drought event with the coarse dashed portion associated to the 30 days of CPBD and the solid line portion representing the future drought duration (51 days)	98
Figure 4.7: Observed (obs.) and simulated (sim.) piezometric heads at the PO6 observation well between January 2001 and January 2004. Precipitation (rainfall and snow) observed at Earlton airport station from January 2001 to December 2003 is also shown	100
Figure 4.8: Simulated vs. observed hydraulic head at the PO6 observation well during the 2001 – 2003 period. The determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) are indicated. The dashed line indicates a 1:1 slope and the dotted lines represent the envelop related to calibration target for hydraulic heads (± 0.24 m).....	100
Figure 4.9: Observed (obs.) vs. simulated (sim.) volumetric water contents at level 2-1 in the MRL at the monitoring stations B6, B7 ($n = 0.38$), and B8 ($n = 0.34$) from January 2001 to December 2003. Precipitation (rainfall and snow) observed at Earlton airport station from January 2001 to December 2003 is also shown.....	101
Figure 4.10: Simulated vs. observed volumetric contents at stations B6, B7, and B8 during the 2001 – 2003 period. The dashed line indicates a the 1:1 slope and the dotted lines represent the envelop related to the error of the volumetric water content measurements (± 0.03).....	102
Figure 4.11: Piezometric level simulated for PO6 with historical climate from 2001 – 2003 vs three climate scenarios from 2098 – 2100	103

- Figure 4.12:** Variation in the simulated volumetric water content at level 2-1 in the MRL (55 cm below the cover surface) at stations B6, B7 ($n = 0.38$), and B8 ($n = 0.34$) for the historical climate data (2001 - 2003) and three climate scenarios (2098 - 2100)..... 104
- Figure 4.13: a** Piezometric head at PO6 and **b** volumetric water contents at stations B7 in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated with future drought conditions applied on the IPSL climate scenario from 2098 to 2100. The black double arrow represents the duration of the drought event with the dashed portion indicating the 30 days of CPBD and the solid portion representing the future drought duration (51 days)..... 105
- Figure 4.14: a** Piezometric head at PO6 location and **b** volumetric water content at B7 station in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated for historical climate with new and previous drought methodologies. The double arrows represent duration of the drought event; the grey one for the new methodology (51 days + 30 days of CPBD) and the blue one for the previous methodology (60 days)..... 106
- Figure 4.15:** Permeability functions and WRCs of original (solid lines) and alternative (dotted lines) materials used in the numerical simulations..... 107
- Figure 4.16:** Volumetric water contents at station B7 in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated with original and alternative materials for the historical period (2001 – 2003) and future period (2098 – 2100) with the ISPL scenario. $\theta_{S_r=85\%}$ represents the θ for a degree of saturation of 85 %..... 108
- Figure 4.17:** Increasing of temperature vs increasing of precipitation with respect to historical data (2001 – 2003) and future climate change data (2098 – 2100) for different climate scenarios at the Lorraine mine site. Red circles correspond to the three climate scenarios selected for the numerical simulations in this study..... 109
- Figure 5.1 :** Localisation des sections transversales utilisées pour les simulations numériques. La ligne en pointillés rouges représente la section du modèle 120 m et la ligne en pointillés bleus représente la section du modèle 372 m (adapté d’après Dagenais et al., 2001; Maqsood et Bussière, 2008)..... 123
- Figure 5.2 :** Modèle numérique de la longueur totale de la CEBC du site Lorraine avec **a** le secteur de la digue au sud du site et **b** la limite nord-est du recouvrement 124

- Figure 5.3** : Conditions aux frontières appliquées au modèle numérique en régime transitoire sur le modèle complet de la CEBC du site Lorraine.....126
- Figure 5.4** : Variations du niveau piézométrique à $X = 125\text{m}$ pour les modélisations du modèle complet de la CEBC de Lorraine avec différents taux de précipitations en condition frontière de surface. La localisation de la simulation ($X = 125\text{m}$) est indiquée sur la figure en bas à droite.....127
- Figure 5.5** : Localisation du site Lorraine (triangle bleu) par rapport aux écozones terrestres canadiennes. Les contours des provinces canadiennes se superposent aux écozones qui apparaissent en couleurs autres que le gris. Les points violets correspondent aux échantillons de l'étude de Peckham et al. (2008)129
- Figure 5.6** : Variations du LAI du peuplement de peupliers baumiers théorique appliquées à la simulation numérique avec végétation.....130
- Figure 5.7** : Fonction de limite d'humidité du peuplement de peupliers baumiers théorique appliquées à la simulation numérique avec végétation. Adapté de Geo-Slope International Ltd. (2016)131
- Figure 5.8** : Variation des niveaux piézométriques simulés à PO6 pour les simulations avec le climat historique (2001 - 2003), le scénario IPSL et le scénario IPSL avec végétation (2098 - 2100).....133
- Figure 5.9** : Variation des teneurs en eau volumique en bas et en haut de la couche de rétention (niveaux 2-1 et 2-2, respectivement) aux stations B6, B7 ($n = 0.38$), et B8 ($n = 0.34$) pour les simulations avec le climat historique (2001 - 2003), le scénario IPSL et le scénario IPSL avec végétation (2098 - 2100). $\theta_{S=85\%}$ représente la teneur en eau volumique pour un degré de saturation de 85 %135

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a_c	Coefficient d'adhésion (modèle MK) [-]
AEV	Pression d'entrée de l'air (<i>air entry value</i>) [L]
AMD	Drainage minier acide (<i>acid mine drainage</i>)
$c(\psi)$	Capacité de stockage [-]
$C(\phi)$	Fonction de corrélation du modèle de Fredlung et Xing (1994)
C	Concentration en oxygène [M.L ⁻³]
C_c	Coefficient de courbure [-]
C_U	Coefficient d'uniformité (D_{60}/D_{10}) [-]
C_ψ	Paramètre d'ajustement [-]
CBL	Couche de bris capillaire (<i>capillary break layer</i>)
CC	Changements climatiques
CCBE	Couverture à effets de barrière capillaire (<i>cover with capillary barrier effects</i>)
CEBC	Couverture à effets de barrière capillaire
CMIP	Projet d'intercomparaison des modèle couplés (<i>coupled model intercomparaison project</i>)
CPBD	Cumul des précipitations 30 jours avec la sécheresse (<i>cumulative precipitation before drought</i>) [L]
CRE	Courbe de rétention d'eau
d	Durée des épisodes de sécheresse [T]
D_{10}	Diamètre des particules correspondant à 10 % du passant sur la courbe granulométrique [L]
D_{30}	Diamètre des particules correspondant à 30 % du passant sur la courbe granulométrique [L]

D ₆₀	Diamètre des particules correspondant à 60 % du passant sur la courbe granulométrique [L]
D _e	Coefficient de diffusion effectif [L ² .T ⁻¹]
DMA	Drainage minier acide
e	Indice des vides [-]
ECCC	Environnement et Changements Climatiques Canada
EDP	Équation aux dérivées partielles
ER	Évaporation réelle [L.T ⁻¹]
ETP	Évapotranspiration potentielle [L.T ⁻¹]
EVT	Évapotranspiration [L]
F _{O2}	Flux d'oxygène [M.L ⁻² .T ⁻¹]
FD	Frequency domain
G _s	Gravité spécifique ou densité relative des grains [-]
GCB	Géocomposite bentonitique
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
h	Charge hydraulique [L]
h _{co}	Remontée capillaire équivalente [-]
H	Charge hydraulique totale [L]
I _p	Indice de plasticité (%)
ICMM	International council on mining and metals
INF	Infiltration [L]
IPCC	Intergovernmental panel on climate change
k	Conductivité hydraulique [L.T ⁻¹]
KC	Kozeny-Carman

k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [L.T ⁻¹]
k_u	Fonction de perméabilité [L.T ⁻¹]
$k_{x,y,z}$	Conductivité hydraulique selon les axes (x,y,z) dans un repère cartésien [L.T ⁻¹]
LAI	Indice de surface foliaire (<i>leaf area index</i>) [-]
LCI	Condition aux limites « interaction sol-climat » (<i>land-climate-interaction</i>)
m	Paramètre fonction de la distribution des pores (MK) [-]
m_{vG}	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980) [-]
masl	Mètres au-dessus du niveau de la mer (<i>meters above sea level</i>) [L]
MCG	Modèle climatique global
MCR	Modèle climatique régional
MEF	Méthode des éléments finis
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec
MK	modèle de Kovacs modifié
MRL	Couche de rétention d'eau (<i>moisture-retaining layer</i>)
MRN	Ministère des Ressources Naturelles du Canada
MST	Modèle de système terrestre
n	porosité [-]
n_{vG}	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980) [-]
$N_{\text{sol}(j)}$	Épaisseur de neige au sol pour le jour j [L]
$N_{\text{sol}(j-1)}$	Épaisseur de neige au sol pour le jour j-1 [L]
NPP	Potentiel net de neutralisation (<i>net neutralization potential</i>) [kgCaCO ₃ eq/t]
NPS	Nappe phréatique surélevée
OMM	Organisation météorologique mondiale
P	Précipitations sous forme de pluie [L]

PA	Potentiel d'acidité [kgCaCO ₃ eq/t]
PN	Potentiel de neutralisation [kgCaCO ₃ eq/t]
PNN	Potentiel net de neutralisation [kgCaCO ₃ eq/t]
PNUE	Programmes des Nations unies pour l'environnement
Q	Conditions de flux appliquées dans l'équation de Richards
q _E	Flux d'eau associé à l'évaporation [L.T ⁻¹]
q _I	Flux d'eau associé à l'infiltration [L.T ⁻¹]
q _M	Flux d'eau associé à la fonte des neiges [L.T ⁻¹]
q _P	Intensité des précipitations [L.T ⁻¹]
q _R	Flux d'eau associé au ruissellement [L.T ⁻¹]
R ²	Coefficient de détermination [-]
RCP	Scénario radiatif (<i>representative concentration pathway</i>)
RDT	Réflectométrie dans le domaine du temps
RMSE	Erreur quadratique moyenne (<i>root-mean-square error</i>)
RN	Recharge nette [L]
S _a	Saturation par adhésion [-]
S _c	Saturation capillaire [-]
S _r	Degré de saturation [-]
T	Température de l'air (°C)
TDR	Réflectométrie dans le domaine du temps (<i>time domain reflectometry</i>)
TSF	Parc à résidus (<i>tailings storage facility</i>)
URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
w _L	Limite de liquidité (%)
w _{Opt}	Teneur en eau massique optimale [-]

w_p	Limite de plasticité (%)
WCRP	Programme mondial de recherche sur le climat (<i>world climate research programme</i>)
WM	Bloc Watermark
WRC	Courbe de rétention d'eau (<i>water retention curve</i>)
X, Y	Coordonnées cartésiennes du modèle numérique
α	Angle de rotation [-]
α'	Paramètre d'ajustement du modèle de Fredlund et Xing (1994) [L]
α_{vG}	Paramètre empirique d'ajustement du modèle de van Genuchten (1980) [L ⁻¹]
β	Compressibilité du sol [L.M ⁻¹ .T ⁻¹]
Δ_H	Différence entre les charges hydrauliques simulées [L]
Δ_θ	Différence entre les teneurs en eau volumique simulées [-]
ΔPr	Changement relatif de précipitations (%)
ΔT	Changement relatif de température (°C)
$\rho_d \max$	Masse volumique sèche maximale [M.L ⁻³]
θ	Teneur en eau volumique [-]
θ_e	Teneur en eau équivalent [-]
θ_r	Teneur en eau volumique résiduelle [-]
θ_{sat}	Teneur en eau volumique à saturation [-]
$\theta_{Sr=85\%}$	Teneur en eau correspond à un degré de saturation égal à 85 % [-]
θ_w	Teneur en eau volumique [-]
$\theta_{w,r}$	Teneur en eau résiduelle [-]
$\theta_{w,s}$	Teneur en eau à saturation [-]
ψ	Succion matricielle [L]
ψ_a	Pression d'entrée d'air (ou AEV) [L]

ψ_n	Paramètre normatif (modèle MK) [L]
ψ_r	Succion résiduelle [L]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Récapitulatif de revue de littérature sur les risques, les vulnérabilités, les opportunités et les stratégies d'adaptation pour les différents domaines de l'industrie minière face aux CC (Pearce et al., 2009).....	169
Annexe B Principaux impacts et risques associés aux opérations minières face aux CC (Bussière et al., 2017).....	174
Annexe C Principaux récents rapports traitant de l'impact des CC sur la restauration minière .	175
Annexe D Résultats des simulation climatiques de la région Abitibi sur la période 1980-2100 (Roy, 2015).....	178
Annexe E Moyennes annuelles des mesures de succion matricielle, de teneur en eau volumique et de degré de saturation associé dans la couche de rétention d'eau (niveau 2-1) de la CEBC de lorraine	183
Annexe F Évolution des données climatiques utilisées dans les modélisation numériques entre 2001 et 2003 pour le scénario de climat historique et entre 2098 et 2100 pour le scénario de changements climatique	185

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le développement des sociétés est depuis toujours lié à l'exploitation des ressources naturelles, notamment les métaux et les minéraux. La demande mondiale est en continuelle augmentation et pousse l'activité minière à s'intensifier en exploitant des gisements avec des teneurs de plus en plus basses. La quantité de rejets miniers associée est colossale et leur gestion constitue une problématique environnementale majeure pour les exploitations minières, qu'elles soient en activité ou abandonnées (Aubertin et al., 2002).

Les problématiques environnementales associées aux rejets solides générés par l'industrie minière résident dans leur stabilité physique au sein des haldes à stériles et des parcs à résidus, mais principalement dans leur stabilité chimique (Bussière et al., 2005; Aubertin et al., 2015). En effet, au contact des conditions atmosphériques, en particulier l'eau et l'oxygène de l'air, les minéraux des rejets et stériles miniers, principalement les sulfures, s'oxydent et génèrent de l'acidité et/ou des contaminations en métaux (Jambor, 1994; Nordstrom, 2000). Ces phénomènes, appelés drainage minier acide (DMA) et drainage neutre contaminé (DNC), constituent des enjeux majeurs en termes de prédiction, de contrôle et de traitement à court et long termes. En effet, le drainage minier, en particulier le DMA, n'est pas un phénomène qui tend à s'arrêter et l'acidification des eaux peut se poursuivre pendant des dizaines, voire des centaines d'années après la fermeture de l'exploitation (Bussière et al., 2001). En plus des risques environnementaux intrinsèques aux activités minières, le secteur minier doit faire face aux changements climatiques (CC). Ces derniers entraînent des déséquilibres responsables de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité d'évènements météorologiques extrêmes : sécheresses intenses, pluies diluviennes, etc. (RNCREQ, 2014); ces dérèglements augmentent à leur tour les risques environnementaux associés aux problèmes de stabilité chimique et physique.

La plupart des pays industrialisés ont, depuis plusieurs dizaines d'années, développé des réglementations afin de réduire les impacts environnementaux liés aux ruptures des digues, à la génération et à la gestion de drainage minier, etc. Concernant la réhabilitation des sites miniers, ces règles imposent aux compagnies de prévoir des travaux et des ouvrages de restauration afin de minimiser et contrôler les risques environnementaux durant les opérations et à la fin de l'exploitation. Cependant, la conception des ouvrages de restauration minière est actuellement effectuée en tenant compte du climat historique et actuel, mais elle ne considère pas les CC

(Aubertin et al., 2015). Dans le cadre du présent projet, l'accent sera porté sur le contrôle de la génération de DMA et sur l'impact des CC sur les ouvrages de restauration minière prévus à cet effet.

1.1 Formation du DMA

Le drainage minier acide (DMA) est habituellement considéré comme le principal phénomène affectant les écosystèmes à proximité des sites miniers (Aubertin et al., 2002). Ce dernier résulte de l'oxydation naturelle de minéraux sulfurés (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, arsénopyrite, etc.) exposés aux conditions atmosphériques, principalement l'oxygène de l'air et l'eau de pluie (Nicholson et Scharer, 1994). L'impact du DMA sur la qualité des eaux (de surface et souterraines) d'un site minier se traduit par une baisse de pH, une augmentation des concentrations en métaux solubles et de fortes concentrations de matières en suspension (Aubertin et al., 2002).

Dans les rejets miniers, les minéraux sulfurés les plus communément rencontrés sont la pyrite et la pyrrhotite. L'oxydation de la pyrite peut être décrite en trois étapes présentées à l'aide des équations 1.1 à 1.4 (Rimstidt et Vaughan, 2003) :

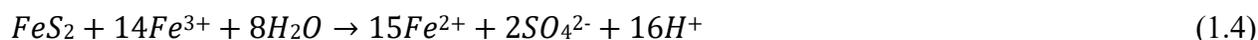
1. Oxydation directe de la pyrite par l'oxygène et l'eau à pH compris entre 5 et 7 (équation 1.1)



2. Oxydation du fer ferreux libéré dans l'équation 1.1 (équation 1.2) et hydrolyse du fer ferrique libéré dans l'équation 2 à pH~5 (équation 1.3)



3. Oxydation indirecte de la pyrite par le fer ferrique qui ne précipite plus à pH<3 (équation 1.4)



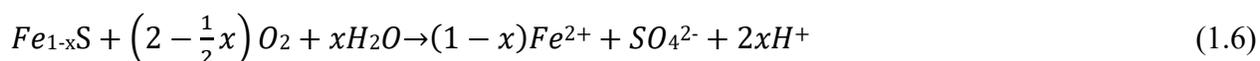
La réaction globale de l'oxydation de la pyrite se présente ainsi (équation 1.5)



Ainsi, la réaction complète d'oxydation directe de la pyrite, d'hydrolyse du Fe^{3+} et de précipitation des hydroxydes de fer (somme des équations 1.1, 1.2 et 1.3) engendre la formation de 4 moles de

H^+ pour une mole de pyrite. La réaction d'oxydation indirecte de la pyrite quant à elle (équation 1.4) forme 16 moles de H^+ par mole de pyrite oxydée. De plus, à pH inférieur à 3, l'oxydation de la pyrite par le fer ferrique est 10 à 100 fois plus rapide que l'oxydation par l'oxygène (Mylona et al., 2000).

L'oxydation de la pyrrhotite suit les mêmes étapes que celle de la pyrite, la réaction globale est présentée au travers de l'équation 1.6. Cependant, à l'air libre, le taux d'oxydation de la pyrrhotite est de 20 à 100 fois plus élevé que celui de la pyrite (Nicholson et Scharer, 1994).



Il est à noter que plusieurs paramètres peuvent influencer la cinétique de ces réactions tels que la température, l'humidité, la granulométrie des minéraux sulfureux, leur degré de libération, leur structure cristalline, la formation de minéraux secondaires, les conditions d'oxydation (biotique ou abiotique), le pH de l'eau de contact (Jambor, 1994; Pratt et al., 1994; Nicholson et Scharer, 1994; Aubertin et al., 2002; Belzile et al., 2004; Elberling, 2005; Lehner et al., 2007). L'oxygène est le principal élément déclencheur de ces réactions, il est de ce fait l'élément clé dans le contrôle et la prévention de l'oxydation des sulfures (Jambor, 1994; Nicholson et Scharer, 1994; Aubertin et al., 2002; Lehner et al., 2007).

La présence de bactéries peut également catalyser ces réactions d'oxydation des sulfures (Blowes et al., 2003). De nombreuses bactéries neutrophiles et acidophiles sont retrouvées sur les sites miniers. Trois types de bactéries interviennent directement dans la formation du DMA (Nordstrom, 2000; Blowes et al., 2013) : *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans*.

Malgré la présence de minéraux sulfurés générateurs d'acidité, les résidus miniers peuvent également contenir des minéraux ayant un potentiel de neutralisation, principalement des carbonates et des silicates. Ainsi, lorsque la capacité de neutralisation est supérieure au potentiel d'acidité, les résidus ne génèrent pas de DMA (SRK, 1989). La classes des minéraux carbonatés, en particulier les carbonates de calcium et de magnésium (calcite, magnésite, dolomite, ankérite, etc.), en raison de leur cinétique de réaction élevée, engendre un important potentiel de neutralisation (Plante et al., 2012). Leur présence permet de maintenir un pH aux alentours de 5,5 sur certains sites (Blowes et al., 2003). Les silicates ont quant à eux une réactivité moindre, mais

peuvent contribuer à neutraliser la génération de DMA à long terme (Lawrence et Wang 1997, Paktunc 1999).

Il est important de noter que les réactions d'acidification et de neutralisation conduisent à la formation des minéraux secondaires tels que les sulfates, les carbonates, les oxydes, les hydroxydes, les oxy-hydroxydes, les phosphates et les arsénates (Nordstrom et Alpers, 1999). La formation de ces minéraux peut affecter la qualité des eaux d'infiltration. Les oxydes et les oxyhydroxydes (goethite, lepidocrocite et ferrihydrite) sont les plus courants et responsables de la couleur ocre caractéristique du DMA ((Nordstrom, 2000; Blowes et al., 2013). Certaines propriétés hydrogéologiques des résidus miniers peuvent également être modifiées telle une baisse de la porosité qui influence les flux d'eau et d'oxygène (Blowes et al., 1991; Aubertin et al., 2002, Elghali et al., 2017). Plus d'informations sur la génération du DMA peuvent être trouvées dans Nordstrom (2000) et Blowes et al. (2013).

1.2 Méthodes de prévention et de contrôle du DMA

Lorsque des rejets miniers sont identifiés comme générateurs de DMA, il est nécessaire de mettre en place des mesures limitant les impacts environnementaux. Les méthodes développées afin de limiter la génération de DMA ont pour principal objectif d'éliminer un ou plusieurs des éléments réactifs de l'équation d'acidification, i.e. soit l'oxygène, l'eau ou les minéraux sulfureux (cf. équations 1.1 à 1.6; SRK, 1989; Aubertin et al., 2002). Chaque site minier constitue un cas particulier ne pouvant mener à une méthodologie unique (Khire et al., 2000; Aubertin et al., 2002; Gee et al., 2006, Pabst, 2011). En effet, différentes méthodes de prévention ou de restauration existent en fonction des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, géochimiques spécifiques à chaque site minier et en fonction des conditions climatiques des régions où ils se situent. Le tableau 1.1 récapitule de façon générale les différentes techniques utilisées et quelques approches spécifiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

Tableau 1.1 : Principales méthodes de prévention et de contrôle du DMA (adapté de Pabst, 2011 et Aubertin et al., 2002)

Exclusion de l'eau	Exclusion de l'oxygène	Exclusion des sulfures	Méthodes indirectes
Membranes étanches	Recouvrement en eau	Désulfuration	Action des bactéries
Sols imperméables	Recouvrement multicouche	Passivation des surface	Neutralisation
Mélanges (bentonite, ciments)	Consommation d'oxygène		Contrôle de température
Scellants, enduits	Couvertures étanches		

1.2.1 Exclusion des sulfures

Exclure les minéraux sulfureux de la gangue est une façon de contrôler la génération du DMA, en particulier pour les sites en opération. Cette méthode s'applique principalement pour les rejets de concentrateur et consiste à extraire les sulfures au moyen de procédés minéralurgiques tels que la flottation ou la séparation gravimétrique, à la fin du procédé minéralurgique d'enrichissement du minerai (Humber, 1995; Bussière et al., 1995; 1998; Mermillod-Blondin et al., 2005). Les méthodes gravimétriques permettent de séparer les sulfures de la gangue en raison du contraste de densité (la densité relative est en général de 4 à 6 pour les sulfures et de 2,7 pour les minéraux de gangue). Les techniques de séparation gravimétriques sont variées, les plus utilisées sont les tables à secousses, les spirales de Humphrey, les milieux denses et le cyclonage. La flottation qui est la méthode de concentration la plus commune utilise des collecteurs également appelés tensioactifs et des moussants permettant de flotter les sulfures et autres phases métalliques. Ces techniques de séparation génèrent un concentré de sulfures et des résidus désulfurés non générateurs d'acide. Le concentré de sulfure peut être retourné sous terre sous forme de remblai minier (Benzaazoua et al., 2008), tandis que la partie désulfurée peut être utilisée comme matériau de recouvrement dans des barrières à l'oxygène par exemple (Bussière et al., 1995; Demers et al., 2008; Kalonji-Kabambi, 2014).

1.2.2 Exclusion de l'eau

Exclure l'eau du système permet également de contrôler la réactivité (Aubertin et al., 2015; Bossé, 2014; MEND, 2001). Dans les climats humides, cette méthode implique la mise en place d'une barrière étanches constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux naturels et/ou synthétiques à

faible conductivité hydraulique (k_{sat}) tels des argiles, des tills compactés, des géomembranes, des géocomposites bentonitiques, des géotextiles, etc. (Aubertin et al., 1995; 2015; Albright et al., 2006). Dans les climats arides ou semi-arides, des couvertures à effets de barrière capillaire de type stockage-relargage (Store-and-Release) sont davantage utilisées (Ross, 1990; Benson et al., 2001; Zhan et al., 2006, 2014; Aubertin et al.; 2009, Bossé, 2014; Knidiri, 2015). Ces barrières également appelées couvertures évapo-transpirantes contrôlent la percolation nette au sein du recouvrement pour limiter la quantité d'eau atteignant les rejets miniers. Elles peuvent être constituées de plusieurs couches, dont une couche de bris capillaire et une couche de rétention. L'eau est ainsi stockée par capillarité durant les périodes de pluie puis libérée durant les périodes de sécheresse par évapotranspiration ou drainage latéral (Zhan et al., 2001; Aubertin et al., 2009).

1.2.3 Exclusion de l'oxygène

En climat humide comme au sud du Québec, on considère habituellement que les techniques visant à limiter l'infiltration d'oxygène sont les plus efficaces à long terme (SRK, 1989). Les systèmes de recouvrement en eau sont une de ces techniques et regroupent le dépôt subaquatique, l'ennoisement des rejets miniers (e.g. Amyot et Vézina, 1997; Awoh, 2012; MEND, 2001) et également la technique de la nappe phréatique surélevée (NPS; Ouangrawa et al., 2005; Demers, 2008; Ethier 2018). Le dépôt subaquatique consiste à déposer les résidus dans un bassin d'eau comme un lac ou une fosse existante et l'ennoisement des résidus sulfureux (Awoh, 2012), tandis que l'ennoisement qui est subséquent au dépôt des résidus (aussi appelé déposition subaquatique) nécessite la mise en place de structure afin de créer un recouvrement en eau allant de quelques décimètres à quelques mètres. La NPS est considérée comme un cas particulier des recouvrements en eau et consiste à maintenir les résidus dans un état proche de la saturation par capillarité (Ouangrawa; 2005, Demers, 2008). L'infiltration d'oxygène peut également être contrôlée en plaçant des matériaux consommateurs d'oxygène, tels des copeaux de bois, d'écorce ou encore des boues de traitement des eaux par-dessus les résidus (e.g. Tassé et al., 1996; Rakotonimaro, 2017). Des couvertures multicouches à effets de barrière capillaires appelées CEBC peuvent également être mises en place (e.g. Nicholson et al., 1989; Aubertin et Chapuis, 1991; Ricard et al., 1997; Bussière et al. 2007). Malgré les coûts importants liés au transport et à la mise en place des matériaux meubles, les recouvrements multicouches s'avèrent souvent la méthode la plus efficace dans le contexte géographique québécois (Bussière et al., 1998). Ce type de recouvrement est composé de plusieurs

couches superposées de matériaux naturels ou synthétiques et a pour objectif de garder au moins une des couches avec un haut degré de saturation ($S_r > 85\%$) afin de contrôler la migration des gaz vers les résidus réactifs tout en limitant l'infiltration de l'eau jusqu'aux rejets (Aubertin et al., 1995; 2002). Dans le cadre de ce projet, c'est cette technique qui est à l'étude et qui est décrite plus en détails à la section 2.2.

1.3 Impact des changements climatiques sur la restauration minière

La conception des ouvrages de restauration minière, présentés précédemment, s'effectue en fonction des propriétés des matériaux utilisés, des conditions hydrogéologiques du site, mais également en fonction de l'interaction entre le sol et l'atmosphère et donc des conditions climatiques (Aubertin et al., 2002). Le climat historique et actuel est en effet intégré au plan de fermeture et de restauration des sites miniers, cependant les changements climatiques (CC) sont encore très peu pris en considération (Aubertin et al., 2015).

En effet, les travaux concernant l'impact des CC sur le secteur minier sont récents en comparaison à d'autres domaines tels l'agriculture, les ressources en eau, la forêt, l'environnement bâti, du transport, l'énergie, la biodiversité, la santé ou encore le tourisme pour lesquels le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'est intéressé aux impacts et à l'adaptation face aux CC dès 1995 (Watson et al., 1996; Feenstra et al., 1998; IPCC, 2007; Desjarlais et al., 2010).

Les premières études de risques du secteur minier face aux CC ont commencé au début des années 2000, portant principalement sur les infrastructures telles que les routes et les bâtiments et touchant davantage les climats nordiques (The Northern Review, 2001; Smith et Levasseur, 2002; Fernandez, 2003; Instanes et al., 2005). Les travaux de Pearce et al. (2009), effectués pour la Fondation David Suzuki, ont ensuite apporté une contribution considérable sur les connaissances et les questions soulevées par l'impact des CC sur le secteur minier canadien. L'annexe A présente le tableau récapitulatif de la revue de littérature effectuée par Pearce et al. (2009) sur les risques et vulnérabilités, les opportunités et les stratégies d'adaptation pour les différents domaines de l'industrie minière face aux CC (transport, communication, infrastructure, opération et fermeture).

Au début des années 2010, plusieurs compagnies minières ont fait l'objet de consultations concernant leur pratique et leur questionnement par rapport aux CC sur leurs activités (Ford et al.,

2010; Pearce et al., 2010, BSR, 2011). La majorité des répondants convenait que davantage d'informations et d'outils pour identifier les risques et agir sur l'adaptation face aux CC seraient utiles et que les gouvernements devraient jouer un plus grand rôle dans l'élaboration de prévisions climatiques, de cadres et de meilleures pratiques et politiques (incitations et réglementations) pour aider les entreprises faisant face aux risques du changement climatique. L'International Council on Mining and Metals (ICMM) indiquait également en 2013 qu'« une prochaine étape clé consistera à identifier les moyens d'incorporer ou d'améliorer le traitement des considérations relatives aux changements climatiques dans le cadre des procédures existantes de gestion des risques et de planification ».

En parallèle de ces attentes et de ces questionnements, le ministère des Ressources Naturelles du Canada (MRN) a établi en 2012 la Plateforme canadienne d'adaptation aux changements climatiques. Cette initiative réunit des représentants des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, de l'industrie, des collectivités, du milieu universitaire, ainsi que des représentants d'organismes autochtones, professionnels et sans but lucratif. Cette Plateforme a pour but de créer un espace où les outils et les renseignements nécessaires aux décideurs des régions et de l'industrie pour s'adapter aux CC sont mis à disposition. Plusieurs études de cas de mines mettant en place des stratégies d'adaptation face aux CC ont également été effectuées (Pittman et al., 2013; Duerden et al., 2014; FBC et Galore Creek Mining Corporation, 2014; FBC et MIRARCO, 2014a; 2014b; Rodgers et al., 2014; Perrin et al., 2015).

Concernant le secteur minier québécois en particulier, le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) et l'Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale (URSTM), ont effectué en 2017 un important travail qui a permis d'identifier les risques et les vulnérabilités du domaine minier de la province face aux CC (Bussière et al., 2017). L'annexe B présente le tableau récapitulatif des risques reliés au CC issus de ces travaux. Il en ressort que les CC sont désormais une préoccupation pour les compagnies minières et les gouvernements, mais que les politiques et les initiatives d'adaptation ne sont pas encore clairement mises en place de façon systématique.

Basé sur de récentes études au Canada et aux États-Unis, l'annexe C résume les principaux travaux concernant l'impacts des CC sur la restauration minière. Il en ressort que les CC impacteront davantage la phase de restauration des sites miniers par rapport au reste des activités minières telles que l'exploration et l'exploitation (Bussière et al., 2017) et que les travaux portant sur l'adaptation

des techniques de restauration et de gestion des résidus sont encore peu nombreux. Ils sont cependant en plein essor, en particulier au Nord du Québec (Journeaux Assoc., 2012; Nunavut Regional Adaptation Collaborative, 2012) et plus récemment en Alberta (Rooney et al., 2015; Alam et al., 2017, 2018), en Ontario (Ahmad, 2018) et au Québec (Bussière et al., 2017; Ethier et al., 2018). De plus, l'hypothèse utilisée dans la conception des plans de fermeture et de restauration des sites miniers selon laquelle les relations entre l'environnement abiotique, l'hydrologie et les variables climatiques sont stationnaires est désormais remise en question (Milly et al., 2008; Rooney et al., 2015).

L'enquête menée par l'URSTM auprès d'experts du secteur minier a également permis de définir les niveaux de risque et de vulnérabilité associés aux principaux impacts anticipés des CC pour la restauration minière (Bussière et al., 2017; tableau 1.2). Les vulnérabilités des CC sur différentes méthodes de restauration minière (systèmes multicouches alternatifs et conventionnels, recouvrement en eau, avec nappe surélevée, CEBC et recouvrement isolant) ont également été étudiés au travers de cette étude et les impacts positifs ou négatifs des CC sur ces systèmes de restauration ont été définis (tableau 1.3).

Tableau 1.2 : Niveaux de risque et de vulnérabilité des principaux impacts liés à la restauration des sites miniers (Bussière et al., 2017)

Impacts des changements climatiques	Niveau de risque		Vulnérabilité
Diminution de la performance des recouvrements isolants	Élevé		Très élevée
Domages aux matériaux de recouvrement en raison de la fonte du pergélisol	Modéré		Modérée
Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol	Élevé		Modérée
Capacité insuffisante des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue	Élevé		Élevée
Défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés	Élevé		Élevée
Diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau	Modéré	Élevé	Faible
Diminution de la performance des barrières à l'oxygène	Modéré	Élevé	Modérée
Perte d'accessibilité aux sites restaurés	Faible	Modéré	Faible

Tableau 1.3 : Impacts positifs et négatifs des CC sur les différentes méthodes de restauration minière (d'après Bussière et al., 2017)

Méthode de restauration	Impact +/-	Impact
Systèmes alternatifs	-	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'efficacité des couches à granulométrie fines à contrôler la percolation profonde face à l'augmentation des précipitations; • Instabilité physique des parties inclinées face à l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes).
	+	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la capacité de libération liée à l'augmentation de l'évaporation potentielle.
Systèmes conventionnels	-	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'efficacité des couches à faible conductivité hydraulique (matériaux synthétiques et/ou naturels) à contrôler la percolation profonde face à l'augmentation des précipitations; • Altération de l'intégrité des composantes suivantes : couche d'argile, géomembrane, GCB) pouvant être affectée par les changements de températures, l'augmentation des cycles de gel-dégel; • Instabilité physique des parties inclinées face à l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes).
	+	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la capacité de libération liée à l'augmentation de l'évaporation potentielle.
Recouvrement en eau	-	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes en périodes humides ou suite à des événements de précipitations extrêmes; • Instabilité des couvertures aqueuses face à l'augmentation des températures (en périodes sèches, des précipitations (en périodes humides) et des événements extrêmes); • Instabilité physique des ouvrages de rétention face à l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes) et des cycles gel/dégel.
	+	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien d'une épaisseur d'eau suffisante lié à l'augmentation des précipitations
Recouvrement avec nappe surélevée	-	<ul style="list-style-type: none"> • Instabilité des nappes phréatiques face à l'augmentation des précipitations (en périodes humides) et des températures (en périodes sèches); • Instabilité du degré de saturation des résidus miniers en périodes sèches (pour des nappes phréatiques situées sous la surface des résidus);

Méthode de restauration	Impact +/-	Impact
Recouvrement avec nappe surélevée (suite)	-	<ul style="list-style-type: none"> • Instabilité physique des ouvrages de rétention face à l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes) et des cycles de gel/dégel • Diminution de l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes en périodes humides ou suite à des évènements de précipitations extrêmes.
	+	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien voire augmentation d'un haut degré de saturation des résidus miniers lié à l'augmentation des précipitations.
CEBC	-	<ul style="list-style-type: none"> • Instabilité du degré de saturation (S_r) de la couche de rétention d'eau face à l'augmentation des températures (en périodes sèches); • Instabilité physique des parties inclinées face à l'augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes).
	+	<ul style="list-style-type: none"> • Maintien voire augmentation d'un haut degré de saturation dans les couches de rétention d'eau lié à l'augmentation des précipitations.
Recouvrement isolants	-	<ul style="list-style-type: none"> • Approfondissement de la zone active; • Instabilité du pergélisol; • Instabilité physique du recouvrement face à la fonte du pergélisol, l'augmentation des températures et des précipitations (moyennes ou extrêmes) ainsi que l'augmentation des cycles de gel/dégel.

Il est également à noter que la mise en végétation des recouvrements, destinée à contrôler l'érosion (hydrique et éolienne) et à redonner au site minier son aspect naturel, pourrait être affectée par les CC. Les variations climatiques prévues pourraient en effet modifier le nombre et le type d'espèces végétales et pourraient affecter la performance à long terme des recouvrements par l'augmentation de la bio-intrusion par exemple (Bussière et al., 2017).

1.4 Objectifs du projet de recherche

Tel que mentionné dans les sections précédentes, les recouvrements de type couverture à effets de barrière capillaire (CEBC) sont fréquemment utilisés en climat humide, en particulier au sud du Québec, pour contrôler la génération de DMA (Ricard et al., 1997; Bussière et al., 1998; Aubertin et al., 2002; Bédart et al., 2005; Dagenais, 2005). Cependant, la plupart des études menées sur l'efficacité des CEBC n'ont pas investigué l'impact des changements climatiques (CC) sur ce type de recouvrement. En effet, les travaux portant sur l'adaptation des techniques de restauration et de gestion des résidus face aux CC sont encore peu nombreux. De plus, les travaux existants portent principalement sur des études générales, bibliographiques et non sur des cas spécifiques. Des études plus ciblées sont en plein essor, en particulier au Nord du Québec et plus récemment en Ontario et en Alberta, mais au sud du Québec, l'impact des changements climatiques sur ces infrastructures reste peu étudié. L'objectif principal du projet de maîtrise est d'évaluer l'impact des CC sur le comportement hydrogéologique de la CEBC installée sur le site minier Lorraine situé au Québec et générateur de DMA. Des modélisations numériques du comportement hydrogéologique sont développées à partir des données météorologiques et hydrogéologiques récoltées sur le terrain. Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- Calibrer et valider un modèle numérique représentatif du comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine;
- Évaluer numériquement l'influence de l'évolution des conditions climatiques jusqu'en 2100 sur l'efficacité de la CEBC étudiée;
- Définir des conditions de sécheresse basées sur les conditions climatiques spécifiques du site Lorraine;
- Évaluer numériquement l'influence d'évènements de sécheresse extrêmes sur l'efficacité de la CEBC étudiée, autant pour les conditions actuelles que futures.

1.5 Contenu du mémoire

Les travaux de recherche réalisés pour ce projet ont été effectués afin d'atteindre les objectifs spécifiques cités précédemment. Ils s'appuient sur des modélisations numériques dont les étapes peuvent être résumées comme suit :

- Étude de la conception et de l'instrumentation de la CEBC du site Lorraine;
- Collecte et gestion des données hydrogéologiques et météorologiques disponibles;
- Calibrage et validation du modèle numérique de la CEBC du site Lorraine;
- Application de conditions extrêmes sur le modèle actuel;
- Application de trois scénarios de CC jusqu'en 2100;
- Application de conditions extrêmes sur le pire scénario de CC.

Le contenu du mémoire peut être résumé comme suit. Après une première mise en contexte de la problématique dans le présent chapitre, le chapitre 2 présente une revue de littérature en lien avec le sujet de recherche. Les principales équations gouvernant l'écoulement de l'eau en milieu poreux saturé et non saturé sont décrites dans un premier temps, suivi d'une présentation des principales propriétés hydrogéologiques des matériaux saturés et non saturés. Dans un deuxième temps, le fonctionnement des CEBC et des facteurs influençant leur performance sont présentés. L'accent est ensuite mis sur les scénarios climatiques et les notions de climatologie nécessaires à la compréhension des CC et des modèles climatiques utilisés dans ce projet. Finalement, l'approche numérique de résolution de l'équation générale de l'écoulement de l'eau (équation de Richards) et le code numérique utilisés dans la présente étude (SEEP/W, Geo-Slope International Ltd.) permettant de modéliser l'écoulement de l'eau à travers le milieu poreux non saturé sont présentés.

Le chapitre 3 décrit le site à l'étude, l'ancien site minier Lorraine, ainsi que les travaux de restauration entrepris. L'instrumentation du site ainsi que le suivi de performance sont ensuite décrits ainsi que la collecte et la gestion données disponibles tant hydrogéologiques que météorologiques. La méthodologie des simulations hydrogéologiques est ensuite présentée en décrivant la géométrie du modèle et les différents paramètres d'entrée tels que les propriétés des matériaux, les conditions initiales et les conditions aux frontières. Une attention particulière est

portée aux conditions climatiques et à la sélection des modèles climatiques utilisés dans les modélisations numériques.

Le chapitre 4, constituant le cœur du mémoire, présente un article soumis à la revue *Hydrogeology Journal*. Il contient les principaux résultats des modélisations du comportement hydrogéologique en mettant l'accent sur l'influence des scénarios de CC et des conditions de sécheresse extrêmes simulées sur le comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine. L'influence des propriétés des matériaux et des conditions de surface est également discutée et une comparaison entre l'approche conventionnelle et la nouvelle approche de modélisation des événements de sécheresse est effectuée.

Le chapitre 5 constitue une discussion générale et présente une comparaison entre deux géométries du modèle numérique et décrit également les limites du modèle développé. L'influence de la végétation est également abordée en établissant un cas théorique et une analyse préliminaire d'une forêt développée sur le site Lorraine. Enfin, le mémoire se termine par le chapitre 6 qui présente les principales conclusions du projet de recherche et les recommandations. Les annexes apportent également des informations complémentaires à ces résultats.

1.6 Contributions scientifiques et originalité du projet

Il est important de noter que cette étude est la première composante d'un plus vaste projet dont les objectifs consistent à intégrer et développer de nouveaux critères de conception des ouvrages de rétention et de restauration face à l'augmentation des événements climatiques extrêmes (précipitations et sécheresses). Le projet global vise également à développer une approche méthodologique pour intégrer les CC dans la conception des parcs à résidus miniers et des méthodes de restauration des sites miniers. Plusieurs travaux sur l'impact des précipitations extrêmes sur le site minier de Canadian Malartic au Québec viendront compléter ce projet (Gandonou, en cours; Labonté-Raymond, en cours). L'impact des CC et des sécheresses est également étudié sur un recouvrement de type nappe phréatique surélevée (NPS) établi sur le site Doyon-Westwood au Québec (Lieber et al., 2018; Lieber, en cours). Le développement d'indices climatiques spécifiques à ces différents sites est également en cours (Bresson et al., 2018; Bresson, 2019, en cours).

Dans le cadre de ce projet, les travaux sont effectués sur un cas réel. Cependant, les approches développées seront applicables à d'autres sites localisés en climat humide, en particulier au Québec. Ces travaux viennent ainsi compléter les études générales et bibliographiques existantes sur l'impact des CC sur le secteur minier et viennent appuyer à l'aide d'un exemple concret l'influence des CC sur la performance à long-terme des ouvrages de restauration minière.

Les principales contributions scientifiques de ce mémoire ont été présentées dans un article de revue soumis à Hydrogeology Journal (cf. chapitre 4) dont la référence complète est la suivante :

Hotton, G., Bussière, B., Pabst, T., Bresson, E., Roy, P. (2019). Hydrogeological modeling to assess the cover with capillary barrier effect technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada with climate change. Soumis à Hydrogeology Journal (Avril 2019).

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Une brève introduction sur les méthodes de prévention et du contrôle du drainage minier acide ainsi que sur les impacts des changements climatiques sur le secteur minier a été présentée au Chapitre 1. Il a été mentionné que la technique de la couverture à effets de barrière capillaire (CEBC) compte parmi les techniques les plus utilisées afin de limiter la génération de DMA de résidus miniers en climat humide. Le présent projet vise à évaluer l'impact des CC sur le comportement hydrogéologique des CEBC au sud du 50^{ème} parallèle et ce, à l'aide de la modélisation numérique. Ainsi, les lois régissant l'écoulement de l'eau et la migration de l'oxygène dans les matériaux poreux sont tout d'abord présentées dans ce chapitre. Les différents facteurs d'influence pouvant affecter l'efficacité de ce type de recouvrement sont ensuite identifiés. Les notions développées en sciences du climat sont par la suite présentées afin d'éclaircir les différents concepts liés aux informations climatiques depuis les données de stations météorologiques jusqu'aux scénarios climatiques modélisés. L'efficacité à long terme des recouvrements pouvant être évaluée numériquement, les principes de modélisation numérique du comportement hydrogéologique sont également présentés avec un portrait plus particulier sur le logiciel SEEP/W (Geo-Slope, International Ltd.) et les différentes équations et principes physiques qu'il permet de résoudre. Finalement, les besoins en recherche concernant le lien entre les CC et la restauration minière sont présentés à la fin du chapitre avec un accent particulier sur la conception des CEBC.

2.1 Notions fondamentales de l'écoulement de l'eau et de la diffusion des gaz

Afin de prédire l'efficacité d'une CEBC, il est nécessaire de maîtriser les concepts liés à l'écoulement de l'eau et à la diffusion des gaz en milieu poreux non saturé. En effet, l'efficacité des CEBC est directement reliée au comportement des sols ou matériaux meubles en milieu non saturé.

2.1.1 Écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé

L'écoulement de l'eau dans la zone située au-dessus de la nappe phréatique, également appelée zone vadose, correspond à un écoulement en milieu non saturé car les pores du milieu sont soumis à une pression négative. Les CEBC étant dans la plupart des cas situées au-dessus de la nappe phréatique, c'est ce type d'écoulement qui se produit. Dans ces recouvrements, la saturation

partielle des matériaux poreux induit des effets de tension à l'interface eau-gaz et crée ainsi une pression négative, également appelée succion. Mathématiquement, l'écoulement en milieu non saturé peut être représenté par l'équation de Richards (équation 2.1), développée à partir de l'équation de Darcy et de l'équation de conservation de la masse (Richards, 1931; Hillel, 1980) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\psi)}{\partial z} \quad (2.1)$$

Avec θ la teneur en eau volumique [-], ψ la succion matricielle [L] et $k_{x,y,z}$ la conductivité hydraulique selon axes (x,y,z) dans un système de coordonnées cartésien [L.T⁻¹].

L'équation de Richards indique que l'écoulement de l'eau en milieu non saturé dépend de la conductivité hydraulique et de la variation de succion dans l'espace. Elle consiste en une équation aux dérivées partielles (EDP) de type parabolique en milieu non saturé et elliptique en milieu saturé (Musy et Soutter, 1991).

2.1.2 Courbe de rétention d'eau (CRE)

Afin de caractériser les propriétés hydriques d'un milieu poreux en conditions non saturées, la courbe de rétention d'eau (CRE) est utilisée (figure 2.1). La CRE relie la teneur en eau volumique θ et la succion matricielle ψ et représente la capacité d'un matériau à stocker l'eau à des pressions négatives. Cette relation est spécifique à chaque matériau. La figure 2.1 présente les CRE pour un silt et pour un sable.

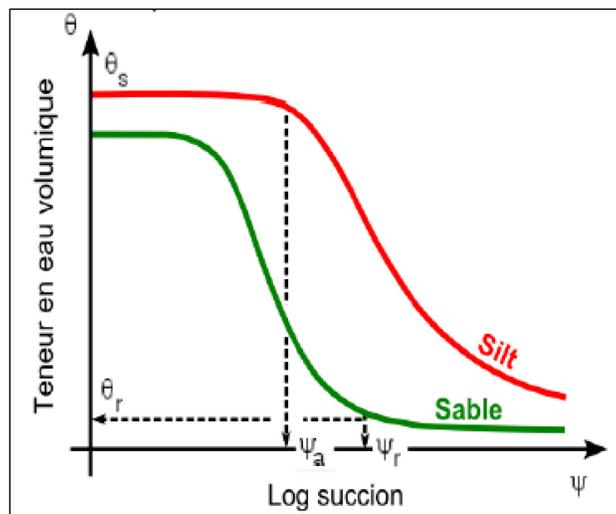


Figure 2.1 : Courbe de rétention d'eau d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2015)

A partir de la CRE, deux valeurs particulières peuvent être définies, soit ψ_a représentant la pression d'entrée d'air (AEV) [L] correspondant à la pression nécessaire pour résister à la tension exercée dans les plus gros pores et amorcer la désaturation, et ψ_r , la pression résiduelle [L] correspondant à la succion pour laquelle la teneur en eau volumique du sol atteint sa valeur résiduelle θ_r [-] (Aubertin et al., 1995).

2.1.3 Fonction de perméabilité

Comme le définit l'équation 2.1, il est important de connaître les variations de la conductivité hydraulique k par rapport à la succion ψ afin de simuler l'écoulement de l'eau en milieu non saturé. La fonction de perméabilité permet de relier k et ψ et indique que la capacité d'un sol à conduire l'eau diminue lorsque la teneur en air augmente (figure 2.2). Lorsque l'on compare des matériaux de granulométrie différente (un silt et un sable dans le cas de la figure 2.2), on s'aperçoit que le sol fin est moins perméable que le sol grossier à l'état saturé. Cependant, l'inverse peut devenir vrai dans certaines conditions de succion : le sable se drainant plus facilement, la chute de la valeur de k est plus rapide que pour le silt. Le matériau plus grossier peut donc s'avérer moins perméable lorsque la succion est marquée. Ce phénomène contribue aux effets de barrière capillaire dans un système bicouche en réduisant l'écoulement de l'eau d'un matériau fin placé sur un matériau grossier. La rétention d'eau dans la couche supérieure d'un tel système s'en trouve ainsi favorisée (Aubertin, 2015).

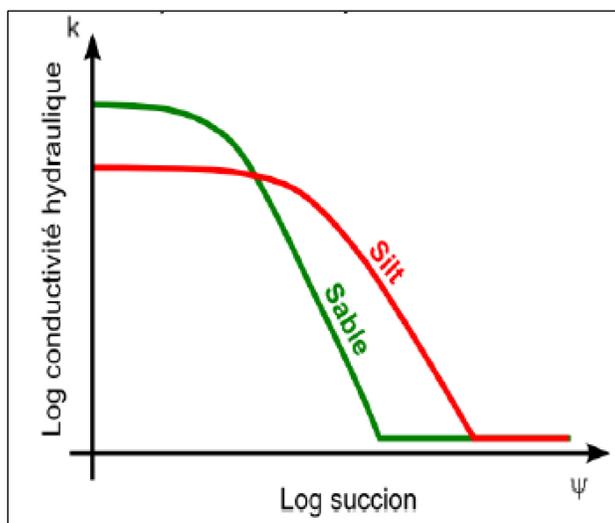


Figure 2.2 : Fonctions de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al., 2015)

Les fonctions de perméabilité peuvent être définies en laboratoire (Hillel 1980); cependant, les méthodes sont coûteuses et la méthode indirecte utilisant la courbe de rétention d'eau est davantage utilisée (Bussière, 1999).

2.1.4 Flux de gaz en milieu poreux non saturé

Les CEBC en climat humide ont pour principal objectif de réduire le flux d'oxygène vers les résidus sous-jacents contenant des minéraux sulfureux susceptibles de s'oxyder. Le principal mécanisme de transport de l'oxygène à travers une CEBC est la diffusion moléculaire (Nicholson et al., 1989). Cette diffusion génère un mouvement moléculaire depuis les zones à forte concentration vers les zones à faible concentration. Le flux d'oxygène qui passe à travers un recouvrement de type CEBC et donc disponible pour l'oxydation des sulfures est fonction du coefficient de diffusion effective D_e et du gradient de concentration d'oxygène. On peut estimer ce flux vertical (1D) à l'aide de la première loi de Fick (e.g. Mbonimpa et al., 2003).

$$F_{O_2} = -D_e \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.2)$$

Avec F_{O_2} le flux d'oxygène par unité de surface [$M.L^{-2}.T^{-1}$], D_e le coefficient de diffusion effectif ($[L^2/T]$), C la concentration d'oxygène qui diffuse [$M.L^{-3}$] et z la distance entre les points d'intérêt [L]. Le signe moins de l'équation indique que le flux s'effectue depuis les zones à forte concentration vers les zones à faible concentration (Bussière et al., 2001).

Le paramètre D_e dépend de la structure des pores et du degré de saturation $S_r = \theta/n$, n étant la porosité. C'est un paramètre important dans la migration de l'oxygène à travers un milieu poreux (Bussière et al, 2001). Sur la figure 2.3, des données expérimentales permettent d'observer l'évolution du coefficient de diffusion en fonction du degré de saturation ainsi que la courbe théorique issue du modèle de Collin et Rasmuson (1988). Ces résultats indiquent que la valeur de D_e décroît rapidement lorsque le degré de saturation augmente et qu'elle devient quasi égale à celle de l'eau (i.e. $2,5.10^{-9} m^2.s^{-1}$) lorsque le degré de saturation est d'environ 90 % (Mbonimpa et al., 2003).

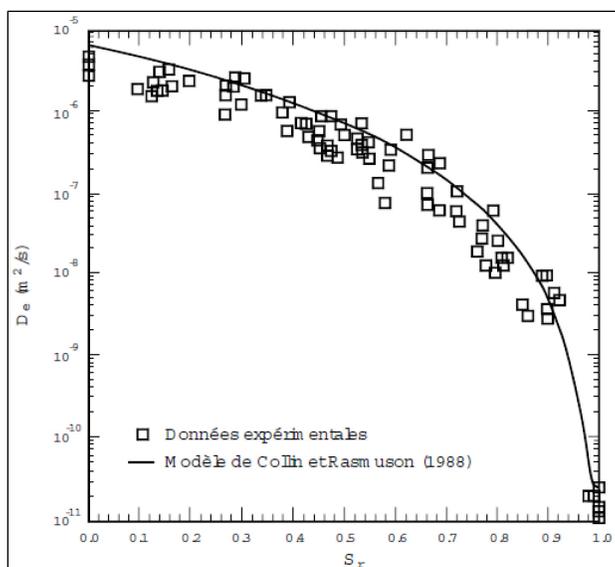


Figure 2.3 : Coefficient de diffusion effectif D_e en fonction du degré de saturation S_r (Aubertin et al., 1999a)

Une CEBC ayant une couche de matériau poreux saturé sera de ce fait autant voire plus efficace qu'un recouvrement d'eau stagnante (Bussière et al., 2001).

2.2 Fonctionnement des CEBC

L'efficacité d'une CEBC est évaluée sur sa capacité à limiter la migration de l'oxygène vers les rejets potentiellement acidogènes sous-jacents en maintenant un degré de saturation S_r suffisamment élevé dans une des couches du recouvrement. Ainsi, la valeur du coefficient de diffusion D_e serait faible et le flux d'oxygène insuffisant pour générer du DMA. Afin de maintenir un haut degré de saturation dans une des couches du recouvrement, les effets de barrière capillaire peuvent être utilisés.

2.2.1 Effets de barrière capillaire

Les effets de barrière capillaire se produisent en milieu non saturé lorsqu'il y a superposition d'un matériau fin au-dessus d'un matériau grossier (Bussière, 1999). En raison du contraste de granulométrie des matériaux (e.g. sable et silt) et de la différence de leurs propriétés hydriques, seul un faible écoulement d'eau depuis la couche de matériau fin vers la couche de matériau grossier se produit (Morel-Seytoux, 1992).

Le phénomène d'effets de barrière capillaire peut s'expliquer à partir des fonctions hydriques des matériaux. Les relations teneurs en eau volumique-succion ($\theta-\psi$) et conductivité hydraulique-succion ($k-\psi$) permettent de décrire les conditions d'écoulement en milieu non saturé. Sur la figure 2.2, on remarque que la valeur de k diminue progressivement lorsque la succion augmente. Des matériaux de granulométrie différente présentent des perméabilités différentes. A $\psi=0$, le matériau grossier (sable) est plus perméable que le matériau fin (silt), mais cela s'inverse sous certaines conditions. Le sable se drainant plus facilement, la chute de la valeur de k est plus marquée que pour le silt. Ainsi, lorsqu'un matériau grossier drainé se retrouve sous un matériau fin, l'eau contenue dans ce dernier ne pourra pas théoriquement s'écouler vers le bas puisque le matériau grossier sous-jacent présente une très faible conductivité hydraulique.

Ces phénomènes permettent ainsi de maintenir un haut degré de saturation dans la couche de matériau fin et donc de limiter la diffusion de l'oxygène et la production de DMA.

2.2.2 Configuration type d'une CEBC

La configuration typique d'une CEBC est présentée à la figure 2.4.

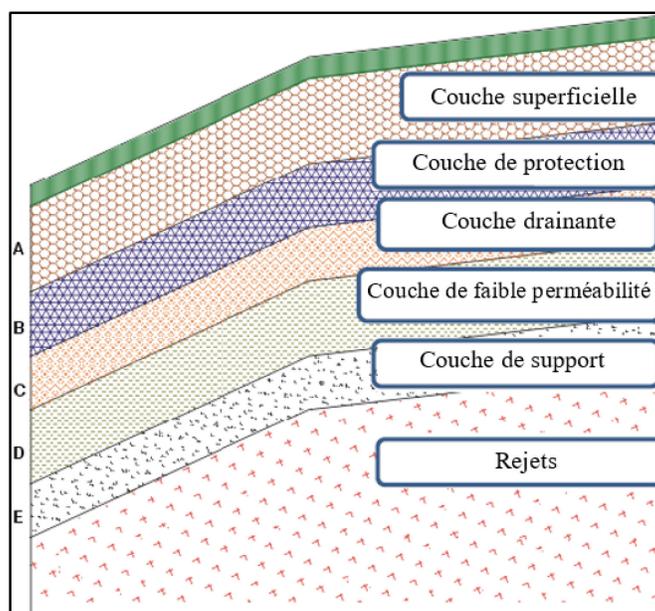


Figure 2.4 : Configuration typique d'une CEBC utilisée pour limiter la diffusion de l'oxygène

(adapté de Aubertin et al. 1995, 2016)

Les deux premières couches, A et B, servent à protéger les trois couches sous-jacentes contre l'érosion, la biointrusion et les variations de conditions climatiques telles que les cycles de gel-dégel (Bussière et al., 2001; Aubertin et al., 2002). Les couches C, D et E sont quant à elles les composantes essentielles permettant au recouvrement de limiter la diffusion de l'oxygène (Aubertin et al., 1995) :

-La couche C, appelée couche drainante, possède plusieurs fonctions. Elle permet tout d'abord de diminuer l'accumulation d'eau et le gradient hydraulique à la surface de la couche D sous-jacente. Elle favorise les écoulements latéraux plutôt que verticaux et réduit ainsi la remontée capillaire de l'eau depuis la couche D permettant à cette dernière de conserver son humidité. La couche C permet également de réduire les pressions interstitielles dans le recouvrement favorisant ainsi sa stabilité. Elle peut être constituée de matériaux granulaires tels que des sables et graviers et/ou de géosynthétiques drainants, la conductivité hydraulique doit être suffisamment élevée par rapport à celle de la couche D (entre deux et trois ordres de grandeur, i.e. entre 10^{-3} et 10^{-1} cm.s^{-1}) et son épaisseur est généralement de 30 cm (Aubertin et al. 1995; Bussière et al., 2001).

-La couche D, appelée couche de faible perméabilité ou de rétention d'eau, permet de limiter la migration de l'oxygène vers les rejets sous-jacents. Les effets de barrière capillaire créés par le contraste de rétention d'eau avec les couches sus- et sous-jacentes permettent à la couche D de maintenir un haut degré de saturation. Elle peut être constituée de matériaux fins tels que des argiles peu plastiques ou des silts qui présentent une faible conductivité hydraulique (inférieure à 10^{-5} cm.s^{-1}) limitant ainsi l'infiltration d'eau; si les matériaux sont soumis aux cycles de gel-dégel, ils doivent pouvoir y résister. L'épaisseur de la couche D est généralement comprise entre 50 et 100 cm (Bussière et al., 2001).

- La couche E, sert de couche de support pour les autres couches du recouvrement. Elle présente une granulométrie grossière permettant aux effets de barrière capillaire de se mettre en place à l'interface avec la couche D et ainsi de maintenir un degré de saturation élevé dans cette dernière. Elle limite également la remontée capillaire du lixiviat contaminé issus des rejets sous-jacents. Les caractéristiques géotechniques et mécaniques de la couche E doivent lui permettre de résister à la charge et la circulation des équipements utilisés lors de la mise en place du recouvrement (Ricard et al., 1997). Les matériaux utilisés sont généralement des sables ou graviers sur une épaisseur habituellement supérieure à 30 cm (Bussière et al., 2001).

Les types de matériaux et épaisseurs sont ici donnés à titre d'exemple pour la construction d'une CEBC type. Le modèle final d'une CEBC pour un site spécifique doit faire l'objet d'une démarche rigoureuse impliquant des essais en laboratoire, des modélisations numériques, etc. (Aubertin et al., 2015). De plus, les matériaux d'origine naturelle ici présentés ne sont pas toujours disponibles à proximité des sites miniers. Dans cette optique, des travaux récents ont été effectués pour déterminer la performance de recouvrements constitués de matériaux alternatifs tels que des résidus miniers désulfurés ou des stériles (cf. section II.3.1).

2.3 Facteurs influençant la performance des CEBC

Les CEBC interagissant avec les conditions climatiques et le milieu environnant, plusieurs paramètres peuvent influencer sur la performance du recouvrement à limiter la migration de l'oxygène et donc à inhiber la génération de DMA.

2.3.1 Types de matériaux

Tel que présenté précédemment, l'efficacité d'un recouvrement type CEBC dépend principalement des propriétés des matériaux utilisés. Les recouvrements multicouches impliquent l'utilisation de différents matériaux, répartis en trois grands groupes (Aubertin et al., 2016) :

- les matériaux naturels : sols (argile, sable, silt, gravier), roches concassées ou broyées;
- les matériaux synthétiques : géotextiles, géomembranes, bitumes, ciments, etc.;
- les matériaux composites : principalement les géocomposites bentonitiques (GCB);
- autres (rejets d'autres industries, par exemple)

De nombreux travaux ont été réalisés afin de montrer l'influence des propriétés de ces différents matériaux. En effet, différentes associations de matériaux aux contrastes plus ou moins marqués ont été testées (Aubertin et al. 1996; Bussière et al., 2001; Pabst 2011; Kalonji-Kabambi et al. 2017). Également, plusieurs types de matériaux ont été étudiés pour jouer le rôle de couche de rétention d'eau : des matériaux naturels tels que des silts (Bussière et al., 2007), des GCB (Aubertin et al., 2000, 2015), des résidus désulfurés (Bussière et al., 2003) ou encore des stériles miniers (Pabst, 2011, Kalonji-Kabambi et al. 2017; Larochelle et al., 2019). Davantage de détails peuvent être trouvés dans Aubertin et al. (1995 et 2016).

2.3.2 Effet de pente

Outre les propriétés des matériaux influençant le comportement hydrique des CEBC, il est également important de tenir compte de la géométrie. La faible inclinaison de la surface a peu d'effets sur la distribution de l'eau et sur le flux d'oxygène dans une CEBC (Aubertin et al., 2016). Cependant, il arrive que les couvertures doivent être placées sur des surfaces plus inclinées, telles que le parement des digues avec un angle de 15° à 20° , ou encore le flanc des haldes à stériles, où l'angle de la pente peut atteindre 35° (Aubertin et al., 2016). L'effet de pente sur le comportement hydrogéologique des CEBC a été mis en évidence en laboratoire à l'aide d'un système appelé boîte inclinée (Bussière, 1999). Il a également été étudié à l'aide de modélisations numériques (Bussière et al., 2003). Les résultats de ces études indiquent que pour différentes durées de drainage, le degré de saturation dans les couches du recouvrement varie significativement pour différentes localisations le long de la pente de la CEBC. Pour les matériels utilisés dans ces études, issus du site Les Terrains Aurifères, le degré de saturation au milieu de la couche de rétention d'eau à proximité de la base de la CEBC reste proche de 90 % ($\theta = 0,41$) même après une période de drainage de 60 jours, tandis que celui-ci chute à moins de 80 % ($\theta = 0,35$) en haut de la pente (figure 2.5). L'objectif fixé à 85 % pour qu'une CEBC soit considérée comme efficace n'est donc plus rempli après une période de drainage de deux mois. Ainsi, lorsque la couverture est utilisée comme barrière à l'oxygène, il faut minimiser la désaturation dans les pentes, car une diminution locale du degré de saturation pourrait entraîner un flux diffusif d'oxygène plus grand vers les rejets miniers sous-jacents (Bussière et al., 2003).

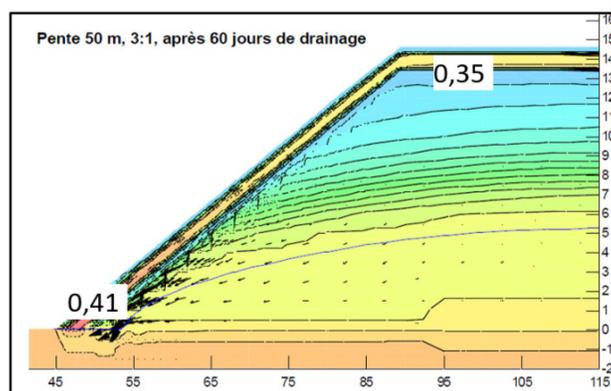


Figure 2.5 : Simulation de la teneur en eau volumique sur CEBC inclinée après 60 jours de drainage (Bussière, 1999)

2.3.3 Végétation et bio-intrusion

La pérennité des recouvrements peut également être influencée par les intrusions biologiques que ce soit par les plantes ou les animaux. Des études récentes démontrent que la performance à long terme des différents types de couverture risque d'être affectée directement ou indirectement par les intrusions biologiques (Bowerman et Redente, 1998; Trépanier, 2005; Smirnova et al., 2011). Les travaux de Sminorva (2011) sur le site Lorraine, équipée d'une CEBC depuis 1999, indiquent que les racines des arbres sur ce site dépassent la profondeur de la couche protectrice et commencent à atteindre la couche retenant l'humidité. De plus, les résultats de ces études ont attiré l'attention sur l'importance d'étudier la succession de la végétation et le développement de la rhizosphère sur la dynamique de l'eau sur les CEBC. Bowerman et Redente (1998) ont également étudié les impacts de la bio-intrusion sur les recouvrements de déchets dangereux tels que les déchets nucléaires. Leurs travaux ont démontré que la végétation, mais également les mammifères fouisseurs (e.g. chiens de prairie, écureuils) et les fourmis constituent une menace envers l'intégrité des barrières isolant des rejets.

2.3.4 Climat

Les CEBC ayant comme objectif principal de limiter la migration de l'oxygène sont des techniques de recouvrement généralement développées en climat humide. Les effets climatiques dans les régions humides, comme au Québec par exemple, peuvent avoir des conséquences très importantes et doivent être pris en compte dans la conception d'une CEBC. En effet, les facteurs climatiques tels que les cycles de gel-dégel et les cycles mouillage-séchage liés aux précipitations peuvent influencer les propriétés des matériaux et donc l'efficacité du recouvrement (Aubertin et al., 2002). Il est important de noter que les méthodes actuelles de conception des ouvrages de restauration tels que les CEBC intègrent les paramètres climatiques moyens et/ou extrêmes, mais ceux liés aux changements climatiques ne sont pas encore pris en considération (Aubertin et al., 2015).

2.3.4.1 Cycles de gel-dégel

Certains types de matériaux fins tels que les argiles présentent une forte teneur en eau ainsi qu'une importante plasticité. Ces matériaux peuvent donc être affectés par les cycles de gel-dégel et c'est pourquoi il est préférable d'utiliser les argiles à faible plasticité et les matériaux silteux, moins susceptibles aux effets climatiques, comme composante de la couche de rétention d'eau (Bussière

et al., 2001; 2007). Afin d'approfondir cet aspect, des essais en laboratoire ont été réalisés afin d'évaluer l'impact des cycles de gel-dégel sur les propriétés hydrogéologiques d'argiles plastiques échantillonnées près de Rouyn-Noranda (Dagenais, 2005). Après vingt cycles de gel-dégel, les résultats des essais de perméabilité, de succion et de porosimétrie au mercure ont montré des variations dans les propriétés des matériaux causées par la présence de fissures dans les échantillons. La conductivité hydraulique saturée présentait une variation de un à trois ordres de grandeur, et un changement dans les formes des courbes de rétention d'eau a été observée (figure 2.6). Il en a été déduit que ces changements peuvent influencer le comportement hydrique de la CEBC et sa capacité à inhiber le flux d'oxygène vers les résidus miniers.

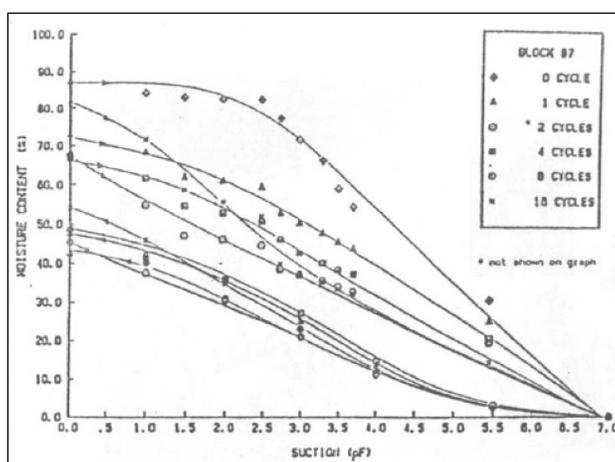


Figure 2.6 : Évolution de la courbe de rétention d'eau ($S_r - \psi$) d'un échantillon soumis aux cycles de gel-dégel (Yong et Mohamed, 1992; tirée de Dagenais, 2005)

2.3.4.2 Changements climatiques

Au cours des prochaines décennies, d'importantes variations de température et de précipitations sont à prévoir sur l'ensemble du Québec (Desjarlais et al., 2010). Au sud du 50^{ème} parallèle, les températures et les précipitations moyennes devraient augmenter plus en hiver qu'en été, et une augmentation des cycles de gel-dégel et de l'évaporation potentielle est anticipée (Desjarlais et al., 2010; Plummer et al., 2006). Des volumes d'eau plus importants et des périodes de sécheresse plus longues et plus intenses devront donc être gérés (Guay et al., 2015). Dans le cas des CEBC, l'augmentation des précipitations peut avoir un effet positif sur le degré de saturation, réduisant le flux d'oxygène vers les rejets réactifs. Les conditions extrêmes pour ce système de recouvrement

sont davantage liées aux événements de sécheresse, qui pourraient entraîner une désaturation du recouvrement et une augmentation du flux d'oxygène (cf. section IV.3.2).

2.4 Scénarios climatiques

Le secteur minier est en interaction permanente avec l'environnement, ce qui le rend vulnérable face aux conditions climatiques et aux changements prévus. Cependant, avant de discuter des vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques, il est nécessaire de définir certains concepts utilisés en sciences du climat. Toutes les définitions suivantes sont issues des travaux du consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Charron, 2014 et 2016; Roy et al., 2017). Ces définitions sont en accord avec celles adoptées par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC - en anglais IPCC pour *intergovernmental panel on climate change*; IPCC, 2013, 2014a et 2014b).

2.4.1 Définitions des concepts climatiques

2.4.1.1 Variabilité naturelle, changement climatique et normales climatiques

En climatologie, il est important de différencier le climat et la météo. La météo est associée à la variation journalière des indices climatiques (comme la température, les précipitations, l'humidité, les vents, la couverture nuageuse, etc.) tandis que le climat enregistre les variations à toutes les échelles temporelles, d'une décennie ou d'un siècle à un autre, ou même sur une base annuelle ou saisonnière (Charron, 2014, 2016). Les différences enregistrées sont considérées comme la variabilité naturelle du climat. Ces fluctuations sont principalement chaotiques et imprévisibles, mais certaines sont liées à des phénomènes plus ou moins cycliques (cycle solaire, circulation océanique, etc.)

Le changement climatique est, quant à lui, défini comme « un changement continu à long terme, une tendance à la hausse ou à la baisse, par rapport aux conditions de base » (Charron, 2016). Les changements climatiques (CC) étant modulés par la variabilité naturelle, la moyenne climatique doit être évaluée sur des périodes relativement longues afin de quantifier une indication précise de changement climatique (Charron, 2016).

Les changements climatiques se comparant à des conditions de base, la notion de normales climatiques vient ici s'ajouter. Selon Charron (2014), il s'agit de « la moyenne des conditions

météorologiques, telle que calculée à partir d'observations sur un intervalle de temps historique (période de référence), qui définit les conditions « typiques » d'une région donnée ». Les normales climatiques sont calculées à partir des données observées aux stations météorologiques recueillies à l'échelle mondiale depuis le milieu du 19^{ème} siècle.

2.4.1.2 Modèles climatiques

Comme défini par Charron (2016) « un modèle climatique est un outil numérique basé sur des équations mathématiques qui représentent les processus du système climatique ». Ces équations décrivent les interactions entre les différentes couches de la Terre (atmosphère, lithosphère, hydrosphère, cryosphère et biosphère) de même que l'influence des forçages externes, qu'ils soient naturels (radiation solaire, volcanisme) ou anthropiques (gaz à effet de serre - GES) (figure 2.7). Ces équations sont basées sur les lois de la mécanique des fluides telles que la conservation de la masse, de l'énergie, de l'eau et de la quantité de mouvement.

Afin de reproduire le système climatique naturel tout en limitant les simplifications, les équations sont résolues de manière numérique au moyen de superordinateurs. De plus, pour limiter le temps de calcul et le stockage de données, les composantes du système climatique sont divisées en points de grille qui recouvrent la planète (figure 2.7; Charron, 2016). La résolution d'un modèle est ainsi déterminée par les dimensions horizontale et verticale des cellules.

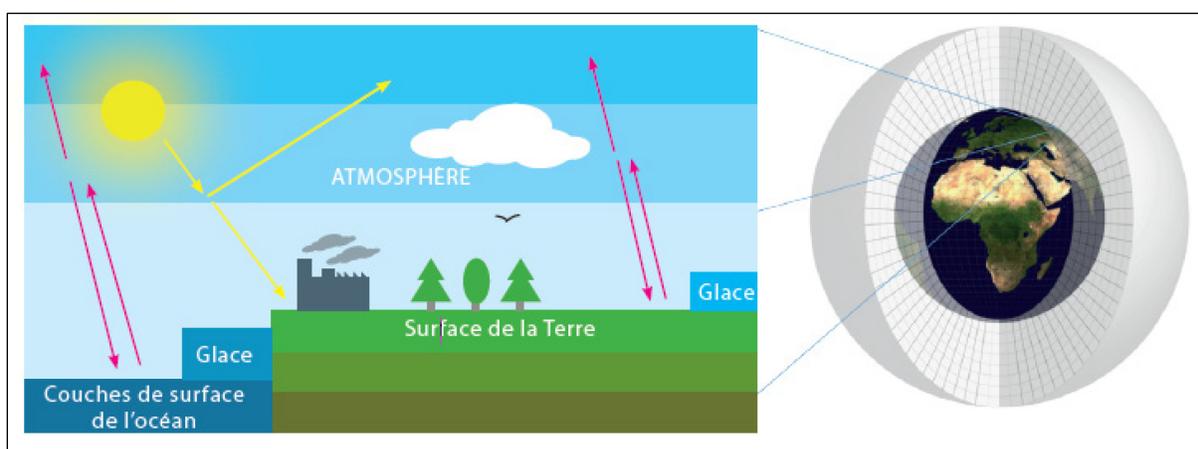


Figure 2.7 : Les interactions décrites par les modèles climatiques (gauche) et un exemple de grille utilisée pour compartimenter le système climatique (droite) (source : Ouranos)

Il existe plusieurs centres de modélisation du climat dans le monde, travaillant chacun sur son propre modèle. Chaque modèle se différencie selon le schéma numérique, le degré de simplification, les équations physiques choisies et les champs géophysiques utilisés comme intrants (les types de sol et de végétation, la topographie et la concentration en GES). En fonction de leur résolution, on distingue les modèles climatiques globaux (MCG) et les modèles climatiques régionaux (MCR) :

- Les MCG simulent l'évolution du système climatique sur toute la planète avec une résolution horizontale d'environ 200 km, pour des périodes allant jusqu'à des milliers d'années (Charron 2014 et 2016). La dernière génération de modèles globaux, appelées modèles de système terrestre (MST), inclue la partie atmosphérique, l'interaction avec la surface terrestre continentale, les modèles physiques de l'océan, les types de végétation ainsi que les cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone.
- Les MCR simulent quant à eux l'évolution du climat sur une partie de la planète. La résolution horizontale est plus fine que celle des MCG, soit de 45 km ou moins. Les données de MCG sont intégrées aux frontières des MCR en utilisant des réanalyses. Ces dernières sont des estimations des variables climatiques créées en traitant des données météorologiques passées au moyen de techniques d'assimilation de données.

2.4.1.3 Réanalyses et simulations rétrospectives

La réanalyse est une méthode servant à obtenir des données complètes sur l'évolution des conditions météorologiques et du climat au fil du temps (Roy et al., 2017). Elle permet de combiner les observations et les simulations de modèles numériques dans une ou plusieurs dimensions du système Terre afin de générer une estimation synthétisée de l'état du système. Cette méthode est habituellement utilisée sur des périodes de plusieurs dizaines d'années et sur la totalité du globe. Les réanalyses permettent de surveiller l'évolution des conditions climatiques, de déterminer les causes des variations et d'effectuer des prévisions. Elles offrent davantage de variables par rapport aux observations météorologiques, même pour des sites dépourvus d'instrumentation. Leur résolution est toutefois basse (50 à 250 km), mais elles peuvent être utilisées comme données d'entrées des MCG. L'application des réanalyses est particulièrement utile dans les secteurs de l'énergie, de l'agriculture, des ressources hydriques et des assurances (Reanalysis.org, 2010).

La simulation rétrospective est une technique inspirée de la réanalyse et utilisée pour des applications commerciales, principalement dans le secteur du pétrole et du gaz naturel, et pour des études climatiques à haute résolution (Roy et al., 2017). Les simulations rétrospectives sont exécutées à partir d'un point de départ situé dans le passé, en général un événement météorologique ou un état du climat en particulier, et permettent de générer des données climatiques historiques en fonction des observations jusqu'au présent. Leur objectif est d'étudier rétrospectivement des événements extrêmes et leur probabilité de récurrence. Les changements climatiques ne sont pas compris dans les applications de simulation rétrospective, mais sont généralement pris en compte dans les réanalyses des périodes antérieures. Les caractéristiques principales des différents modèles numériques sont résumées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Caractéristiques principales des types de modèles numériques utilisés dans l'étude des changements climatiques (Roy et al., 2017)

Type de modèle	Résolution (km)	Territoire couvert	Utilité
MCG	150 à 300	Monde	Prévisions climatiques à basse résolution
MCR	20 à 50	Zone limitée	Prévisions climatiques à haute résolution
Réanalyse	50 à 250	Monde	Reconstitution de conditions climatiques antérieures
Simulation rétrospective	1 à 300	Monde ou zone limitée	Connaissances sur un évènement particulier

2.4.1.4 Scénarios d'émissions

Comme vu précédemment, la concentration en gaz à effet de serre (GES) représente un intrant important pour simuler le système climatique. Pour le climat passé, les entrées des GES proviennent des observations des stations météorologiques situées partout dans le monde. Pour le climat futur, l'évolution des GES est fournie par les scénarios d'émissions (Charron 2016). Ces scénarios sont basés sur des hypothèses quant aux forces sous-jacentes, comme le développement socioéconomique, la croissance démographique et le changement technologique (IPCC, 2007). Les

connaissances au sujet de ces hypothèses évoluant constamment, les scénarios d'émissions sont révisés régulièrement.

Actuellement, les concentrations en GES sont estimées selon des scénarios radiatifs (RCP - representative concentration pathways en anglais) (Moss et al., 2010). Les RCP représentent les trajectoires possibles en termes de forçage radiatif, qui mesure la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système donné. Dans le cadre de l'étude des changements climatiques, le forçage radiatif mesure la capacité d'un facteur, par exemple un GES, à perturber l'équilibre énergétique de l'atmosphère (Myhre et al., 1998; Shine, 2000).

Il existe actuellement quatre scénarios d'émissions plausibles nommés en fonction de la valeur du forçage radiatif total (en W.m^{-2}) qu'ils devraient atteindre en 2100 (tableau 2.2; figure 2.8). Le RCP 2.6 suppose une baisse éventuelle des concentrations en CO_2 dans l'atmosphère au cours du 21^{ème} siècle, associé à de faibles changements de température, tandis que le RCP 8.5 prévoit une augmentation constante des concentrations en CO_2 conduisant à de fortes augmentations des températures de surface d'ici 2100 (Charron 2016).

Tableau 2.2 : Caractéristiques principales des RCP (adapté de Moss et al., 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Anomalie de T (°C)	Trajectoire
RCP 8.5	8,5 W.m^{-2} en 2100	> 1370	4,9	Croissante
RCP 6.0	6 W.m^{-2} après 2100	≈ 850	3,0	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	4,5 W.m^{-2} après 2100	≈ 650	2,4	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à 3 W.m^{-2} en 2050, puis déclin à 2,6 W.m^{-2} avant 2100	≈ 490	1,5	Pic puis déclin

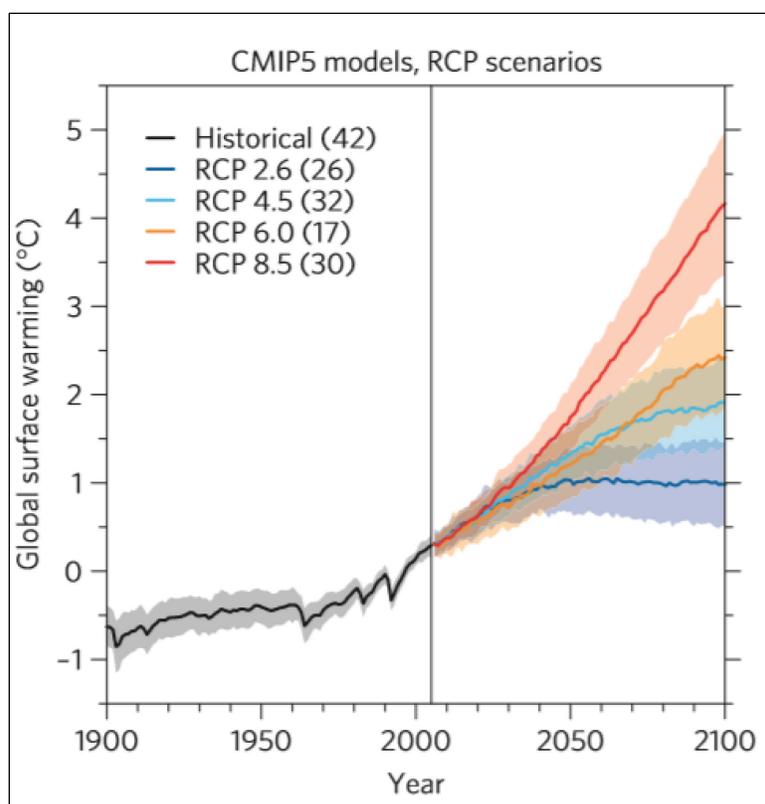


Figure 2.8 : Changement de température globale comparé à la période 1986-2005 pour les scénarios RCP utilisés par le projet d'intercomparaison des modèles couplés CMIP5. Le nombre de modèles est indiqué entre parenthèses et les enveloppes de couleur représentent les résultats de tous les modèles (adapté de Knutti et Sedláček, 2013)

2.4.1.5 Simulations et projections climatiques

D'après Charron (2014), « les simulations climatiques représentent le résultat de l'exécution d'un modèle climatique pendant une certaine période de temps. La durée d'une simulation peut varier de quelques années à des milliers d'années; et la simulation sera calculée itérativement à des intervalles de quelques minutes. Elles sont exécutées tant pour le passé que pour le futur ». La résolution temporelle est définie par la longueur de l'intervalle de temps qui est généralement de 5 à 20 minutes. À chaque pas de temps et à chaque maille de la grille de calcul, la solution numérique des équations donne les valeurs de plus d'une centaine de variables climatiques descriptives (température, vents, pression barométrique, précipitations, neige, etc.), qui sont toutes cohérentes entre elles, d'une maille à l'autre de la grille et d'un instant à l'autre (Charron, 2016).

Les simulations effectuées pour le futur sont appelées des projections climatiques. Elles représentent une évolution plausible des variables du système climatique sur une période couvrant plusieurs décennies voire plusieurs siècles (Charron, 2016).

2.4.1.6 Projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP) et GIEC

Les simulations climatiques étant nombreuses de par le monde, le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP – coupled model intercomparison project en anglais) vise à réaliser des simulations climatiques de façon coordonnée entre les différents centres de modélisation du climat. Le CMIP est un projet du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP - world climate research program en anglais). La phase la plus récente de ce projet, CMIP5, regroupe 20 centres climatiques et près de 50 modèles climatiques (Taylor et al., 2012). Les résultats des recherches basées sur ces simulations sont pris en compte dans l'évaluation de l'état des connaissances sur le climat par le groupe intergouvernemental d'expert sur l'évolution du climat (GIEC). Ce dernier est le principal organe international chargé d'évaluer le changement climatique. Il a été créé en 1988 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) pour fournir au monde une vision scientifique claire de l'état actuel des connaissances en matière de changements climatiques et de leur incidence potentielle sur l'environnement et la sphère socio-économique.

2.4.1.7 Sources d'incertitudes et précautions

Trois sources d'incertitude affectent les projections climatiques : la variabilité naturelle du climat, les imprécisions des modèles climatiques et les émissions des GES (Hawkins et Sutton, 2009 et 2011; Charron, 2016). D'une part, les fluctuations naturelles sont imprévisibles, d'autre part les modèles génèrent un climat qui diffère de la réalité, et pour finir, il est impossible de déterminer lequel des quatre scénarios RCP d'émissions va se réaliser. La période étudiée va également influencer la variation de l'incertitude (tableau 2.3). À court terme, l'incertitude liée à la variabilité climatique est la plus importante et peut masquer le signal de changement climatique, tandis qu'à long terme, le choix du scénario d'émission devient le plus important (Charron, 2016).

Tableau 2.3 : Importance relative des trois sources principales d'incertitude au fil du temps
(adapté de Charron, 2016)

Horizon de planification	Importance relative des sources d'incertitudes		
	Variabilité naturelle	Scénario d'émissions	Modèle climatique
Court terme (<30 ans)	***	*	**
Moyen terme (30-50 ans)	*	**	**
Long terme (>50 ans)	*	***	**

Étant difficile voire impossible de déterminer le meilleur modèle climatique, il est préférable de considérer un ensemble de simulations lors du processus de prise de décision. Préférentiellement, il vaut mieux considérer un ensemble incluant le scénario le plus favorable ainsi que le plus défavorable. Différentes techniques statistiques telles que l'analyse par grappe (Casajus et al., 2016), permettent de sélectionner un nombre limité de simulations représentant le mieux les propriétés de l'ensemble (Charron, 2016).

2.4.1.8 Mise à l'échelle

En raison de leur résolution spatiale grossière et de leur incapacité à résoudre les caractéristiques d'échelles plus fines, telles que les nuages et la topographie, les MCG sont limités dans leur utilisation pour les études d'impact locales (Adem et al., 2014). La mise à l'échelle, également appelée régionalisation, est une méthode qui permet de fournir une résolution plus fine de la sortie d'un MCG (Charron, 2016; figure 2.9). Deux approches différentes permettent de produire de l'information climatique à plus fine échelle : la mise à l'échelle dynamique et la mise à l'échelle statistique.

Mise à l'échelle dynamique

Cette technique utilise les MCR pour affiner la résolution horizontale du climat dans une région précise. La résolution des MCR est comprise entre 10 et 50 km et ils tiennent compte plus précisément de la surface de la Terre, comme les montagnes, le littoral et la présence de lacs et de rivières que les MCG (Charron, 2016). Le MCR est connecté en périphérie aux variables d'un

modèle sous-jacent, généralement un MCG, afin d'être connecté au climat mondial (Charron, 2016).

Mise à l'échelle statistique

Selon Charron (2016), cette technique se base sur « l'hypothèse que les caractéristiques du climat observé peuvent être dérivées d'une série de variables climatiques mondiales à grande échelle (des prédicteurs) ». Différentes méthodes statistiques telles que les régressions multiples, les réseaux de neurones, les générateurs stochastiques sont utilisés pour établir des relations entre les conditions locales observées (topographie, végétation, hydrologie, etc.) et les prédicteurs (figure 2.9).

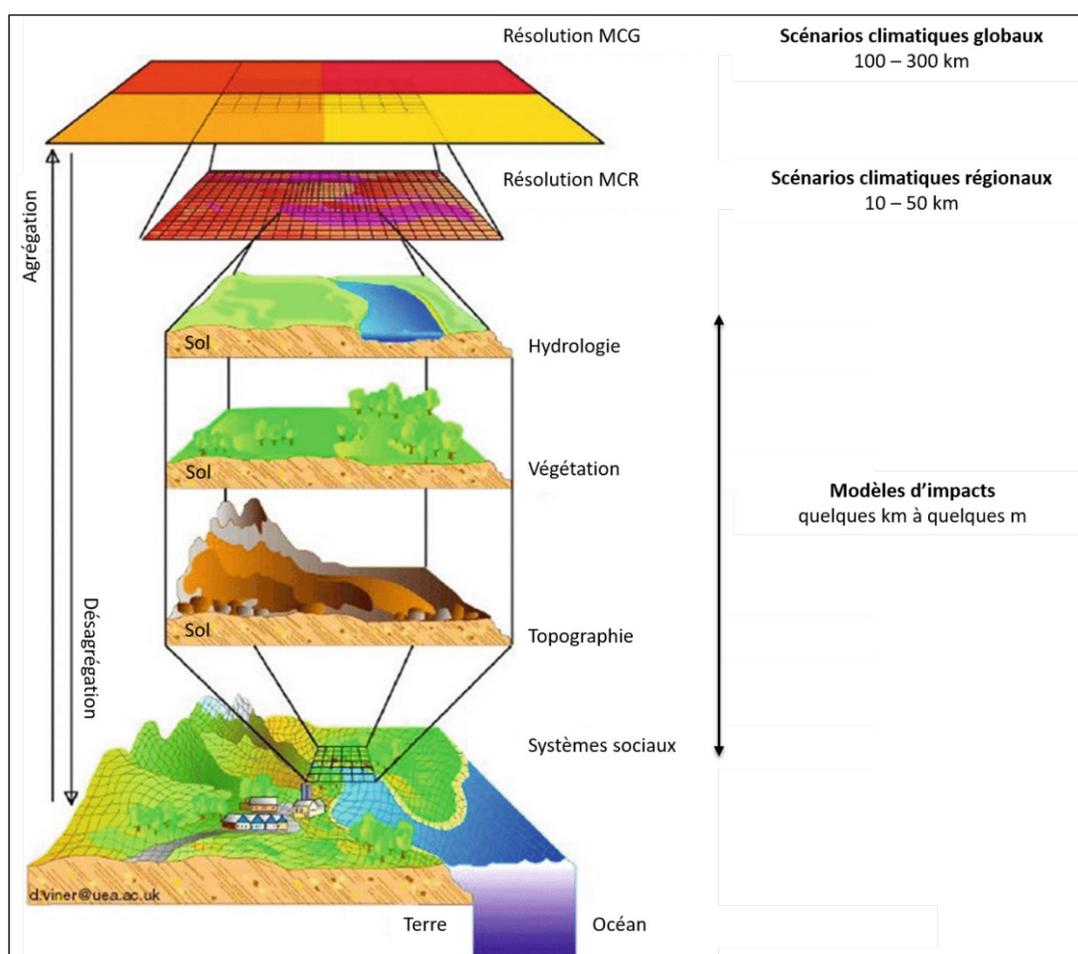


Figure 2.9 : Concept de la mise à l'échelle et résolution des modèles utilisés et générés (source : D. Viner, Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK et S.Planton, Météo France, Centre national de recherches météorologiques, adapté de Adem et al., 2014)

La mise à l'échelle dynamique est coûteuse en temps de calcul, mais elle assure une cohérence des variables climatiques dans le temps et l'espace. L'approche statistique est, quant à elle, moins onéreuse en coût et en temps de calcul, mais elle est basée sur l'hypothèse que les relations statistiques définies pour le passé récent resteront les mêmes pour le climat futur, ce qui est problématique dans un contexte de changements climatiques. Il est cependant à noter que cette technique peut être tout à fait adaptée pour une mise à l'échelle de données de MCR avec une résolution déjà élevée (Charron, 2016). Les principales caractéristiques des deux méthodes sont résumées dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Comparaison des caractéristiques des techniques de mise à l'échelle dynamique et statistique

Dynamique	Statistique
<ul style="list-style-type: none"> • Caractéristiques du climat plus détaillées • Cohérence spatiotemporelle entre les variables • Plus coûteux et plus long à produire • Nombre plus restreint de simulations issues de modèles régionaux disponibles • Plus grand nombre de variables (vent, humidité du sol, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Les relations statistiques établies pour le passé sont les mêmes dans le futur • Perte potentielle de la cohérence spatiotemporelle (une variable à la fois) • Moins coûteux et plus rapide à produire • Grand nombre de simulations globales disponibles • Dépendant des observations (plus problématique pour certaines variables)

2.4.2 Post-traitement

Le post-traitement est une méthode requise afin de transformer des données brutes ou déjà mises à l'échelle en information climatique utilisable (Charron, 2014, 2016). En effet, les modèles climatiques comportent souvent des biais et ne peuvent pas être directement comparés aux observations. Cela est d'autant plus vrai lorsque le changement projeté est appliqué aux observations.

Différentes méthodes de post-traitement ont été développées, seules les plus communément utilisées sont ici décrites. La plupart des méthodes de correction sont des méthodes statistiques

dont certaines ne corrigent que le biais moyen des variables simulées en ajustant l'ensemble de la distribution d'un même facteur équivalent à la différence entre la moyenne simulée et la moyenne corrigée. C'est le cas des méthodes dites du « delta » et du « débiaisage ». D'autres méthodes telles que « quantile-quantile » corrigent quant à elles l'ensemble de la distribution (Déandreis et al., 2014).

Il est à noter que les techniques de post-traitement sont utilisées pour corriger une partie du biais dans les simulations climatiques afin d'avoir une meilleure correspondance entre les valeurs simulées et les valeurs observées. Cependant, cette corrélation est imparfaite et les scénarios climatiques doivent être calculés en utilisant les valeurs simulées pour le futur et la période de référence, même si les biais des simulations ont été corrigés. Plus de renseignements sur les méthodes de post-traitement peuvent être trouvées dans les travaux de Teutschbein et Seibert (2012), Déandreis et al. (2014) et Charron (2014; 2016).

2.4.2.1 La méthode du delta

Le delta correspond à une anomalie représentant la différence entre l'état simulé actuel et l'état simulé futur (Huard, 2014). Les variables climatiques futures sont alors estimées en appliquant un facteur de correction au climat observé. Cette technique s'applique à des horizons temporels définis, généralement d'une durée d'un mois, et non à l'ensemble d'une série (Charron, 2016). Deux types de facteurs peuvent être appliqués : un facteur multiplicatif est utilisé pour les précipitations (équation 2.3), tandis que la correction est additive pour la température (équation 2.4; Teutschbein et Seibert, 2012) :

$$\text{Précipitations futures} = \text{précipitations observées} * (\text{projection futur} / \text{simulation présent}) \quad (2.3)$$

$$\text{Températures futures} = \text{températures observées} + (\text{projection futur} - \text{simulation présent}) \quad (2.4)$$

2.4.2.2 Le débiaisage ou la correction de biais

Cette méthode établit une correction de la série temporelle complète en appliquant un facteur de biais. Ce dernier est calculé en comparant les données simulées sur une période de référence et les données observées sur la même période (Charron, 2016).

2.4.2.3 La méthode quantile-quantile

Cette technique de correction est une méthode non-linéaire qui consiste à corriger les valeurs des quantiles des modèles climatiques par ceux calculés à partir des observations (Drias, 2018). Une fonction de transfert est définie pour ramener la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées. La correction est ainsi réalisée par décomposition des deux jeux de données en quantiles (Piazza et al., 2011). Cette méthode permet de corriger les plus grosses anomalies des modèles, notamment au niveau de l'intensité des événements extrêmes, et permet d'évaluer les fréquences de dépassements de seuils en certains points. Elle est très coûteuse en temps de calcul, mais fournit une bonne cohérence temporelle, permettant l'étude de périodes de sécheresse ou de nombre de jours consécutifs de fortes ou faibles précipitations et températures (Drias, 2018).

2.4.3 Scénario de changement climatique

Selon Charron (2016), « les scénarios de changement climatique sont une représentation simplifiée et plausible du climat futur, construite à partir de simulations climatiques ». Ces scénarios tracent un portrait du climat futur en calculant la moyenne des sorties des simulations à une résolution temporelle adaptée aux études d'impact.

Au Québec, l'expertise climatique s'est particulièrement développée avec la création du consortium Ouranos en 2001, permettant à la province d'orienter ses stratégies d'adaptation (Desjarlais et al., 2010). Les synthèses suivantes sur les scénarios climatiques du Québec et de la région Abitibi-Témiscamingue sont respectivement issues des travaux effectués au sein d'Ouranos par Desjarlais et al. (2010) et Roy (2015).

2.4.3.1 Cas du Québec

Climat actuel

La province du Québec est située à l'est du Canada et s'étend sur environ 2000 km du sud au nord entre les 45° et 62° de latitude Nord, et sur environ 1500 km d'est en ouest. De par cette étendue, le climat et les écosystèmes du Québec sont très diversifiés. À l'extrême nord de la province, un climat subpolaire et polaire domine avec une végétation de toundra et un sol constitué d'un pergélisol plus ou moins continu. Plus au sud, un climat continental humide et froid domine avec

une forêt boréale dense couvrant la moitié du territoire québécois. À l'extrémité sud, le climat est de type continental tempéré et est associé à une forêt mixte, mélange de feuillus et de conifères, et une grande diversité faunique. Le Québec possède également un littoral très étendu à l'est auquel est associé un climat océanique. Les contrastes saisonniers sont très importants au Québec avec, par exemple, des températures moyennes du nord au sud comprises entre -25 et -8°C en hiver et entre 3 et 20°C en été (Desjarlais et al., 2010). Des augmentations des températures et des précipitations sont projetées, mais celles-ci seront différentes entre le nord et le sud ainsi qu'en fonction des saisons (Desjarlais et al., 2010).

Changements climatiques projetés

Un réchauffement climatique a été enregistré au Québec au cours du passé récent (1960-2005) et est associé à une hausse des températures et un raccourcissement de la durée des saisons de gel (Yagouti et al., 2008). Les modèles de climats simulés pour la province projettent, d'une part, des changements dans les moyennes de températures et de précipitations et, d'autre part, des modifications de leur distribution, en particulier au niveau des valeurs extrêmes (Desjarlais et al., 2010). Les températures et les précipitations augmenteront de façon plus marquée en hiver qu'en été (tableau 2.5; Plummer et al., 2006; Desjarlais et al., 2010)

Tableau 2.5 : Évolution des conditions climatiques au Québec à l'horizon 2050 (adapté de Desjarlais et al., 2010)

		Température	Précipitations
Nord	Hiver	+ 4,5 à 6,5°C	+ 17 à 29 %
	Été	+1,6 à 2,8°C	+3 à 12 %
Sud	Hiver	+ 2,5 à 3,8°C	+ 9 à 18 %
	Été	+ 1,9 à 3,0°C	Peu de changement

Les simulations régionales effectuées par Ouranos pour le climat projeté à l'horizon 2050 indiquent qu'en hiver, la température des régions les plus froides sera en moyenne de -19°C tandis que dans le sud les températures hivernales moyennes seront de -4°C. En été, la température moyenne projetée variera entre 5°C au nord et 23°C au sud (figure 2.10; Desjarlais et al., 2010). Au niveau des précipitations, le cumul hivernal pour les régions du nord sera de 65 mm et 380 mm au sud

tandis qu'en été le cumul sera de 150 mm dans le nord et environ 450 mm dans le sud (figure 2.10; Desjarlais et al., 2010).

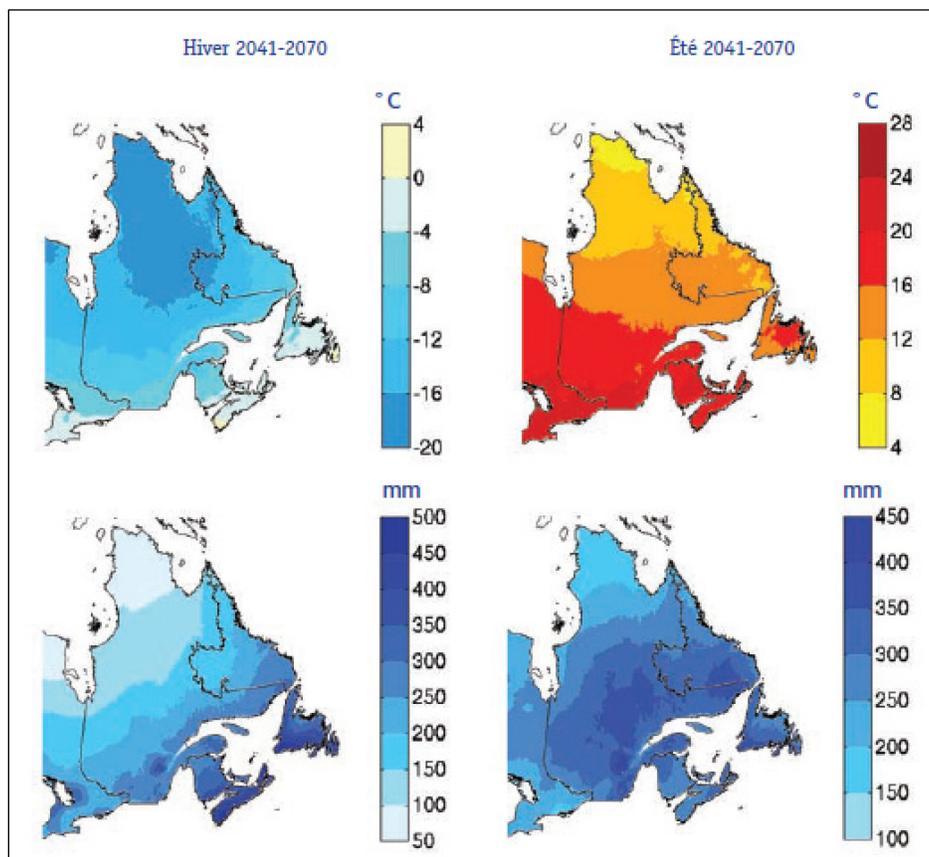


Figure 2.10 : Scénarios des températures (haut) et des précipitations (bas) hivernales et estivales pour la période 2041-2070 (Desjarlais et al., 2010)

Une augmentation des températures et des précipitations moyennes est donc anticipée, mais également une augmentation en durée et en fréquence des événements extrêmes (Mailhot et al., 2007; Lemmen et al., 2008; Desjarlais et al., 2010). Selon les projections climatiques, le changement de distribution des températures augmentera la fréquence des événements de sécheresse durant l'été (Desjarlais et al., 2010; Dai, 2011) et un allongement des périodes sans précipitation est également projeté, ainsi que l'augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes (Mailhot et al., 2007).

2.4.3.2 Cas de la région Abitibi-Témiscamingue

Climat actuel

L’Abitibi-Témiscamingue est une région située à l’ouest du Québec. Elle est caractérisée par un climat continental humide associé à d’importants contrastes saisonniers de températures et de fortes précipitations. Les données enregistrées aux stations météorologiques de Mont-Brun, Amos, Lac Berry, Remigny, Angliers et Ville-Marie sur la période 1981-2010 indiquent que les températures moyennes hivernales et estivales sont respectivement de $-14,0^{\circ}\text{C}$ et de $16,2^{\circ}\text{C}$. L’accumulation mensuelle de précipitations enregistrée pour la même période est, quant à elle, comprise entre 40 et 107 mm/mois, et les précipitations annuelles sont en moyenne de 918 mm (Environnement et Changement climatique Canada, 2017).

Changements climatiques projetés

Des travaux récents du consortium Ouranos ont permis d’effectuer des simulations climatiques pour la région Abitibi (Roy, 2015). Les simulations ont été effectuées à partir des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (tableau 2.2) afin de d’obtenir un ensemble représentatif de l’évolution socioéconomique possible de la planète. Pour chacun des deux scénarios RCP, 43 simulations issues du projet CMIP5 ont été utilisées, permettant ainsi de réduire les incertitudes des modèles, la variabilité naturelle du climat et les incertitudes des scénarios RCP.

Dans le cadre des travaux de Roy (2015), plusieurs indicateurs quantitatifs ont été définis et calculés (tableau 2.6). Seules les évolutions des températures annuelles minimales et maximales et celles des précipitations annuelles et des précipitations extrêmes sont présentées ici (figures 2.11 et 2.12). Plus de résultats et de renseignements sur ces indicateurs peuvent être trouvés dans l’annexe D et dans les travaux de Roy (2015).

Tableau 2.6 : Liste des indicateurs climatiques quantitatifs utilisés pour les simulations climatiques de la région Abitibi (adapté de Roy, 2015)

Indicateur	Définition
Température moyenne en hiver	Moyenne annuelle de la température entre décembre et février
Température moyenne en été	Moyenne annuelle de la température entre juin et août

Indicateur	Définition
Température minimale annuelle	Température minimale atteinte durant l'année
Température maximale annuelle	Température maximale atteinte durant l'année
Précipitations annuelles	Accumulation annuelle des précipitations liquides et solides
Nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 mm	Nombre de jours où les précipitations quotidiennes sont supérieures à 10 mm
Accumulations lors d'évènements extrêmes	Pourcentage des accumulations causées par de fortes pluies
Précipitations extrêmes	Valeur annuelle du 99 ^e centile des précipitations
Nombre de jours sans gel	Nombre de jours où la température minimale quotidienne est supérieure à 0°C

Les simulations effectuées indiquent qu'une augmentation généralisée des différents indicateurs climatiques quantitatifs est prévue en Abitibi-Témiscamingue par rapport à la climatologie observée entre 1981 et 2010 et ceux pour tous les horizons temporels et les deux scénarios RCP testés. L'augmentation relative de ces valeurs est présentée dans le tableau 2.7.

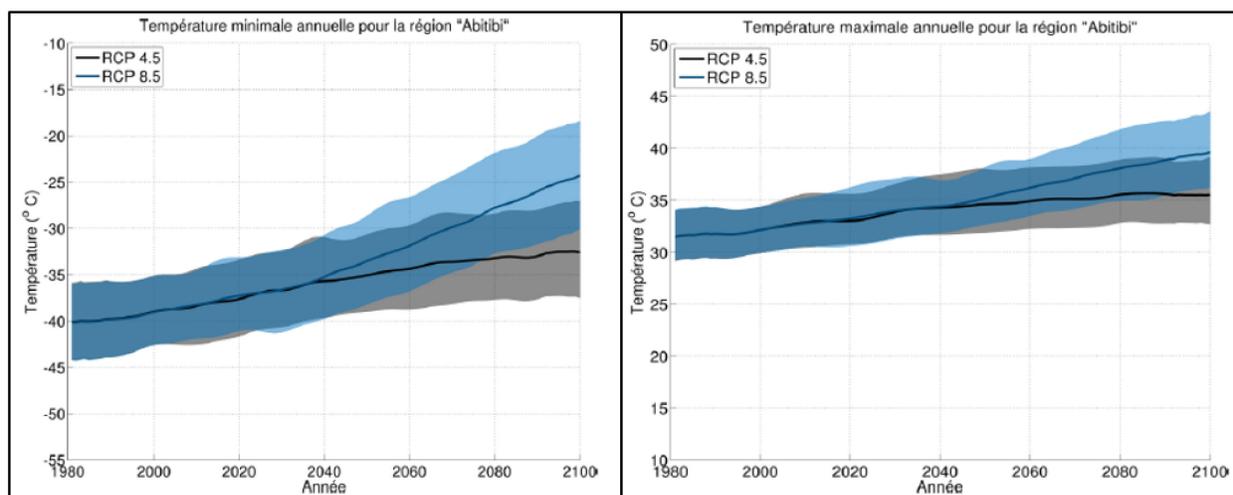


Figure 2.11 : Evolution temporelle de la température minimale annuelle (à gauche) et maximale annuelle (à droite) en Abitibi-Témiscamingue. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chaque RCP. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne. (Roy, 2015)

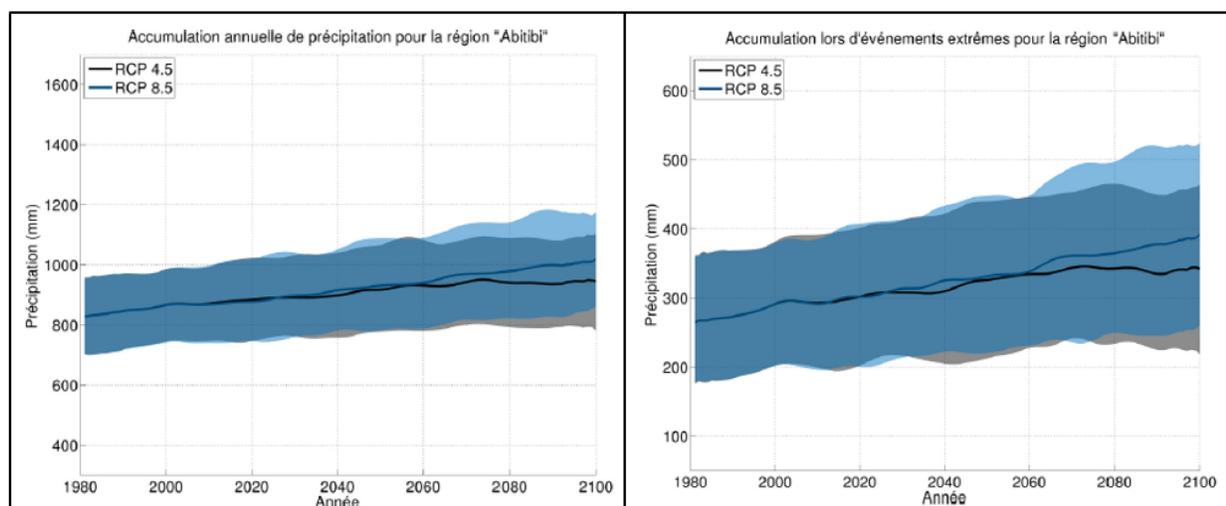


Figure 2.12 : Evolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitations (à gauche) et lors d'évènement de précipitations extrêmes (à droite; définie par 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chaque RCP. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne. (Roy, 2015)

Tableau 2.7 : Augmentation relative des indicateurs climatiques quantitatifs pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région Abitibi (adapté de Roy, 2015)

	2020		2050		2080	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Température moyenne en hiver (°C)	1,34	1,47	2,5	3,44	3,15	5,92
Température moyenne en été (°C)	1,62	1,66	3,13	4,27	4,04	7,25
Température minimale annuelle (°C)	2,41	2,48	4,75	6,85	6,33	12,53
Température maximale annuelle (°C)	1,51	1,61	2,75	3,71	3,45	6,51
Précipitation annuelle (%)	4,03	4,26	8,29	10,18	10,7	16,13
Précipitations extrêmes (%)	4,79	8,29	11,49	16,13	13,52	22,2
Accumulation lors des évènements extrêmes (mm)	7,73	9,32	17,12	20,35	21,48	32,37
Nombre de jours sans gel (jours)	10,98	11,1	20,42	28,36	26,36	49,85
Nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 mm	0,46	0,48	0,95	1,06	1,09	1,4

Des indicateurs climatiques qualitatifs ont également été définis dans les travaux de Roy (2015; tableau 2.8). Les changements projetés de ces indicateurs pour la période 2080 sont présentés dans le tableau 2.9. Il est à noter que le terme « consensus » réfère au nombre relatif de simulations indiquant la même direction de changement. Le terme « confiance » renvoie à la dispersion des simulations, plus précisément à la similarité plus ou moins élevée de l'amplitude des augmentations et diminutions des valeurs simulées (Roy, 2015).

Tableau 2.8 : Liste des indicateurs climatiques qualitatifs utilisés pour les simulations climatiques de la région Abitibi (adapté de Roy, 2015)

Indicateur	Définition
Période de fonte	Date à laquelle le couvert de neige disparaît
Accumulation maximale de neige	Accumulation maximale de la neige durant l'année
Période de retour des événements extrêmes de précipitations	Analyse par GEV (distribution généralisée des valeurs extrêmes) des périodes de retour des maximums annuels

Tableau 2.9 : Changement projeté des indicateurs climatiques qualitatifs pour la période 2080 (adapté de Roy, 2015)

Indicateur	Changement projeté	Consensus	Confiance
Période de fonte	≈1 mois plus tôt	Élevé	Faible
Accumulation maximale de neige	Baisse	Élevé	Faible
Période de retour des événements extrêmes (initialement 20 ans)	15 à 17,5 ans	Élevé	Faible

2.5 Modélisation numérique du comportement hydrogéologique

La performance à long terme des systèmes de restauration peut être évaluée grâce à la modélisation numérique (Ethier et al., 2018). Le présent projet portant sur les CEBC, l'accent sera mis sur ce type de recouvrement, mais il est à noter que les simulations hydrogéologiques sont

complémentaires aux essais de laboratoire et de terrain (Dagenais, 2005; Poirier, 2008; Pabst, 2011; Ethier et al., 2018).

Plusieurs codes numériques permettant de modéliser le comportement hydrogéologique existent, tels que :

- FEFLOW (Trefy et Muffels, 2007; Anderson et al., 2015)
- FLOTRAN (Holder, 1996; Holder et al., 2000)
- HELP (Benson et al., 1993; Adu-Wusu et al., 2007)
- Hydrogeosphere (Therrien et al., 2010)
- HYDRUS (Simunek et al., 1999; Fala, 2002 et 2008, Whitman, 2016; Simunek et al., 2018)
- MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1984; Todd et Mays, 2005; Poirier, 2008)
- POLLUTE (Rowe et al., 1998, Aachib et al., 2004)
- SEEP/W (Dagenais, 2005; Aubertin et al., 2009; Pabst 2011; Kalonji-Kabambi et al., 2017)
- TOUGH (Pruess et al., 1999; Doughty 2000 et 2007; Jung et al., 2017)
- UNSAT-H (Benson et al., 1993; Fayer, 2000, Whitman, 2016)

2.5.1 Logiciel SEEP/W

Le logiciel SEEP/W version 2018 de la suite GeoStudio (Geo-Slope International Ltd., 2017) a été utilisé dans le cadre de ces travaux. SEEP/W est un logiciel qui permet de simuler le mouvement de l'eau liquide ou sous forme vapeur à travers des matériaux poreux saturés ou non saturés. Il utilise la méthode des éléments finis pour résoudre des problèmes en 2D tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Des travaux précédents ont démontré la capacité de SEEP/W à simuler des conditions similaires à des recouvrements de type CEBC en confirmant de bonnes corrélations entre les résultats simulés et les mesures effectuées au laboratoire ou sur le terrain (Bussière et al., 2003; Dagenais, 2005; Aubertin et al., 2009; Pabst 2011; Kalonji-Kabambi et al., 2017).

2.5.2 Principe de résolution numérique de l'équation de Richards

La modélisation des mouvements de l'eau en milieu saturé ou non saturé repose sur les concepts développés au chapitre 2, et plus particulièrement sur l'équation de Richards (équation 2.1) qui peut être exprimée sous différentes formes : en termes de charge h , en termes de teneur en eau volumique θ ou dans une formulation mixte (Bussière et al., 2000). SEEP/W résout quant à lui

l'équation de Richards en 2D exprimée en fonction de la charge (équation 3; Geo-Slope International Ltd., 2015) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q \quad (2.5)$$

Avec θ la teneur en eau volumique [-], $k_{x,y}$ la conductivité hydraulique selon les axes (x,y) dans un système de coordonnées cartésien [$L.T^{-1}$], H la charge hydraulique totale [L] et Q les conditions de flux appliquées.

L'importante non-linéarité liée aux grandes variations de la charge et de la conductivité hydraulique avec l'humidité ou la pression implique qu'il n'existe pas de solution analytique exacte pour résoudre cette équation et que le recours aux méthodes numériques est nécessaire (Bussière et al., 2000).

La validité de l'équation de Richards est dépendante du respect des hypothèses suivantes (Musy et Soutter, 1991) :

- la matrice solide est indéformable, homogène et isotrope;
- le fluide est incompressible;
- la loi de Darcy est applicable;
- la capacité de stockage $c(\psi)$ est égale à 0 en zone saturée.

La résolution numérique de l'équation de Richards nécessite de connaître les éléments suivants (Musy et Soutter, 1991) :

- Les fonctions $c(\psi)$ et $k(\psi)$ sous une forme analytique;
- La condition initiale, soit $h_0(x,y,z)$ au temps $t=0$;
- Les conditions aux limites prévalant au cours du processus.

2.5.3 Méthode des éléments finis

La résolution de l'équation de Richards à l'aide de modèles numériques nécessite une discrétisation dans l'espace et également dans le temps pour les modélisations en mode transitoire. De nombreux travaux ont été effectués depuis les années 1960 pour résoudre numériquement cette équation et plusieurs méthodes ont été développées :

- les différences finies (Godunov et Ryabenki, 1964)

- les éléments finis (Neuman, 1973)
- les éléments finis mixtes (Siegel et al., 1993)
- les volumes finis (Eymard et al., 2000)

Seule la méthode des éléments finis (MEF) sera développée ici, car il s'agit de celle utilisée par le logiciel SEEP/W. Cependant, plus de détails peuvent être trouvés dans Anderson et al. (2015) et Geo-Slope International Ltd., (2017).

La méthode des éléments finis permet d'obtenir une solution pour tous les points du domaine d'écoulement, sous la forme d'une fonction approchée. Son emploi repose sur une formulation variationnelle, i.e. une formulation mathématique modifiée, mais tout de même équivalente du problème, qui s'applique sur chacune des fractions d'un domaine discrétisé en éléments géométriques (Anderson et al., 2015). Cette méthode est bien adaptée aux systèmes d'écoulement hétérogènes et/ou anisotropes de frontières complexes et pour des simulations en 3D (Musy et Soutter, 1991).

Tel que synthétisé par Kalonji-Kabambi (2014) selon les travaux de Bathe (2001) et Dhatt (2005), l'application de la MEF à un problème physique peut s'effectuer en 4 étapes :

1. Définition du problème : cela consiste à convertir le problème physique, ici l'équation de Richards, en une ou plusieurs équations aux dérivées partielles (EDP). L'EDP doit apporter une solution pour tous les points du domaine géométrique en tenant compte des conditions aux frontières (sur les bords) et des conditions aux limites (à l'intérieur du domaine). Ces conditions sont généralement de trois types :
 - Condition de Dirichlet ou de 1^{er} type : valeur que la solution doit vérifier sur les limites du domaine (par exemple charge hydraulique ou potentielle);
 - Condition de Neuman ou de 2^{ème} type : valeur de la dérivée de la solution aux frontières (par exemple : pression, flux);
 - Condition de Robin ou de Fourier ou de 3^{ème} type : combinaison des conditions de Neuman et Dirichlet (par exemple : convection).
2. Formulation variationnelle : l'EDP est reformulée sous forme d'identité intégrale nommée « forme variationnelle ». Cette nouvelle formule fait intervenir des dérivées d'ordre inférieur.

3. Discrétisation de l'espace : le domaine géométrique est tout d'abord divisé en sous-domaines, appelés mailles, qui sont délimitées par des nœuds. Cela permet d'assurer la continuité de la solution en attribuant la même valeur aux nœuds communs entre différentes mailles. Une fonction d'interpolation est ensuite appliquée pour chaque maille qui se définit alors comme un élément. Différents types d'éléments peuvent être sélectionnés dans les logiciels de modélisation : des lignes pour les problèmes en 1D, des triangles et des rectangles pour modéliser en 2D, des tétraèdres, des pentaèdres et des hexaèdres pour les problèmes en 3D.
4. Résolution du système matriciel : pour chaque élément, un système d'équations est fourni sous la forme :

$$[K]\{X\} = \{A\} \quad (2.6)$$

Avec $[K]$ la matrice des coefficients donnant la géométrie et les propriétés de l'élément considéré; $\{X\}$ les vecteurs inconnus; et $\{A\}$ les vecteurs des actions aux nœuds.

Dans un cas d'analyse d'écoulement de l'eau, la matrice K représente les coefficients de la géométrie et de propriété des matériaux utilisés, les vecteurs X , la charge hydraulique totale aux nœuds, et les vecteurs A , le flux d'eau aux nœuds (Kalonji-Kabambi, 2014). Deux méthodes principales existent pour résoudre un système matriciel (Anderson et al., 2015) :

- la méthode directe : élimination de Gauss, décomposition de Chokski, etc.
- la méthode itérative : matrice de Jacobi, gradient conjugué, etc.

Les avantages et les limites de la MEF sont résumés dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10 : Avantages et limites de la MEF (d'après Marceau, 2007 et Kalonji-Kabambi, 2014)

Avantage	Limite
<ul style="list-style-type: none"> • Court temps de résolution et visualisation graphique • Possibilité d'utiliser plusieurs types de maillage • Possibilité d'appliquer des conditions complexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance de la solution calculée aux données initiales (propriétés des matériaux, conditions aux limites, etc.) • Choix du maillage proposé par le logiciel • Parfaite connaissance nécessaire de la géométrie du modèle et des conditions aux limites • Hypothèse que l'EDP décrit correctement la réalité physique du problème

Plus d'informations concernant la modélisation numérique de l'écoulement souterrain peuvent être trouvées dans Musy et Soutter (1991) et Anderson et al. (2015), et plus de renseignements sur la MEF appliquée au logiciel de la suite GeoStudio peuvent être trouvés dans le manuel de Geo-Slope International Ltd. (2017).

2.5.4 Propriétés des matériaux saturés/non saturés

Dans SEEP/W, les propriétés des matériaux sont utilisées dans des modèles permettant de décrire le comportement des matériaux. Les propriétés de transfert et de stockage pour la vapeur sont calculées automatiquement par le logiciel, tandis que les propriétés pour l'eau liquide doivent être définies par l'utilisateur. Le tableau 2.11 récapitule les données d'entrée nécessaires pour les modèles de matériaux saturés/non saturés.

Tableau 2.11 : Paramètres d'entrée pour les modèles de matériaux saturés/non saturés de SEEP/W (d'après Geo-Slope International Ltd., 2017)

Paramètre	Symbole	Unité
Fonction de conductivité hydraulique	k	m.s ⁻¹
Compressibilité du sol	β	m ² .kN ⁻¹ (kPa ⁻¹)
Fonction de teneur en eau volumique	θ	
Ratio d'anisotropie	K'y/K'x	
Angle de rotation	α	Degrés

2.5.4.1 Courbes de rétention d'eau

SEEP/W fournit plusieurs méthodes afin de décrire et prédire les courbes de rétention d'eau des matériaux modélisés (Geo-Slope International Ltd., 2017) :

- L'équation descriptive de van Genuchten (1980) :

$$\theta = \theta_{\text{res}} + \frac{\theta_{\text{sat}} - \theta_r}{[1 + (\alpha_{\text{vG}} \psi)^{n_{\text{vG}}}]^{m_{\text{vG}}}} \quad (2.7)$$

- L'équation descriptive de Fredlund et Xing (1994) :

$$\theta = c(\varphi) \frac{\theta_{\text{sat}}}{\ln[e + (\frac{\psi}{\alpha'})^{n_{\text{vG}}}]^{m_{\text{vG}}}} \quad (2.8)$$

Avec α_{vG} [L^{-1}], α' [L], n_{vG} [-] et m_{vG} [-] les paramètres de forme de la courbe de rétention d'eau, e l'indice des vides, $c(\varphi)$ la fonction de corrélation, θ_{sat} la teneur en eau à saturation [-] et θ_r la teneur en eau résiduelle [-]. Le paramètre α' de l'équation 2.8 a une unité de pression et est associé au paramètre α_{vG} ($\alpha_{\text{vG}} = 1/\alpha'$) de l'équation 2.7

- Le modèle prédictif de Kovacs modifié par Aubertin et al. (2003). Ce modèle nécessite des données de base des sols telles le D_{10} et le D_{60} , l'indice des vides et la limite de liquidité (pour les sols fins).

Des CRE types estimées par van Genuchten (1980) et Fredlund et al. (1994) sont disponibles dans le logiciel pour plusieurs types de sol allant de l'argile au gravier. Outre ces estimations, les données de teneur en eau volumétrique et de succion estimées à partir d'essais en laboratoire ou obtenues de la littérature peuvent être entrées directement dans le modèle.

2.5.4.2 Fonction de conductivité hydraulique

SEEP/W fournit également plusieurs méthodes afin de prédire les fonctions de conductivité hydraulique des matériaux modélisés à partir de leur conductivité hydraulique saturée et de leur courbe de rétention d'eau (Geo-Slope International Ltd., 2017) :

- Le modèle de Fredlund et Xing (1994) :

$$k(\theta) = k_{\text{sat}} \int_{\theta_{\text{res}}}^{\theta_w} \frac{\theta_w - x}{\psi^2(x)} dx / \int_{\theta_{\text{res}}}^{\theta_{\text{sat}}} \frac{\theta_{\text{sat}} - x}{\psi^2(x)} dx \quad (2.9)$$

- Le modèle de Mualem (1976) dont van Genuchten (1980) a proposé la solution analytique approchée suivante :

$$k(\Psi) = k_{sat} \frac{\{1 - (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}}\}^{-1} [1 + (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}}]^{-m_{vG}}}{[1 + (\alpha_{vG} \Psi)^{n_{vG}}]^{m_{vG}/2}} \quad (2.10)$$

Avec k_{sat} la conductivité hydraulique saturée, x une variable d'intégration fictive représentant la teneur en eau et les autres paramètres définis à la section 2.5.4.1.

2.5.5 Conditions aux frontières

Comme vu précédemment, la solution des équations de la méthode des éléments finis est contrainte par des conditions aux limites spécifiées à travers le domaine géométrique. Pour la résolution de problèmes se rapportant à l'écoulement de l'eau, la condition aux limites de 1^{er} type se réfère à la charge hydraulique totale, tandis que celle de 2^{ème} type est généralement exprimée en termes de débit d'eau.

Le cas d'une frontière de "flux nul" est un cas particulier dans lequel le gradient de la variable dépendante à la frontière est mis à zéro. La condition de « flux nul » est la condition limite par défaut, puisque tous les nœuds ont un débit net nul en l'absence de source ou de puits, conformément à la loi de conservation de la masse. Ainsi, la condition aux limites de « flux nul » est supposée lorsqu'il n'y a pas de condition aux limites spécifiée sur un nœud extérieur (Geo-Slope International Ltd., 2017).

Les conditions aux limites de base telles que la charge totale d'eau, la charge de pression d'eau, le débit et le flux d'eau sont généralement suffisamment explicites. Cependant, certaines conditions aux limites plus complexes telles que l'« examen de face de suintement potentiel » et l'« interaction sol-climat » méritent une discussion plus approfondie et sont décrites dans les sections suivantes. D'autres conditions aux limites telles que la « charge hydraulique en fonction du volume » et le « gradient unitaire » ne sont pas décrites ici, mais plus d'informations peuvent être trouvées dans le manuel Geo-Slope International Ltd. (2017).

2.5.5.1 Examen de la face de suintement potentiel

La condition « examen de la face de suintement potentiel » doit être utilisée si une surface libre (i.e., pression égale à zéro) peut se développer le long de la limite (Geo-Slope International Ltd., 2017). Tel qu'indiqué dans le manuel de Geo-Slope International Ltd. (2017), « cette condition peut être utilisée pour simuler une décharge d'eau le long du côté aval d'une structure ou simuler l'écoulement dans un drain non pressurisé. Un examen de la face de suintement est également

requis si la condition de flux d'eau appliquée est supérieure à la capacité d'infiltration du sol. Ce processus d'examen garantit que la pression maximale de l'eau interstitielle le long de la surface de décharge ou sur la limite d'infiltration est nulle ».

2.5.5.2 Interaction sol-climat

La version 2018 de SEEP/W couple désormais les processus de Vadose et SEEP/W et peut simuler les interactions entre le sol, la végétation et l'atmosphère en utilisant la condition aux limites « interaction sol-climat » (en anglais LCI pour land-climate interaction). La condition LCI peut refléter diverses conditions de la surface du sol telles qu'un sol nu, enneigé ou végétalisé. Une condition aux limites de ce type peut être utilisée pour calculer le bilan hydrique et la percolation nette à travers un système de recouvrement ou évaluer sa capacité à fournir suffisamment d'eau pour la croissance à long terme des plantes (Geo-Slope International Ltd., 2017).

2.5.5.3 Bilan hydrique

Le flux d'eau à la surface du sol peut être calculé à l'aide de l'équation d'équilibre des masses suivante (Geo-Slope International Ltd., 2017) :

$$(q_P + q_M) \cos \alpha + q_E + q_R = q_I \quad (2.11)$$

Avec les indices associés aux flux d'eau (q) [$L \cdot T^{-1}$] indiquant les précipitations (P), la fonte des neiges (M), l'infiltration (I), l'évaporation (E) et le ruissellement (R), et α l'angle de la pente. La transpiration n'apparaît pas dans l'équation 2.11 car l'absorption d'eau racinaire s'effectue sous la surface du sol, mais celle-ci est définie un peu plus bas.

2.5.5.4 Évapotranspiration

Tandis que l'évaporation à la surface du sol requiert la connaissance de l'évaporation réelle (ER), les simulations de l'absorption d'eau par les racines nécessitent l'évapotranspiration potentielle (ETP). SEEP/W propose trois méthodes de calcul de l'évapotranspiration :

- La méthode définie par l'utilisateur pour laquelle l' ETP est définie comme une fonction du temps et pour laquelle l' ER est calculée selon la méthode de Wilson et al. (1997);
- La méthode de Penman-Wilson calculant l' ER pour un sol nu;
- La méthode de Penman-Monteith calculant l' ETP et qui est davantage utilisée pour les sols végétalisés où la transpiration est dominante par rapport à l'évaporation.

Plus de renseignements sur les calculs associés aux différentes méthodes peuvent être trouvés dans le manuel de Geo-Slope (2017). Les différents paramètres d'entrées pour définir la fonction LCI dépendent de la méthode d'estimation de l'évapotranspiration (tableau 2.12).

Tableau 2.12 : Paramètres d'entrées pour définir la condition LCI dans SEEP/W (d'après Geo-Slope International Ltd., 2017)

Méthode de calcul de l'évapotranspiration	Données d'entrée
Toutes	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air en fonction du temps • Précipitations en fonction du temps • Humidité relative • Profondeur de neige en fonction du temps (optionnel) • Densité de neige (optionnel)
Penman-Wilson et Penman-Monteith	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse du vent en fonction du temps • Radiation nette en fonction du temps
Penman-Monteith	<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur de végétation en fonction du temps
Définie par l'utilisateur	<ul style="list-style-type: none"> • Évaporation potentielle en fonction du temps

2.5.5.5 Absorption d'eau racinaire

Afin de modéliser l'absorption d'eau par les racines des plantes, (root water uptake en anglais), il est possible d'introduire les données de végétation pour préciser les calculs d'évapotranspiration. Chacune des méthodes de calcul d'évapotranspiration nécessite les paramètres suivants :

- l'indice de surface foliaire (en anglais LAI pour Leaf Area Index);
- la limite d'humidité des végétaux;
- la profondeur des racines;
- la densité des racines normalisée;
- la fraction du couvert végétal.

Il est à noter que les variations horaires de température de l'air et d'humidité relative peuvent être estimées par SEEP/W à partir des valeurs mesurées maximum et minimum selon les méthodes de Simunek et al. (2012) et Fredlund et al. (2012). Les variations journalières d'évapotranspiration

peuvent être estimées en tenant compte des variations diurnes de radiation nette selon la méthode de Fayer (2000). Les variations de profondeur de neige à la surface du sol sont quant à elles calculées en faisant la somme de toutes les accumulations incrémentales de profondeur de neige auxquelles ont été soustraite la fonte des neiges. Plus de renseignements sur ces techniques d'estimation peuvent être trouvées dans le manuel de Geo-Slope (2017).

2.6 Besoins en recherche sur la conception des CEBC

La précédente revue de littérature a permis de décrire les principes de fonctionnement des recouvrements de type CEBC ainsi que les principaux facteurs influençant leur performance. Ces derniers sont les types de matériaux et leurs propriétés hydrogéologiques, la géométrie du système et principalement l'effet de pente, la végétation ainsi que les conditions climatiques. Malgré les nombreux travaux réalisés antérieurement, peu de travaux se sont attardés sur l'impact des changements climatiques (CC) sur le comportement hydrogéologique des CEBC. La plupart des travaux effectués ont été menés en utilisant des critères climatiques de conditions extrêmes de sécheresse basés sur aucune analyse systématique des données météorologiques (Bussière et al. 2003; Broda et al., 2014). Il est donc important que des travaux tenant compte des CC soient effectués pour étudier la performance à long terme de ces infrastructures.

Dans cette optique, le présent projet vise à évaluer l'influence des CC sur l'efficacité de la CEBC du site Lorraine au Québec à l'aide de modélisation numérique du comportement hydrogéologique. En plus d'améliorer les connaissances actuelles sur la performance à long terme des ouvrages de restauration de type CEBC, cette approche aurait l'avantage de travailler sur un cas réel, restauré depuis 1999 et bien documenté.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Comme il a été montré au chapitre 2, les impacts des changements climatiques sur les CEBC sont encore peu étudiés et pourraient influencer l'efficacité à long terme de ces recouvrements. Afin de combler ces besoins en recherche, l'objectif de ce projet consiste à évaluer, à l'aide de la modélisation numérique, l'influence des changements climatiques CC sur le comportement hydrogéologique des CEBC en étudiant le cas spécifique du site Lorraine.

La première partie de ce chapitre présente une description du site Lorraine et des travaux de restauration entrepris. La deuxième partie se concentre sur la modélisation numérique du comportement hydrogéologique et décrit la construction du modèle. Les données climatiques disponibles et nécessaires aux modélisations sont présentées dans la dernière partie.

3.1 Site à l'étude

Le site minier Lorraine est situé à 45 km à l'est de la ville de Ville-Marie au Témiscamingue (Québec, Canada; figure 3.1). Le gisement de Lorraine est un gisement polymétallique encaissé dans une séquence de roches volcaniques mafiques en contact avec un massif dioritique (Grenier, 1967). Il a été découvert en 1961 par exploration de surface et exploité entre 1964 et 1968 pour le cuivre, le nickel, l'or et l'argent (Lavergne, 1985). Les principaux minéraux présents dans la zone minéralisée sont la chalcopryrite, la pentlandite, la pyrrhotite et la pyrite (Grenier, 1967).

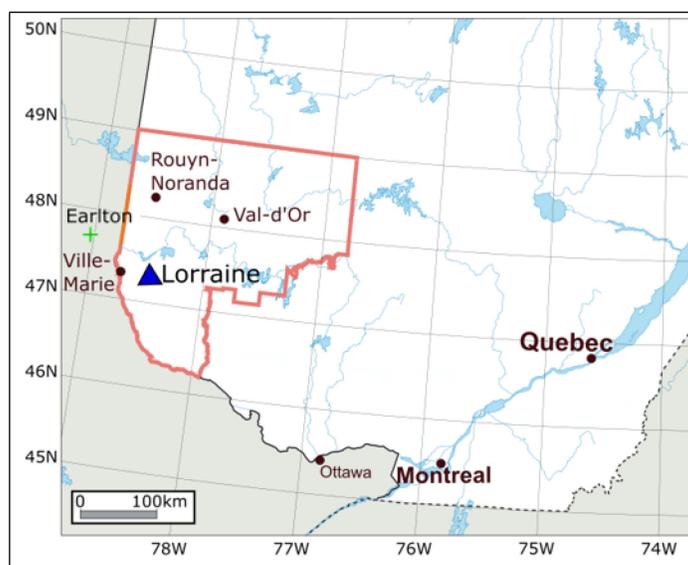


Figure 3.1 : Localisation du site minier Lorraine et de la station météorologique d'Earlington

Environ 600 000 tonnes de minerai ont été extraites, engendrant un tonnage à peu près équivalent de résidus miniers. Le parc à résidus, ceinturé de deux digues au sud et à l'ouest, couvrait une superficie de 15,5 hectares avant sa restauration, avec une épaisseur de résidus variant de quelques centimètres au nord du site à plus de 6 mètres au sud (Aubertin, 1996). Les résidus ont été déposés dans une vallée peu profonde connectée au ruisseau Creek au sud. Sous les résidus se trouvent des dépôts fluvio-glaciaires sur environ 2 m d'épaisseur, reposant sur le socle rocheux. Le dépôt des résidus ainsi que la construction des digues ont modifié le réseau d'écoulement souterrain. La nappe phréatique affleure à la surface au nord du site, submergeant les résidus, tandis qu'elle se situe davantage en profondeur au sud du site, laissant la surface des résidus non saturée depuis la partie centrale du site jusqu'à la digue située au sud (Nastev et Aubertin, 2000; figure 3.2)

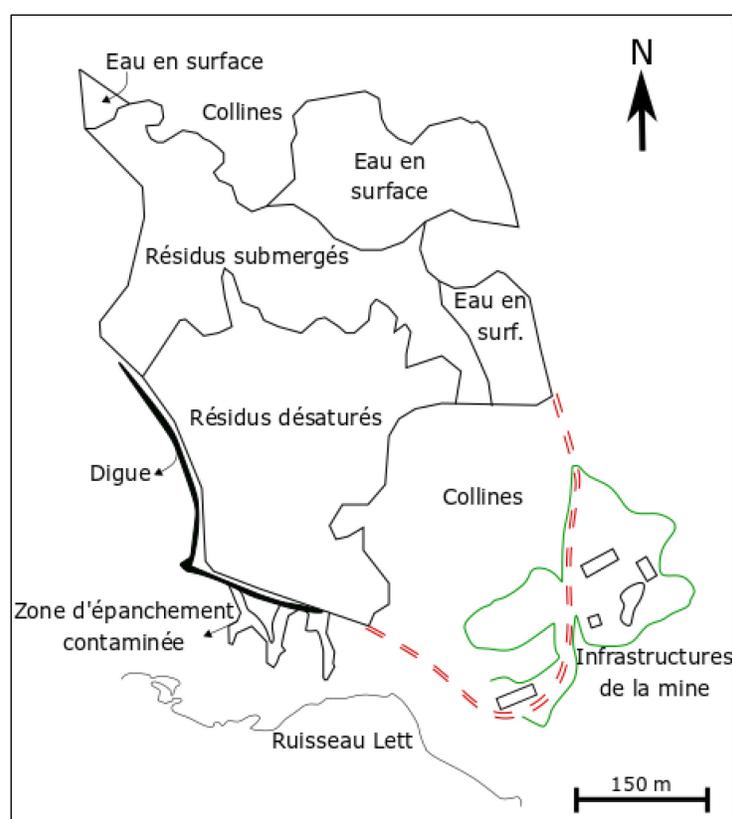


Figure 3.2 : Vue en plan du site Lorraine avant la restauration (tiré de Nastev et Aubertin, 2000)

3.1.1 Contexte et stratégie de restauration

Le parc à résidus de la mine Lorraine a été laissé à l'abandon pendant 30 ans sans aucune considération environnementale à la fin de l'exploitation de la mine Lorraine en 1968. Les résidus

miniers contenant des minéraux sulfureux, des réactions d'oxydation se sont enclenchées, générant du drainage minier acide (DMA) et un front d'oxydation variant entre 15 et 120 cm d'épaisseur (Aubertin, 1996).

Le ministère des Ressources naturelles (MRN) a entrepris en 1994 des travaux de caractérisation afin de démontrer l'impact du site abandonné sur le milieu environnant. Les résultats indiquent qu'à cette date, les impacts demeurent faibles. En 1995, l'entreprise Entraco mène une étude de terrain afin de caractériser les épanchements contaminés au pied de la digue sud (figure 3.2). Il en ressort que la source de DMA est associée aux résidus situés dans la zone non saturée au sud du site. Les échantillons issus des épanchements présentent à l'époque des pH autour de 2,2 et 2,6 et leur composition chimique révèle des concentrations élevées en sulfates (3730 à 9190 mg/l) et en métaux (Cu de 0,135 à 0,804 mg/l; Fe de 838 à 3200 mg/l; Ni de 0,21 à 9,50 mg/l; Zn de 0,19 à 1,00 mg/l) (Entraco, 1996).

La composition minéralogique des résidus frais et oxydés a été étudiée par DRX, microscopie optique et microsonde électronique (Bernier, 1996). Le tableau 3.1 résume la composition des deux types de résidus.

Tableau 3.1 : Composition minéralogique des résidus frais et oxydés du site Lorraine (d'après Bernier, 1996)

Résidus frais	Résidus oxydés
Hornblende 10 – 20 %	
Chlorite > 20 %	
Feldspaths 5 – 10 %	
Epidote 5 – 10 %	
Quartz 10 – 20 %	
Magnétite 5 – 10 %	
Pyrrhotite 5 – 10 %	
Traces de biotite, ilménite, pyrite, chalcopyrite, pentlandite	Minéraux sulfureux altérés Minéraux secondaires : gypse, hydroxydes de fer, jarosite

Le potentiel de génération d'acidité des résidus frais du site Lorraine a été évalué à l'aide de tests statiques (Sobek et al., 1978); le potentiel d'acidité (PA) a été estimé à 223 kg CaCO₃ eq/t tandis que le potentiel de neutralisation (PN) est de 23 kg CaCO₃ eq/t. Le potentiel net de neutralisation (PNN) est ainsi estimé à -200 kg CaCO₃ eq/t, qualifiant les résidus Lorraine comme générateurs d'acide (Bernier, 1996). Ce faible PNN peut être attribué à l'absence de minéraux carbonatés et la forte proportion de minéraux silicatés peu réactifs (Dagenais, 2005).

En 1997, le MRN démarre la restauration du site en se basant sur l'étude préliminaire d'Aubertin (1996). Cette dernière compare différents scénarios de recouvrement et conclue sur la faisabilité de la mise en place d'une couverture à effets de barrière capillaire (CEBC). L'entreprise Soprin-ADS effectue des analyses numériques du bilan hydrique, de l'hydrogéologie du site et du comportement hydrique du recouvrement afin de définir la conception finale. Plus d'informations sur ces travaux peuvent être trouvés dans Nastev (1998) et dans Nastev et Aubertin (2000). Entre 1998 et 1999, la CEBC a été construite ainsi que trois drains dolomitiques et un drain calcaire situés aux effluents finaux, utilisés comme systèmes de traitement passif. Plus d'informations sur le drain calcaire et les drains dolomitiques peuvent être trouvées dans Bussière et al. (2009), Potvin (2009) et Genty et al. (2012, 2016).

Un programme de suivi a été mis en place après la construction de la CEBC afin d'évaluer sa performance. En particulier, plusieurs études sur le comportement hydrogéologique ont été effectuées (cf. section 3.1.4) ainsi que des travaux de recherche sur la chimie des eaux et les systèmes de traitement passif (Maqsoud et al., 2007; Potvin, 2009; Genty et al., 2012, 2016), les variations du niveau phréatique sous la CEBC (Maqsoud et Bussière, 2008; Maqsoud et al., 2012), et l'influence de la végétation sur le recouvrement (Trépanier, 2005; Smirnova et al., 2011; Guittonny-Larchevêque et al., 2016; Proteau, en cours). La figure 3.3 présente l'évolution du site Lorraine depuis 1997 jusqu'à 2017.



Figure 3.3 : Vue du site minier Lorraine a) avant les travaux de restauration en 1997; b) après la construction de la CEBC en 1999; c) avec la croissance de la végétation en 2017 (d'après Dagenais, 2005 et Bussière et al., 2009)

3.1.2 CEBC et propriétés des matériaux

3.1.2.1 Caractérisation des matériaux avant installation

La construction de la CEBC du site Lorraine a été effectuée à partir de matériaux issus de bancs d'emprunt situés aux alentours du site, dans un périmètre allant de 150 m à 10 km. Selon la classification USCS (Holtz et Kovacs, 1981), le matériau fin constituant la couche de rétention d'eau est un silt inorganique non plastique (ML) et le sable utilisé dans les couches de bris capillaire et de protection est classé comme un sable uniforme (SP-SM). Les travaux de caractérisation du MRN (1998), et d'Aubertin et al. (1998 et 1999b) ont permis d'effectuer les analyses suivantes au laboratoire sur les échantillons prélevés dans les bancs d'emprunt : granulométrie (BNQ 2560-040, ASTM D422- 63), densité relative des grains (ASTM D854-91), limites de consistance (ASTM D4318-84), courbe de compactage (ASTM 1557-91), conductivité hydraulique saturée (ASTM D5084-90, D5856-95), courbe de rétention d'eau (en Tempe Cell inspiré de la norme ASTM D3152-72) et coefficient de diffusion de l'oxygène (en cellule de diffusion).

Le tableau 3.2 résume les valeurs moyennes des principales caractéristiques de base des deux matériaux. Les tableaux 3.3 et 3.4 résument, respectivement, les résultats obtenus lors des essais de perméabilité et de rétention d'eau. Pour des indices des vides e variant entre 0,48 et 0,92, la conductivité hydraulique saturée du silt varie de 2×10^{-8} à 1×10^{-7} m.s⁻¹, et celle du sable est de 7×10^{-5} m.s⁻¹.

Tableau 3.2 : Propriétés de base des matériaux (tiré de Aubertin et al., 1999b; Dagenais 2005)

Propriété	Silt	Sable
Granulométrie		
D ₁₀ (mm)	0,001 à 0,0021	0,06 à 0,15
D ₃₀ (mm)	0,002 à 0,0038	0,085 à 0,22
D ₆₀ (mm)	0,0051 à 0,015	0,15 à 0,5
C _u	5,1 à 7,1	2,5 à 3,33
C _c	0,5 à 0,8	0,64 à 0,8
G _s	2,76	2,70
Limites de consistance		
w _L (%)	23,6 à 28,4	-
w _P (%)	nul à 24,9	-
I _p (%)	nul à 3,5	-
Compactage		
ρ _d max (g/cm ³)	1,724 à 1,928	1,778
w _{opt} (%)	10,6 à 18,5	16

Tableau 3.3 : Conductivité hydraulique des matériaux échantillonnés dans les bancs d'emprunts (tiré de Aubertin et al., 1999b)

Indice des vides	k _{sat} silt (m.s ⁻¹)	k _{sat} sable (m.s ⁻¹)
0,485	2,7x10 ⁻⁸	7,3x10 ⁻⁵
0,619	5,9x10 ⁻⁸	
0,625		
0,731	2,6x10 ⁻⁸	
0,75	1,1x10 ⁻⁷	
0,75	4,6x10 ⁻⁸	

Indice des vides	k_{sat} silt ($m.s^{-1}$)	k_{sat} sable ($m.s^{-1}$)
0,837	$4,0 \times 10^{-8}$	
0,859	$1,0 \times 10^{-7}$	
0,923	$2,2 \times 10^{-8}$	

Tableau 3.4 : Pression d'entrée d'air des matériaux échantillonnés dans les bancs d'emprunts (tiré de Aubertin et al., 1999b)

Indice des vides	ψ_a silt (m d'eau)	ψ_a sable (m d'eau)
0,62	2,9	
0,62		0,25
0,62	4,0	
0,72	5,0	
0,74	3,5	
0,75	6,3	
0,76	2,0	
0,85	2,0	

Comme l'indique le tableau 3.4, la capacité de rétention d'eau du silt lui permet de conserver un degré de saturation (S_r) élevé pour des succions allant au-delà de 2 m d'eau (i.e. supérieures à 20 kPa). Tel que mentionné au chapitre 2, le haut degré de saturation de la couche de rétention d'eau réduit la diffusion de l'oxygène vers les résidus acidogènes. Les travaux de Dagenais (2005) ont permis de mesurer au laboratoire les coefficients de diffusion effectifs (D_e) en fonction de différents S_r du silt (figure 3.4). Le modèle de Collin et Rasmuson (1988) est également tracé sur la figure 3.4 pour des porosités de 0,38 et 0,43. Ainsi, pour un S_r de 92 %, le D_e du silt est de $1 \times 10^{-9} m^2.s^{-1}$.

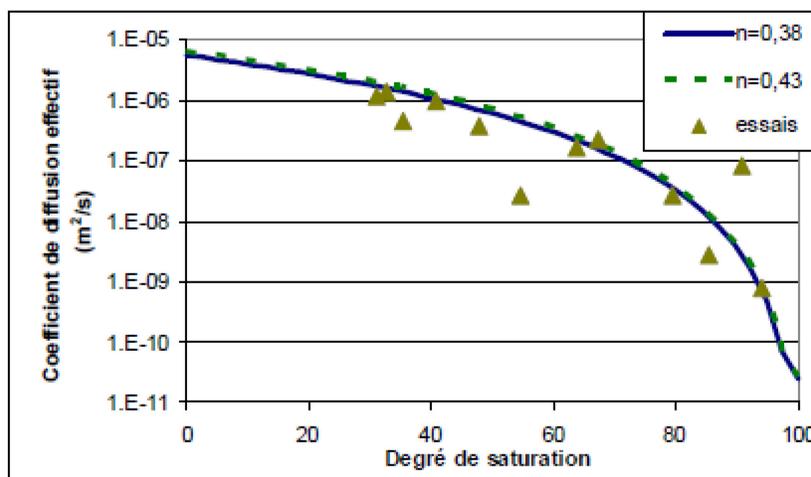


Figure 3.4 : Coefficients de diffusion effectifs du silt en fonction du degré de saturation. La courbe bleue et celle en pointillés verts représentent le modèle de Collin et Rasmuson (1988) pour les porosités 0,38 et 0,43 respectivement (d'après Dagenais, 2005)

3.1.2.2 Construction du recouvrement

Les propriétés des matériaux définies au laboratoire ont été utilisées comme paramètres d'entrée de plusieurs modélisations numériques afin de réaliser la conception de la CEBC du site Lorraine. La première simulation numérique a tout d'abord été effectuée à l'aide du logiciel HELP (Schroeder et al., 1994) afin d'estimer le taux d'infiltration dans la couverture ainsi que les conditions de drainage. Le logiciel MODFLOW[®] (McDonald et Harbaugh, 1988) a ensuite été utilisé afin de définir le réseau d'écoulement de l'eau souterraine. Les résultats de ces simulations ont permis d'étudier l'évolution de l'élévation de la nappe phréatique. Celle-ci a été utilisée pour étudier le comportement hydrogéologique du recouvrement en condition non saturée à l'aide du logiciel SEEP/W (Geo-Slope International Ltd., 1996) selon différentes conditions d'infiltration. De plus, le logiciel WATAIL (Scharer et al., 1993) a été utilisé pour modéliser l'évolution des processus d'oxydation avec et sans recouvrement. Les détails de ces différentes modélisations peuvent être trouvés dans le rapport technique de conception (Nastev, 1998) et dans Nastev et Aubertin (2000).

La configuration finale du recouvrement proposée est la suivante (du bas vers le haut) : une couche de 30 cm de sable jouant le rôle de bris capillaire, une couche de 50 cm de silt utilisée comme couche de rétention d'eau, une couche de 30 cm de sable et gravier servant de protection à

l'évaporation et à la bio-intrusion et servant de base pour la revégétation. La figure 3.5 présente la CEBC construite dans le secteur de la digue sud. La digue est construite à partir de résidus miniers grossiers jouant également un rôle de bris capillaire. La couche de till placée sur les résidus grossiers agit comme couche de rétention d'eau et présente des propriétés hydriques semblables au silt.

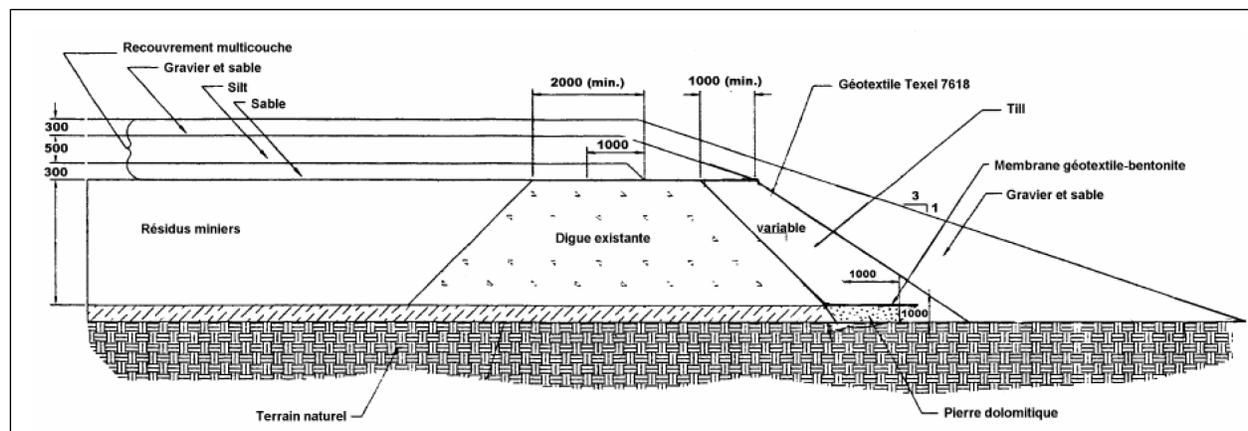


Figure 3.5 : Section de la CEBC dans le secteur de la digue sud (tirée de Fontaine, 1999a)

3.1.2.1 Caractérisation des matériaux après installation

Afin de vérifier que les propriétés hydrogéotechniques nécessaires au bon fonctionnement de la CEBC aient été respectées lors de l'installation du recouvrement, des essais de compacité relative à l'optimum Proctor ont été effectués ainsi que des analyses granulométriques. Plus de renseignements sur ces essais in situ peuvent être trouvés dans Fontaine (1999b), Aubertin et al. (1999b) et Dagenais (2005) tandis que les exigences granulométriques sont disponibles dans le devis de construction (MRN, 1998).

De plus, les CRE du silt et du sable utilisées dans le recouvrement ont été déterminées au laboratoire à l'aide de cellule Tempe (inspiré de la norme ASTM D3152-72) utilisant des plaques poreuses avec une pression d'entrée d'air (AEV) de 100 et 500 kPa. Les CRE ont été lissées avec le modèle empirique proposé par van Genuchten (1980) en utilisant le code numérique RETC (van Genuchten et al., 1991). Le modèle de van Genuchten introduit dans sa formulation un paramètre sans dimension appelé teneur en eau équivalente ou réduite θ_e :

$$\theta_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_{w,s} - \theta_{w,r}} \quad (3.1)$$

avec θ_e la teneur en eau équivalente [-]; θ_w la teneur en eau [-]; $\theta_{w,r}$ la teneur en eau résiduelle [-]; $\theta_{w,s}$ la teneur en eau à saturation [-]

$$\theta_e = [1 + (\alpha_{vG} \cdot \psi)^{n_{vG}}]^{-m_{vG}} \quad (3.2)$$

avec α_{vG} le paramètre d'ajustement du modèle relié à l'AEV [L^{-1}]; n_{vG} le paramètre d'ajustement du modèle relié à la courbure de la fonction [-]; m_{vG} le paramètre empirique du modèle [-] (généralement $m_{vG} = 1 - 1/n_{vG}$; van Genuchten et Nielsen, 1985).

La CRE des résidus Lorraine a quant à elle été estimée à l'aide du modèle Kovacs modifié (MK; Aubertin et al., 1998, 2003) en utilisant les données de granulométrie (C_U et D_{10}) et l'indice des vides (e) caractérisés lors de l'installation des piézomètres (Jolette, 2001). Ce modèle s'appuie sur le modèle proposé par Kovacs (1981) avec comme hypothèse de base que la rétention d'eau est le résultat simultané des forces capillaires (saturation capillaire S_c) et d'adhésion (saturation par adhésion S_a ; Kovacs, 1981). Ce modèle permet d'exprimer la teneur en eau θ_w de la façon suivante (Mbonimpa et al, 2006) :

$$\theta_w = n \cdot S_r = n(1 - (1 - S_c)\langle 1 - S_a \rangle) \quad (3.3)$$

où $\langle \rangle$ représentant les crochets de Macaulay, i.e. $\langle x \rangle = 0,5 (x + |x|)$;

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

$$S_a = a_c \cdot C_\psi \frac{h_{co}/\psi_n^{2/3}}{e^{1/3}(\psi/\psi_n)^{1/6}}$$

avec ψ_n le paramètre normatif [L] (pour (h_{co} et ψ exprimés en cm, $\psi_n = 1$ cm); a_c le coefficient d'adhésion [-]; C_ψ le paramètre d'ajustement [-]; m le paramètre fonction de la distribution des pores [-]; h_{co} la remontée capillaire équivalente [L].

Le tableau 3.5 résume les principales caractéristiques de la granulométrie des couches du recouvrement ainsi que leur conductivité hydraulique saturée (k_{sat}). Les valeurs estimées des conductivités hydrauliques saturées et des pressions d'entrée d'air se situent dans le fuseau des résultats initialement définis par les essais en laboratoire.

Tableau 3.5 : Principales caractéristiques physique et hydriques des matériaux de la CEBC de Lorraine après son installation (tiré de Dagenais, 2005). $k_{sat\ KC}$ représente la conductivité hydraulique saturée prédite par la méthode Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003), $\psi_{a\ MK}$ la pression d'entrée d'air prédite par le modèle de Kovacs modifié (Aubertin et al., 2003), D_{10} le Diamètre des particules correspondant à 10 % du passant sur la courbe granulométrique et C_U le coefficient d'uniformité

	$k_{sat\ KC} (m.s^{-1})$	$\psi_{a\ MK} (m)$	$D_{10} (mm)$	C_U
Silt	$9,2 \times 10^{-8}$	3,2	0,0027	15
Sable bas	$7,5 \times 10^{-5}$	0,2	0,09	15
Sable haut	$9,0 \times 10^{-4}$	0,07	0,27	35

Des essais de perméabilité avec cycles de gel-dégel ont également été effectués sur le silt indiquant une augmentation de l'indice des vides d'environ 0,1 avec les cycles de gel-dégel, mais des valeurs de k_{sat} demeurant dans le même ordre de grandeur. Plus de renseignements sur l'effet des cycles de gel-dégel sur les matériaux du site Lorraine peuvent être trouvés dans Dagenais (2005).

3.1.3 Instrumentation du site et suivi de performance

La CEBC du site Lorraine a été instrumentée dès son installation en 1999 et les mesures ont été effectuées jusqu'en 2011 afin de faire le suivi du comportement hydrogéologique. La sélection des sondes ainsi que leur position dans le recouvrement (figures 3.6a et b) sont basées sur des études au laboratoire ainsi que des travaux de terrain (Aubertin et al., 1997, 1999b; Bussière, 1999; Maqsoud et al., 2007). Initialement, vingt stations de mesure ont été installées en 1999 selon trois axes d'instrumentations (axes A, B, C; figure 3.7) où chaque station est espacée de 50 m. L'axe A comprend sept stations et traverse le site d'est en ouest se terminant à proximité du drain calcaire. Le transect B traverse le site du nord ou sud et se termine vis-à-vis du drain dolomitique 3. Il compte dix stations de mesure dont huit se situent sur le parc, une au pied et une au milieu de la pente de la digue sud. L'axe C est quant à lui situé dans la zone saturée plus au nord. Orienté du sud vers le nord, ce transect comprend trois stations. Une mise à jour de l'équipement a été

effectuée en 2008 consistant à remplacer les sondes défectueuses et à ajouter 5 nouvelles stations de mesure au sud du site (axe D; figure 19).

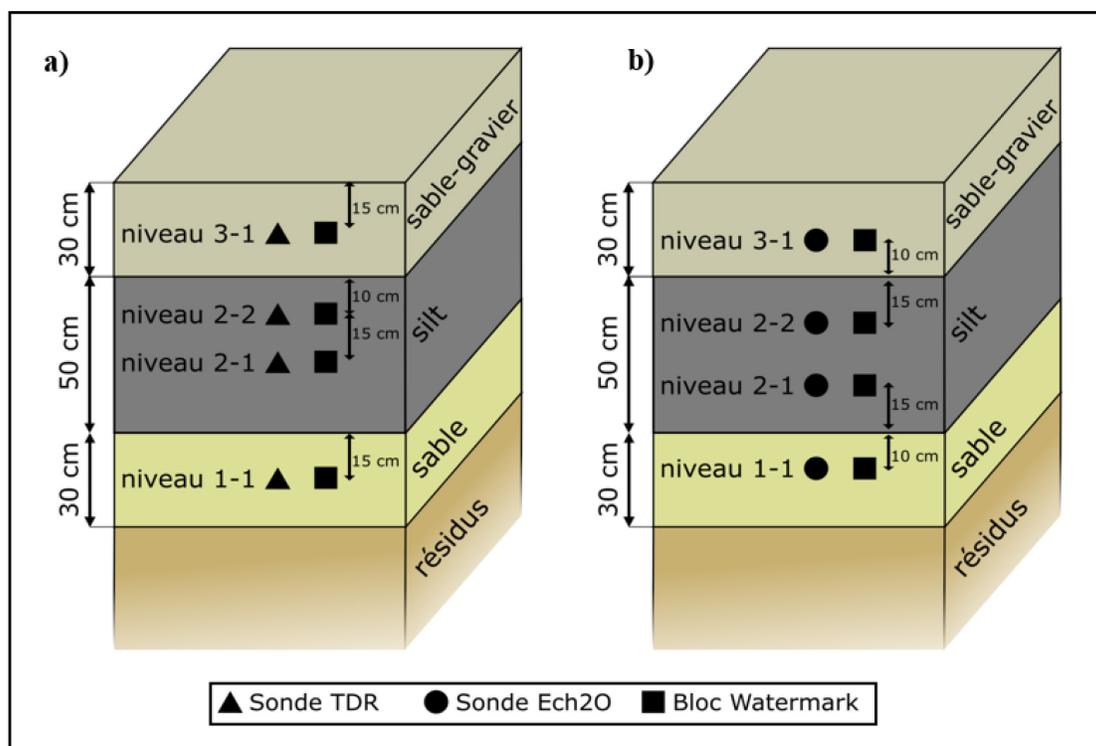


Figure 3.6 : Localisation des sondes des stations de mesures pour a) les axes A, B et C et b) l'axe D (adapté de Dagenais et al., 2001 et Maqoud et Bussière, 2008)

La teneur en eau volumique (θ) ainsi que la succion matricielle (ψ) ont été mesurées dans chacune des trois couches du recouvrement. Chaque station inclut quatre niveaux de mesure, deux situés au milieu de chacune des couches de sable et deux situés dans la couche de silt (figures 3.6a et b). Les mesures de θ ont été effectuées à l'aide de sondes RDT pour les stations des axes A, B et C (figure 18a) et des sondes Ech2O pour les stations de l'axe D (figure 3.6b). Des blocs Watermark (WM) ont également été installés à chaque niveau afin de mesurer la succion matricielle.

La méthode de réflectométrie dans le domaine du temps (RDT) permet de mesurer la permittivité du sol en mesurant le temps de propagation d'une impulsion électromagnétique le long d'une ligne de transmission placée dans le sol (Topp et al., 1980). La relation entre la permittivité du sol et θ utilisée ici est déterminée par le fabricant (Soilmoisture, CA). La précision de mesure des sondes RDT est de $\pm 0,03$ (Soilmoisture, CA). Les sondes Ech2O utilisent quant à elles la technique Frequency Domain (FD) qui mesure θ en lien avec la permittivité diélectrique du sol (Robinson et

Dean 1993; Hilhorst et Dirksen 1994). Les sondes Ech2O ont été calibrées au laboratoire avant leur installation (Fabre, 2008) et leur précision de mesure est de $\pm 0,03$ (Meter Group Inc.). Les blocs Watermark de la marque Irrometer mesurent quant à eux la variation de la résistance électrique d'une matrice de silice calibrée et en déduisent la succion matricielle du milieu (White et Zegelin, 1995; Shock et al. 1998; Shock et al. 2005). La relation entre la résistance et la succion est linéaire. Les blocs Watermark peuvent mesurer des succions entre 2 et 200 kPa avec une précision de 1 kPa (Bussière, 1999; Maqsood et al. 2007). Onze piézomètres ont également été installés sur le site Lorraine afin de mesurer le niveau phréatique dans le parc à résidus (figure 3.7; Jolette, 2001; Maqsood et Bussière, 2008).

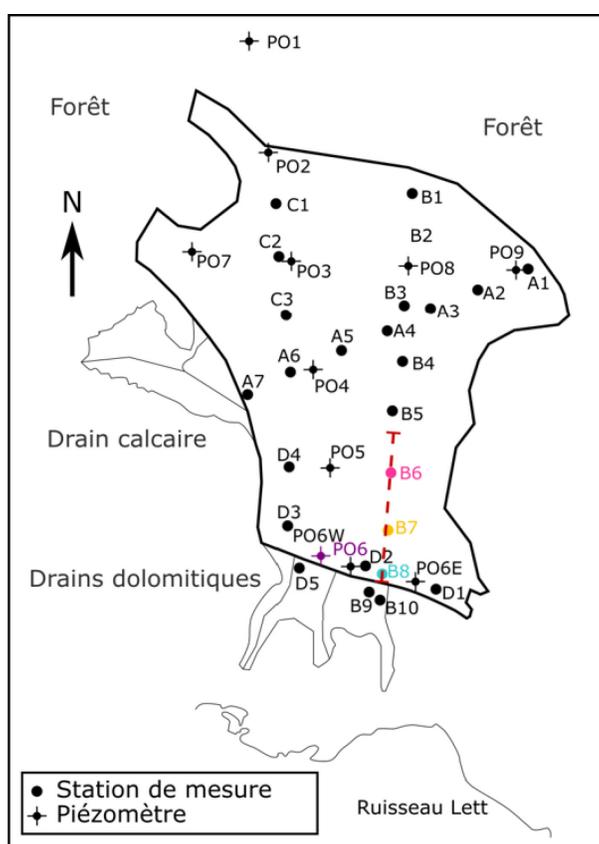


Figure 3.7 : Localisation des stations de mesures et des piézomètres du site Lorraine. Les stations surlignées sont étudiées plus en détails dans ces travaux. La ligne en pointillés rouges représente la section transversale utilisée pour la simulation numérique (adapté d'après Dagenais et al., 2001; Maqsood et Bussière, 2008)

Ces différentes techniques de mesure in situ ont été utilisées dans des études précédentes afin de suivre le comportement hydrogéologique de CEBC (Yanful et al., 1993; Ricard et al., 1997, 1999;

Bussière et al, 2006; Williams et al., 2003). Les paramètres θ et ψ ont été mesurés entre 4 et 8 fois par ans pour les stations des axes A, B et C entre 1999 et 2008 (Bussière et al., 2009) et des mesures quotidiennes ont été effectuées pour les stations de l'axe D entre 2008 et 2011 (Maqsoud et al., 2012). La base de données établie pour ce travail contient plus de 48 000 mesures de ces deux paramètres et un contrôle de qualité des données à dû être réalisé en raison de la défaillance des stations avec le temps et de leur remplacement progressif. Les niveaux piézométriques ont quant à eux été mesurés durant la saison estivale sur une base mensuelle entre 1999 et 2009 et des mesures quotidiennes ont été effectuées pour les piézomètres PO3, PO4 et PO6 entre 2009 et 2011 afin de mieux identifier les variations de la nappe phréatique (Maqsoud et al., 2012). Le tableau 3.6 résume le type de sonde et la fréquence des mesures pour les différentes stations de mesure et les piézomètres.

Tableau 3.6 : Type de sondes et fréquences des mesures de θ , ψ et du niveau piézométrique pour les différentes stations de mesure et piézomètres

Station	Sonde		Période	Fréquence
	θ	Ψ		
Axes A, B and C	TDR	WM	1999 - 2008	4 à 8 fois/an
Axe D	Ech2O	WM	2008 - 2011	Quotidienne
Piézomètre				
PO1 à 9	Manuelle		1999 - 2009	4 à 6 fois/an
PO3, 4 et 6	Automatique		2009 - 2011	Quotidienne

Plusieurs études menées sur le site Lorraine ont permis d'évaluer la performance de la CEBC depuis sa construction (Dagenais, 2005; Bussière et al., 2009; Maqsoud et al., 2012). Ces études indiquent que le S_r dans la couche de rétention d'eau demeure au-dessus des 85 %. Les mesures de succion dans cette couche sont généralement inférieures à la pression d'entrée d'air du silt, i.e. inférieures à 20 kPa durant les 10 années après l'installation du recouvrement (Bussière et al., 2009). Les mesures de θ et ψ au fils des ans indiquent que les effets de barrière capillaires sont bien développés depuis le centre du parc jusqu'au sud du site. La couche de rétention d'eau au nord du site se situe sous la nappe phréatique et reste donc saturée en tout temps. La figure 3.8 présente l'évolution du S_r dans la couche de rétention pour trois stations situées le long du transect B entre

1999 et 2011. L'augmentation progressive du S_r depuis le sud vers le nord du site témoigne de l'élévation similaire du niveau piézométrique. Les S_r mesurés aux différentes stations indiquent que le bas de la couche de rétention d'eau est toujours plus saturé que le haut de la couche. La figure 3.8 indique également que le critère de performance des CEBC, i.e. $S_r = 85\%$ dans la couche de rétention d'eau, est atteint en tout temps dès la première année après l'installation du recouvrement. Les moyennes annuelles des mesures de ψ , θ et du S_r associé dans la couche de rétention d'eau sont présentées dans l'annexe E pour toutes les stations présentes sur le site.

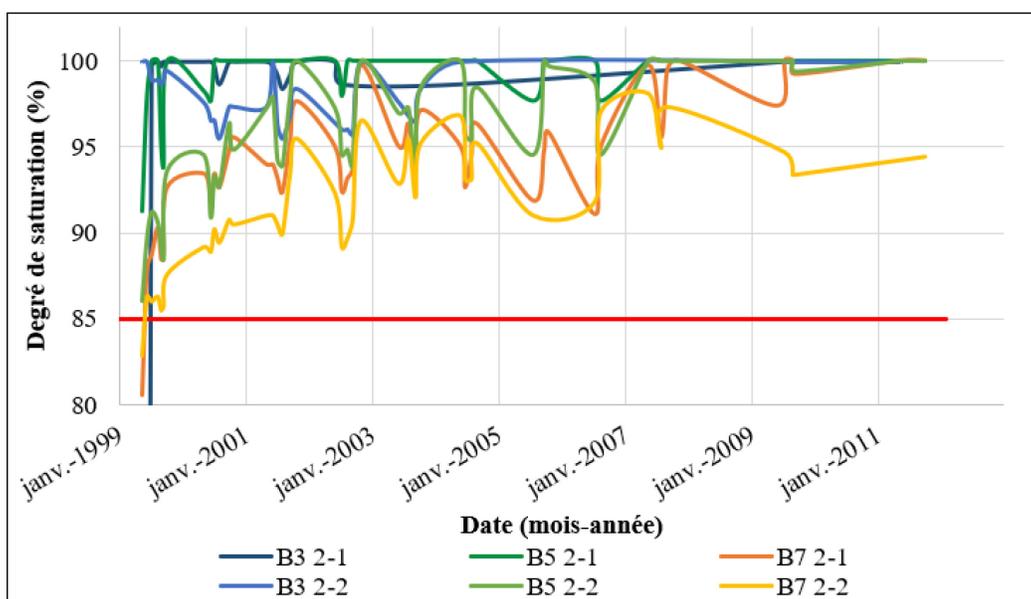


Figure 3.8 : Évolution du degré de saturation dans la couche de rétention d'eau aux stations B3, B5 et B7. La ligne rouge correspond à $S_r = 85\%$ correspondant au critère de performance visé pour une CEBC

3.2 Simulation numérique hydrogéologique

Des analyses numériques hydrogéologiques visant à évaluer la position de la nappe phréatique et l'évolution du degré de saturation de la couche de rétention d'eau de la CEBC de Lorraine ont été réalisées à l'aide de SEEP/W 2018 (Geo-Slope International Ltd., 2017). Comme présenté dans la revue de littérature (cf. section 2.5), SEEP/W est un code qui utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour simuler le mouvement de l'eau liquide ou de la vapeur d'eau à travers des milieux poreux saturés et non saturés. La modélisation de l'écoulement de l'eau avec SEEP/W s'appuie sur l'équation de Richards (équation 2.1) et les simulations peuvent être effectuées en régime

permanent ou en mode transitoire en tenant compte des caractéristiques hydrogéologiques des matériaux et de l'effet des conditions climatiques.

L'intégration des conditions climatiques est nécessaire pour évaluer le comportement de recouvrements tels que les CEBC. Ces conditions peuvent être intégrées dans SEEP/W grâce à la condition aux frontières LCI (land-climate interaction; cf. section 2.5.5.2). Dans le cadre du présent projet, six paramètres climatiques ont été utilisés pour définir les conditions aux limites de la surface : la température de l'air, le flux de précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et l'albédo (cf. section 3.3).

3.2.1 Géométrie du modèle numérique

Un modèle numérique bidimensionnel représentant la section nord-sud du site Lorraine le long du transect B a été construit à partir des informations recueillies sur le site depuis sa construction (cf. ligne pointillée rouge de la figure 3.7; Fontaine, 1999a; Nastev et Aubertin 2000; Dagenais 2005). La longueur du modèle se limite aux 125 premiers mètres au sud du site afin de limiter le temps de calcul des modélisations. Une comparaison avec le modèle de longueur totale (372 m) montre que ce modèle permet de bien représenter le comportement hydrogéologique de la zone la plus critique pour la génération de DMA; cette comparaison est discutée plus en détails dans le chapitre 5.

La figure 3.9 présente la géométrie du modèle dans la partie sud du site, proche de la digue (figure 3.9a) et dans la partie centrale du parc (figure 3.9b). Le modèle proposé se concentre sur la partie désaturée du site et est donc approprié afin d'évaluer la vulnérabilité de la CEBC face aux CC, puisque la désaturation pourrait être plus importante dans cette portion du site, en particulier proche de la digue. La base du modèle se situe à une élévation de 93,68 masl tandis que la partie supérieure est à 99,38 masl. L'épaisseur des résidus Lorraine est de 4,5 m dans cette portion du site. La digue est constituée de résidus grossiers et mesure 4 m de haut, 15 m de large à la base et 5 m de large au sommet. Le matériau du drain est situé du côté aval de la digue. Le maillage du modèle est constitué de 17 548 éléments quadrilatéraux et triangulaires avec une densité d'éléments plus importante dans les couches du recouvrement associé à une longueur des arêtes aux alentours de 10 cm afin d'améliorer la précision des simulations dans cette zone critique.

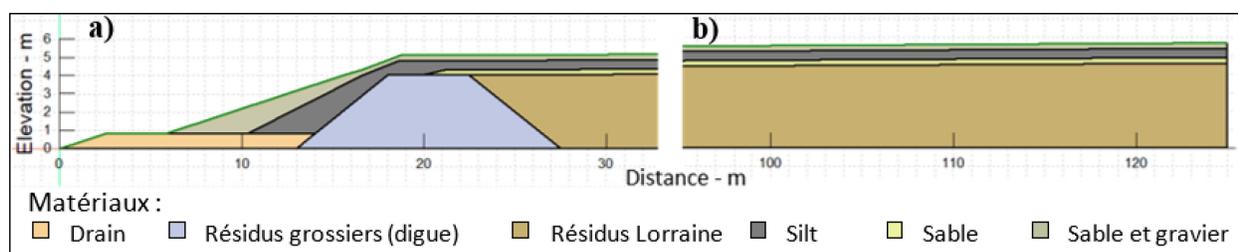


Figure 3.9 : Modèle numérique de la CEBC de Lorraine dans **a** le secteur de la digue au sud du site et **b** la partie centrale du parc

3.2.2 Paramètres de convergence

La convergence dans SEEP/W est calculée au moyen de la norme du vecteur de charge hydraulique utilisée entre des itérations successives. La convergence du modèle numérique se produit lorsque deux solutions successives sont égales à l'intérieur d'un intervalle de tolérance spécifié. Le nombre d'itération maximum est ici fixé à 300 avec comme critère de comparaison entre chaque itération, une différence de charge de pression maximale de 0,005 m et une égalité de deux chiffres significatifs. Les pas de temps sont définis avec une augmentation exponentielle et les résultats sont sauvegardés pour chaque jour de la modélisation.

3.2.3 Propriétés des matériaux du modèle numérique

Chaque matériau est défini dans SEEP/W en lui associant une courbe de rétention d'eau (CRE) et une fonction de perméabilité (k_u) (cf. section 2.5.4). Le modèle de van Genuchten (1980) a été utilisé dans ce projet pour décrire les CRE (équation 2.7) tandis que l'équation proposée par van Genuchten pour décrire le modèle de Mualem (1976) a été utilisé pour prédire les fonctions de perméabilité (équation 2.10).

La CRE du matériau drainant a été obtenu à partir de la librairie disponible dans SEEP/W et correspond à un gravier uniforme. Les CRE des autres matériaux ont quant à eux été sélectionnées à partir des essais de terrain et de laboratoire effectués durant les travaux de Dagenais (2005). La figure 3.10 présente les CRE et k_u des différents matériaux utilisés dans les simulations numériques et le tableau 3.7 résume leurs principales propriétés hydrogéologiques.

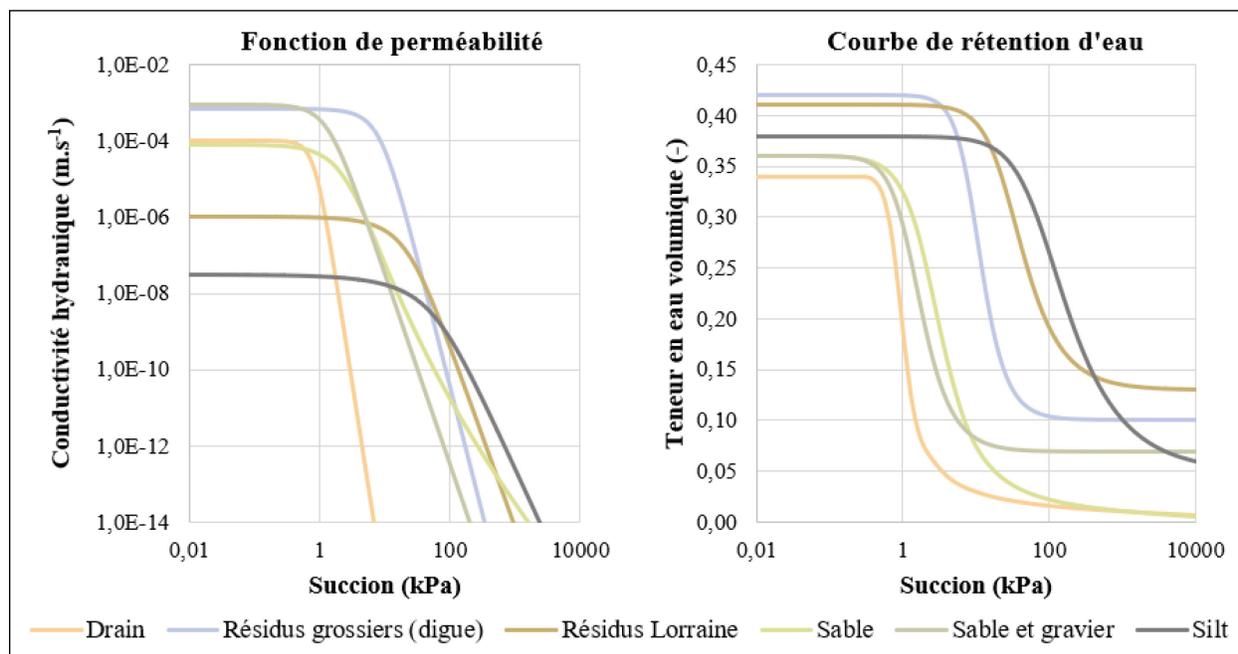


Figure 3.10 : Fonctions de perméabilité et CRE des matériaux utilisés dans les modélisations numériques

Tableau 3.7 : Principales propriétés des matériaux utilisées dans les simulations numériques

Matériau	k_{sat} (m.s ⁻¹)	θ_{sat}	θ_r	α_{vG} (/cm)	n_{vG}
Drain	1×10^{-4}	0,34	0,07	0,100	3,0
Résidus grossiers (digue)	7×10^{-4}	0,42	0,10	0,011	2,9
Résidus Lorraine	1×10^{-6}	0,41	0,13	0,004	2,1
Silt	3×10^{-8}	0,34 à 0,38	0,05	0,001	1,7
Sable	8×10^{-5}	0,36	0,03	0,030	4,0
Sable et gravier	9×10^{-4}	0,33	0,07	0,080	2,5

3.2.4 Conditions initiales et frontières

Afin d'obtenir les conditions initiales, i.e. les valeurs de charges hydrauliques à chaque nœud du modèle, une analyse en régime permanent a été effectuée avec SEEP/W. La fondation du parc à résidus du site Lorraine étant composée d'un till compacté sur le socle rocheux, elle est considérée comme imperméable (Nastev and Aubertin, 2000); une condition limite d'imperméabilité a été appliquée à la base du modèle numérique. Une charge totale de 0 m a été appliquée à la sortie du drain représentant ainsi l'effluent final. Un taux de précipitation constant, égal à 1.10^{-11} m.s⁻¹, a été

appliqué comme condition à la surface et la nappe phréatique a été fixée à 10 cm sous la surface à la limite nord-est du modèle en y appliquant une charge hydraulique constante de 5,6 m à la surface (le modèle mesurant 5,7 m de haut à cette extrémité; figure 3.11). L'analyse paramétrique ayant permis de fixer l'élévation de la nappe est présentée au chapitre 5. Les résultats de cette analyse en régime permanent ont abouti à un modèle numérique où le recouvrement se trouve faiblement désaturé au niveau de la digue et complètement saturé à l'extrémité nord-est avec un niveau piézométrique proche de la surface. Ces conditions correspondent à des conditions hydrogéologiques équivalentes à celles retrouvées après la fonte des neiges printanière. A partir de ces conditions initiales, des simulations en régime transitoire ont été effectuées en prenant en compte les mêmes conditions aux frontières, excepté pour la surface du modèle où des conditions aux frontières de type LCI ont été appliquées pour le climat historique, pour le climat futur avec différents scénarios de changements climatiques ainsi que pour des événements de sécheresse (cf. section 3.3). La figure 3.11 présente le modèle numérique et les conditions aux frontières appliquées en régime permanent et en régime transitoire.

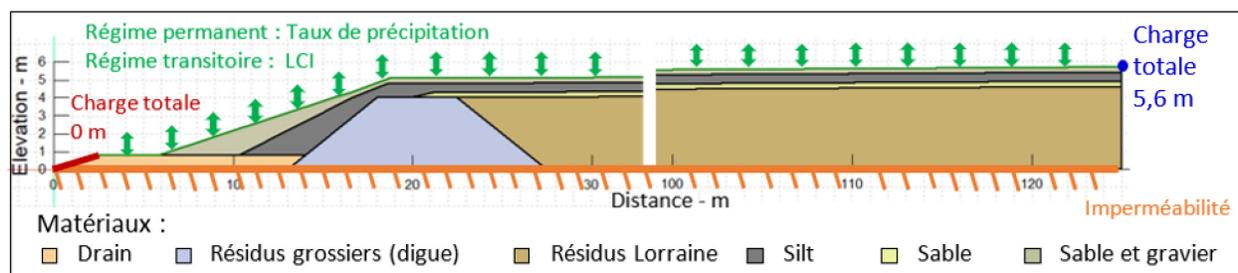


Figure 3.11 : Conditions aux frontières appliquées au modèle numérique en régime permanent et transitoire

3.3 Sélection des données climatiques

Tel que requis par la condition au frontière LCI du logiciel SEEP/W, un jeu de données climatiques complet, i.e. taux de précipitation quotidien, moyennes journalières des températures, de la vitesse du vent, de l'humidité relative ainsi que les variations du rayonnement solaire et de l'albédo, doit être établi pour la période modélisée. Ainsi, un travail de compilation et de traitement a été effectué afin d'obtenir les observations climatiques historiques et les données futures nécessaires.

3.3.1 Climat historique

En fonction de la disponibilité des données hydrogéologiques et météorologiques, la période du 1^{er} janvier 2001 au 31 décembre 2003 a été définie comme étant la période historique de référence de l'étude. Bien que située à proximité du site Lorraine, la station météorologique de Latulipe d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) n'a pu être utilisée pour obtenir les données climatiques historiques car présentant d'importantes lacunes dans les séries temporelles. Présentant des jeux de données plus complets, les trois stations de l'aéroport d'Earlton (Ontario), situé à 75 km au nord-ouest du site minier Lorraine ont pu être utilisées (figure 3.1; identifiants ECCC des stations : 6072225, 6072224, 6072230). Ces stations ont permis d'obtenir les données journalières de température et de précipitations pour la période 2001-2003, ainsi que les données horaires d'humidité relative et de vitesse du vent converties en données journalières (moyenne des valeurs sur 24h de 00 à 23 heure locale). Moins de 1 % des données étaient manquantes pour deux variables (humidité relative et vitesse du vent). Les données d'humidité relative manquantes ont été comblées en effectuant une interpolation linéaire, et une valeur de 0 m.s⁻¹ a été appliquée aux données manquantes de vitesse du vent, car il ne s'agit pas d'une variable linéaire. Les données d'observation du rayonnement solaire (dépendant de la présence et de l'absence des nuages) n'étaient pas disponibles et ont été estimées par l'approximation fournie par le logiciel SEEP/W en fonction de la latitude du site (47.7°) et la période étudiée. Quant à l'albédo, il a été estimé à partir de la littérature à une valeur de 0,2, correspondant à la valeur moyenne d'un sol rocheux ou avec un faible couvert végétal (Musy, 2005), comme c'est le cas sur le site Lorraine (Figure 3.3c). Les variations de précipitations et de température sont présentées à la figure 3.12 tandis que les variations des autres paramètres climatiques peuvent être trouvées à la figure 3.15. Plus de détails sur l'obtention et le traitement des données climatiques historiques peuvent être trouvées dans le rapport de Bresson (2019, en cours).

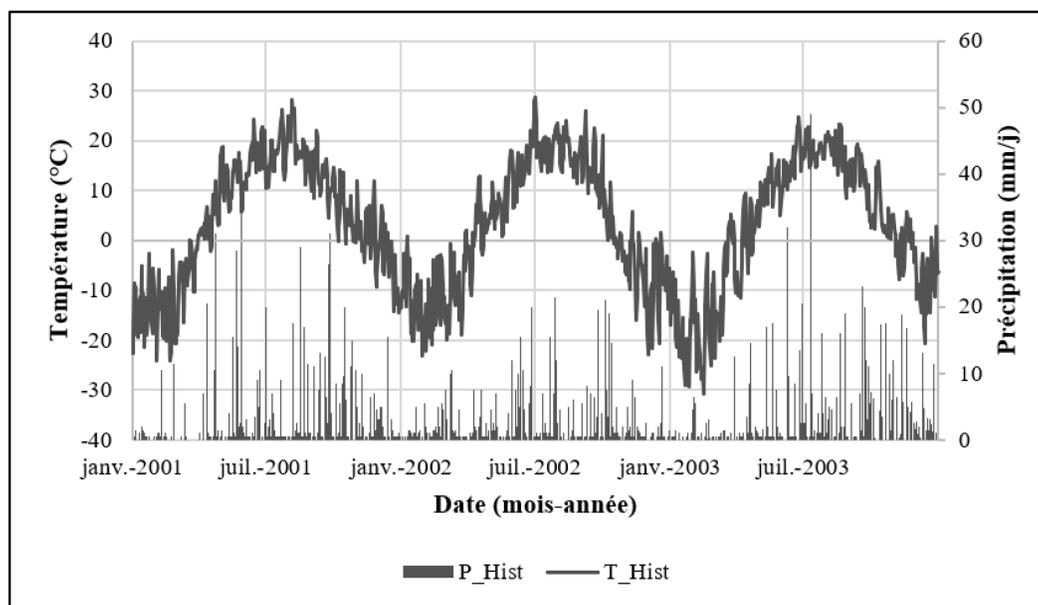


Figure 3.12 : Evolution de la température et des précipitations entre le 1^{er} janvier 2001 et le 31 décembre 2003 issues des observations de la station météorologique de l'aéroport d'Earlton

3.3.2 Scénarios de changements climatiques

Afin d'évaluer la performance à long terme de la CEBC du site Lorraine, l'impact des changements climatiques a été estimé jusqu'en 2100 en se concentrant sur la période du 1^{er} janvier 2098 au 31 décembre 2100 (pour fin de comparaison avec les trois années de la période historique choisie). Des projections climatiques ont dans un premier temps été effectuées afin d'obtenir les données climatiques futures (Bresson, 2019, en cours). Plusieurs modèles de climat étant disponibles pour le site Lorraine, une première sélection a été effectuée afin de conserver les simulations comprenant tous les paramètres nécessaires pour définir la LCI dans SEEP/W (Bresson, 2019, en cours). Neuf modèles de climats développés par différents instituts à travers le monde ont ainsi été étudiés comprenant d'une part des modèles globaux (MGC), d'autre part des modèles régionaux (MRC). Chacun de ces modèles ont par la suite été associés aux deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre les plus communément utilisés, le RCP 4.5 et le RCP 8.5, aboutissant ainsi à 18 scénarios de changements climatiques disponibles pour la modélisation du comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine. Afin d'obtenir des projections plus cohérentes par rapport aux observations historiques du site étudié, un post-traitement a également été appliqué aux données issues de ces simulations (Bresson, 2019, en cours). Les 18 scénarios ne pouvant être testés par manque de temps, une sélection a été effectuée afin de couvrir une gamme assez large et

représentative des modèles de changements climatiques. Les diagrammes de dispersion présentant le changement relatif en précipitations (ΔPr) en fonction du changement relatif en température (ΔT) ont ainsi été tracés pour chacun des 18 scénarios et permettent de comparer l'évolution de ces deux paramètres entre la période historique (2001-2003) et la période future (2098-2100) (figure 3.13).

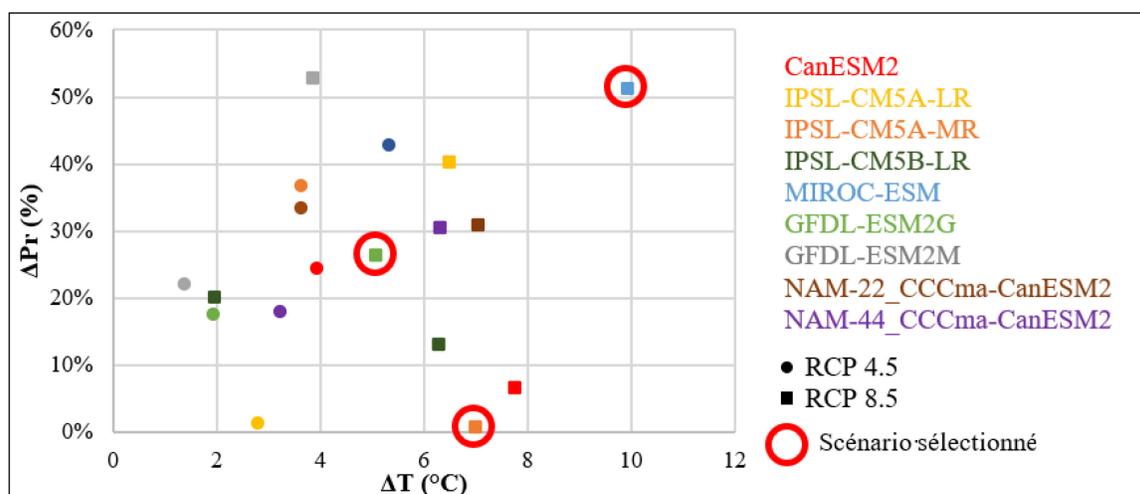


Figure 3.13 : Augmentation relative de la température et des précipitations entre la période historique (2001-2003) et la période future (2098-2100) pour différents scénarios de CC du site Lorraine

Trois scénarios de changements climatiques ont finalement été choisis : IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM et GFDL-ESM2G (Figure 3.13). Le nom des scénarios sera simplifié par la suite en utilisant les abréviations IPSL, MIROC et GFDL. Le tableau 3.8 résume les principales caractéristiques de ces scénarios et indique de quels instituts ils proviennent. Le scénario IPSL a été choisi car il simule le pire changement climatique attendu pour le comportement hydrogéologique de la CEBC. Il projette en effet la combinaison d'une augmentation élevée de température (+ 7 °C) et d'une faible augmentation des précipitations (+ 0,7 %), ce qui pourrait conduire à une plus importante désaturation de la couche de rétention d'eau. GFDL a été sélectionné comme scénario médian avec une augmentation de température d'environ 5 °C et une augmentation de précipitations de 26,1 %. MIROC a quant à lui été choisi comme scénario présentant les plus fortes augmentations de température et de précipitations, respectivement + 9,9 °C et + 51,1 %. La figure 3.14 présente l'évolution de la température et des précipitations entre la période historique (2001-2003) et la période future (2098-2100) pour les trois modèles sélectionnés. Les données de température sont présentées en mm/mois sur la figure 3.14 afin de

mieux visualiser les différences entre les scénarios, cependant des données quotidiennes ont été utilisées dans les simulations. Les autres paramètres utilisés dans les simulations (humidité relative, vitesse du vent, rayonnement solaire et albédo) sont présentés à la figure 3.15. En moyenne pour les différents scénarios, les variations sont comprises entre 0.20 et 0.98 pour l'humidité relative, entre 2.11 et 37.4 m.s⁻¹ pour la vitesse du vent et entre 0.08 et 0.36 kJ.s⁻¹.m⁻² pour le rayonnement estimé par SEEP/W. L'albédo, quant à lui, est fixé à 0,2 comme pour le scénario climatique historique.

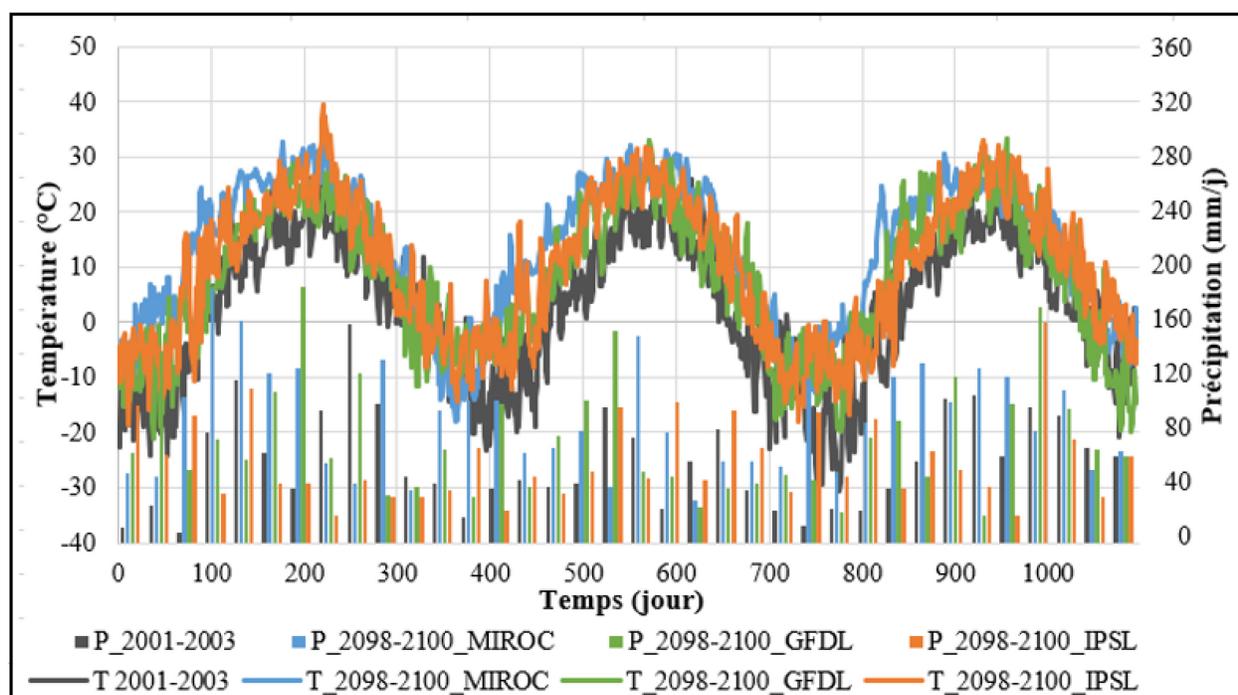


Figure 3.14 : Evolution de la température et des précipitations entre 2001 et 2003 pour le scénario climatique historique et entre 2098 et 2100 pour les trois scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques

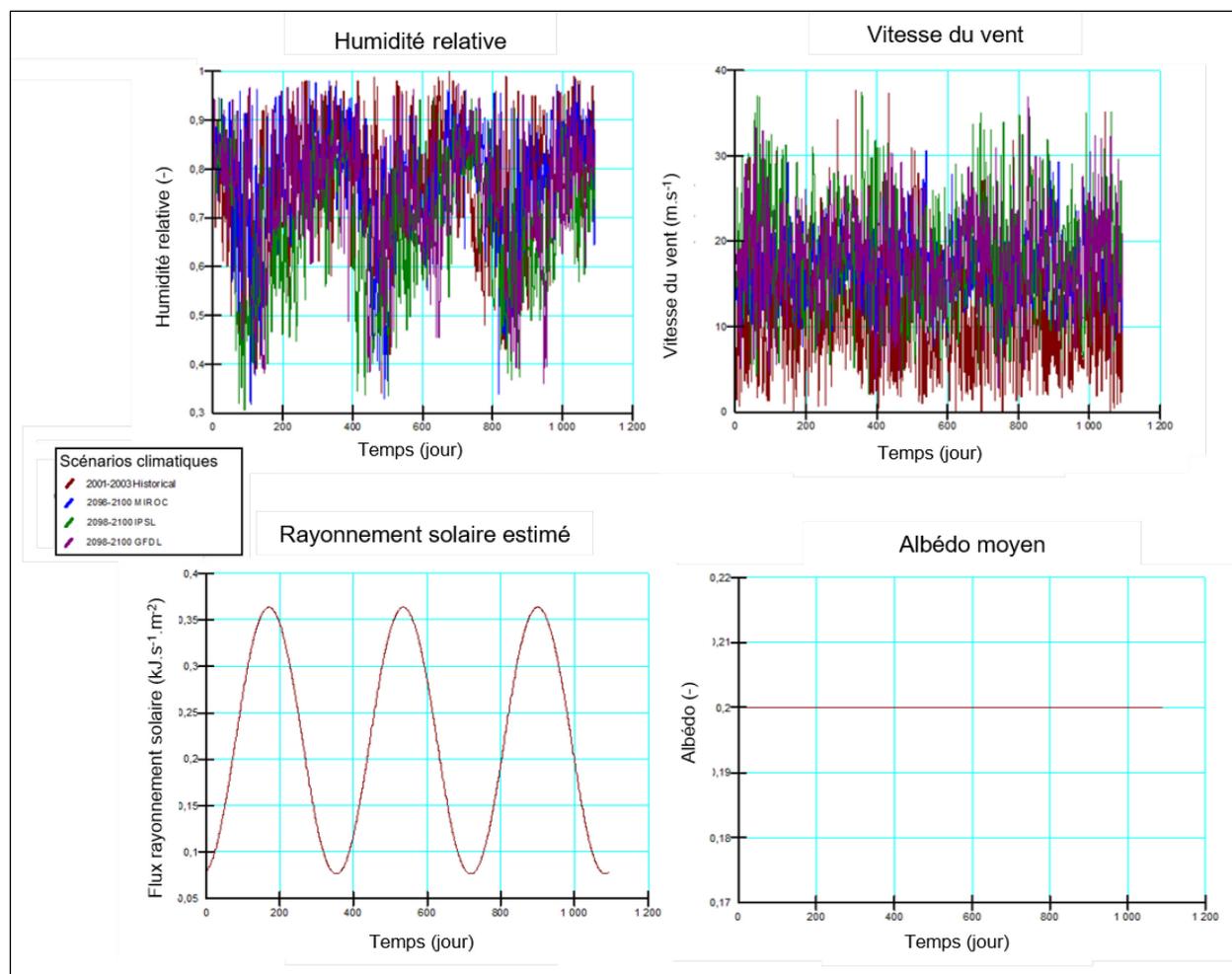


Figure 3.15 : Evolution de l'humidité relative, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de l'albédo entre 2001 et 2003 pour le scénario climatique historique et entre 2098 et 2100 pour les trois scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques

Tableau 3.8 : Résumé des principales caractéristiques et informations sur les scénarios de changements climatiques utilisés dans les simulations numériques

Climate change scenario	ΔT (°C)	ΔPr (%)	RCP	Center	Reference
MIROC-ESM	9.9	51.1	8.5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	Watanabe et al. (2011)
GFDL-ESM2G	5.1	26.1	8.5	NOAA-GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Dunne et al. (2012, 2013)
IPSL-CM5A-MR	7.0	0.7	8.5	Institut Pierre Simon Laplace, France	Dufresne et al. (2013)

3.3.3 Conditions extrêmes de sécheresse

Le critère de performance des CEBC étant lié au degré de saturation de la couche de rétention d'eau, des conditions extrêmes de sécheresse ont été appliquées aux modélisations numériques de la CEBC de Lorraine afin de tester sa performance face à des conditions extrêmes susceptibles de devenir plus récurrentes à l'avenir (Guay et al., 2015).

La sécheresse est définie, selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), comme une « Période de temps anormalement sec suffisamment longue pour causer un grave déséquilibre hydrologique » (IPCC, 2014) et une multitude d'approches existent pour prédire les conditions extrêmes de sécheresse (Alexander et al., 2006; Tebaldi et al., 2006; Vicente-Serrano et al., 2010). Cependant, ces approches sont principalement développées pour des problématiques agricoles et sont peu adaptées au domaine minier (Bresson et al., 2018; Bresson, 2019, en cours). Pour la conception d'ouvrage de restauration minière, certaines études réalisées au Québec ont simulé une période sans apport en eau d'environ 60 jours (Ricard et al., 1997; Bussière et al., 2003; Broda et al., 2014). Cependant, bien que semblant représentative de conditions extrêmes, cette période de deux mois n'est basée sur aucune analyse systématique de données météorologiques.

3.3.3.1 Nouvelle méthodologie

Dans cette étude, une nouvelle approche a été développée afin de définir des conditions de sécheresse adaptées au site Lorraine. Un épisode de sécheresse future a été défini en se basant sur le changement relatif des caractéristiques des sécheresses projetées par le scénario climatique IPSL. Le changement relatif a été calculé entre les périodes historique (1981 – 2010) et future (2071 – 2100), puis appliqué sur les caractéristiques de la pire sécheresse historique. Trois étapes ont été suivies afin de définir la pire sécheresse historique, basée sur les données météorologiques entre 1953 et 2018 de la station de l'aéroport d'Earlton :

1. Sélectionner les périodes avec des températures supérieures à 5 °C afin de faire abstraction de la période de gel pendant laquelle l'efficacité des CEBC n'est pas affectée en raison de la diffusion négligeable de l'oxygène dans les sols gelés presque saturés (Nyameogo et al., 2018);

2. Calculer la durée des épisodes de sécheresse (d en jours) pour les périodes non gelées en tenant compte du nombre de jours secs consécutifs, i.e. présentant des précipitations journalières inférieures à 1 mm;
3. Calculer le cumul des précipitations avant sécheresse (CPBD en anglais pour cumulative precipitation before drought en mm) sur 30 jours précédant le premier jour de la période sèche.

Le paramètre CPBD défini dans ce travail vise à donner des indications sur l'historique des précipitations avant la sécheresse et à l'associer à la saturation du recouvrement. Une sécheresse d'une même durée se produisant dans un contexte où le recouvrement est saturé n'aura pas les mêmes effets sur un recouvrement désaturé. En particulier, le critère de performance associé au degré de saturation de la couche de rétention d'eau égal à 85 % aurait plus de risque de ne pas être atteint si le recouvrement est déjà désaturé (Bresson, 2019, en cours).

Pour le site minier de Lorraine, la plus longue sécheresse historique survenue en mai 1999 a duré 42 jours et le CPBD minimal observé est de 3 mm en avril 1958. Le changement relatif entre les sécheresses historiques et futures a été estimé en comparant les épisodes de sécheresse modélisés par le scénario IPSL en suivant les mêmes 3 étapes présentées précédemment. Une augmentation d'environ 22 % pour la durée maximale de la sécheresse et d'environ 50 % pour le CPBD a été estimée. Les sécheresses historiques et futures appliquées aux simulations numériques sont ainsi caractérisées respectivement par une durée de 42 et 51 jours et par un CPBD de 3 et 6 mm. Ces conditions de sécheresse ont été appliquées aux séries temporelles de précipitations de la simulation pour la période 2098 - 2100 avec le scénario IPSL (figure 3.16). Il est à noter que les taux de précipitation appliqués durant les épisodes de sécheresse ne sont pas nuls mais inférieurs à 1 mm.j^{-1} . Les séries temporelles de températures, d'humidité relative, de vitesse du vent, de rayonnement solaire et d'albédo ont été conservées avec les mêmes valeurs que dans les simulations sans sécheresse.

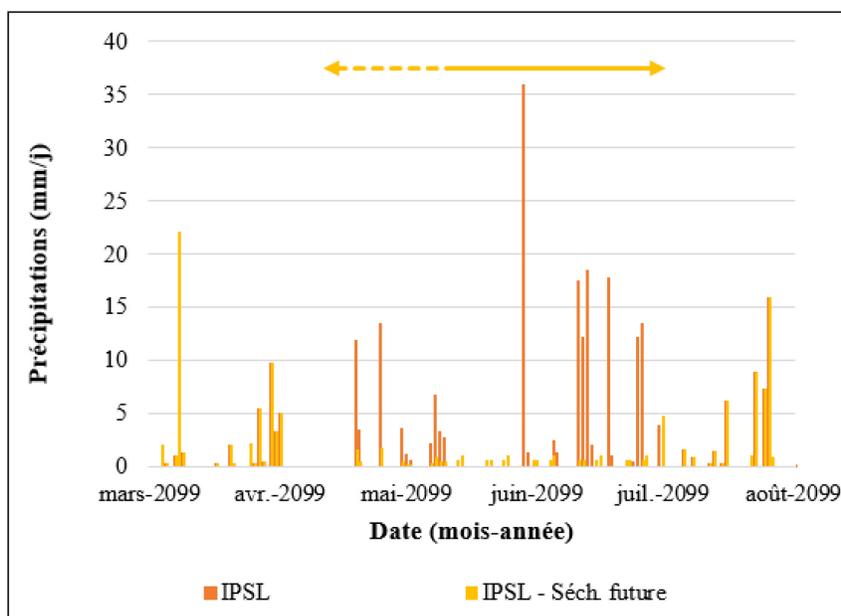


Figure 3.16 : Données de précipitations modifiées avec épisodes de sécheresses appliqués pour la période future (2098-2100) avec le scénario de changements climatiques IPSL. La flèche jaune en pointillés correspond à la période du CPBD et la flèche jaune pleine à la sécheresse future de 51 jours.

3.3.3.2 Comparaison avec ancienne méthodologie

Un deuxième épisode de sécheresse a également été défini, basé sur la méthodologie utilisée dans précédents travaux de conception de CEBC ayant appliqué des conditions climatiques extrêmes (Ricard et al. 1997; Bussière et al. 2003; Broda et al., 2014). Ces travaux effectués au Québec, dans des conditions similaires à celles du site Lorraine, utilisent la modélisation numérique pour simuler une sécheresse extrême définie comme une période de deux mois sans précipitation appliquée après des conditions similaires à la fonte des neiges au printemps considérant ainsi que la couche de rétention d'eau de la CEBC est à son maximum de saturation avant l'application de la sécheresse. Une simulation supplémentaire a donc été réalisée afin de comparer la nouvelle approche développée dans cette étude (utilisant 51 jours de sécheresse en mai 1999 et un CPBD de 6 mm) avec la précédente lorsque deux mois sans précipitation sont appliqués (juillet et août 2002; figure 3.17). Cet épisode de sécheresse a été appliqué au climat historique avec la LCI correspondante simulée jusqu'au 30 juin 2002 comme condition de surface, puis un taux de précipitation nul a été appliqué pendant les 60 jours suivants. Le tableau 3.9 résume les principales caractéristiques des

données climatiques et des épisodes de sécheresse utilisés dans les différentes simulations numériques.

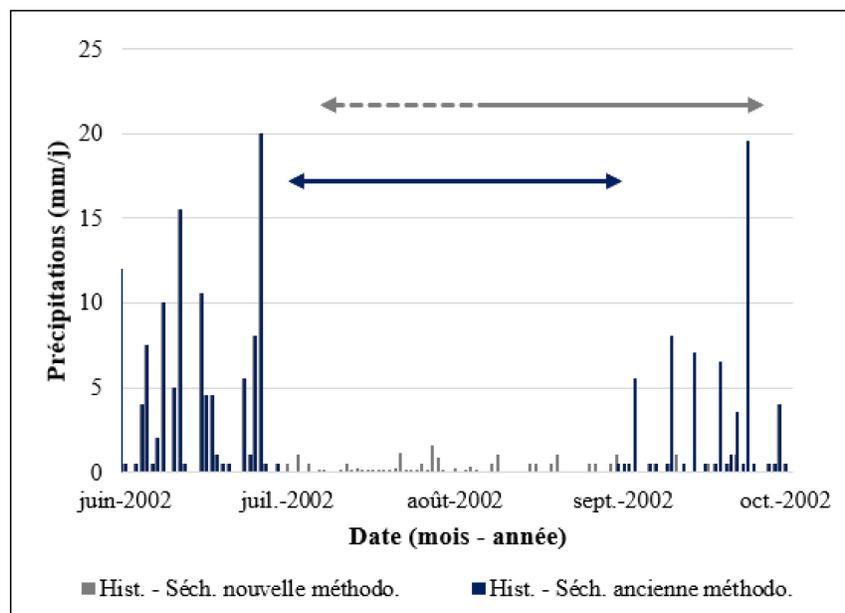


Figure 3.17 : Données de précipitations modifiées avec épisodes de sécheresses appliqués pour la période historique (2001-2003) avec le scénario climatique historique. La flèche bleue correspond aux 2 mois sans précipitation, la flèche grise en pointillés correspond à la période du CPBD et la flèche grise pleine à la sécheresse future de 51 jours.

Tableau 3.9 : Résumé des principales caractéristiques des scénarios climatiques et des évènements de sécheresse appliquées dans les simulations numériques

Simulation	Période simulée	Caractéristiques de sécheresse		
		Période	CPBD (mm)	Durée (j)
Données historiques	2001 – 2003	août 2002	82,6	11
Scénario climatique IPSL	2098 – 2100	mai 2099	48,3	18
Historique + 2-mois sans précipitation	2001 - 2003	juillet – août 2002	102,9	60
IPSL + sécheresse future	2098 – 2100	avril – mai 2099	6,0	51

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE ABILITY OF A COVER WITH CAPILLARY BARRIER EFFECTS TO CONTROL ACID GENERATION 1

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus à la suite des modélisations numériques pour évaluer l'influence des changements climatiques sur le comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine. Ce chapitre constitue un article soumis pour publication à Hydrogeology Journal.

4.1 Abstract

Significant changes in temperature and precipitation are expected in the coming decades across Canada because of climate change (CC). Mean annual precipitation, temperature, and the frequency and the duration of drought events are expected to increase in Québec south of the 50th parallel. Oxygen barriers such as covers with capillary barrier effects (CCBE), which are used to control acid mine drainage (AMD), are sensitive to CC. Increases in precipitation may have positive effects on maintaining the saturation of moisture-retaining layer (MRL), which are necessary for reducing oxygen fluxes to reactive tailings; however, drought events could cause temporary desaturation of MRL and, consequently, increase the potential for acid generation. The Lorraine mine site located in western Québec (Canada) was reclaimed with a CCBE in 1999 and was used as case study to assess the effects of CC on reclamation performance. For this study, a 2D numerical model was developed and validated using three years of meteorological and hydrogeological data. Numerical simulations were performed to assess the CCBE's performance considering the influence of: (i) climatic conditions (i.e., precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation) by 2100 for three different CC scenarios, and (ii) extreme drought events. Performance targets were reached for all tested CC scenarios, thus indicating that the Lorraine CCBE design is robust with respect to CC and extreme drought events. More broadly, this study illustrates how numerical simulations can be used to quantify the influence of CC on the long-term ability of CCBEs to control AMD generation.

¹ Hotton, G., Bussière, B., Pabst, T., Bresson, É. Roy, P. (2019). Influence of climate change on the ability of a cover with capillary barrier effects to control acid generation (article soumis à Hydrogeology Journal le 29 mars 2019)

Keywords: Cover with capillary barrier effects (CCBE), Acid mine drainage (AMD), Mine site reclamation, Numerical modeling, Climate change

4.2 Résumé

Au cours des prochaines décennies, d'importantes variations de températures et de précipitations sont à prévoir sur l'ensemble du Canada à cause des changements climatiques (CC). Au sud du 50^{ème} parallèle, une augmentation de la fréquence et de la durée des événements de sécheresse et des moyennes annuelles de précipitations et de température est anticipée. Les barrières à l'oxygène telles que les couvertures à effets de barrière capillaire (CEBC) qui permettent le contrôle du drainage minier acide (DMA) sont sensibles aux CC. L'augmentation des précipitations pourrait avoir un effet positif sur le degré de saturation de la couche de rétention d'eau qui est indispensable pour réduire le flux d'oxygène vers les rejets réactifs. Cependant, les événements de sécheresse pourraient causer la désaturation de cette couche et donc, augmenter le potentiel de génération de DMA. Le site Lorraine, situé à l'ouest de la province du Québec (Canada), a été restauré à l'aide d'une CEBC en 1999 et a été utilisé dans cette étude afin d'évaluer l'impact des CC sur la performance de ce recouvrement. Des modélisations numériques ont été effectuées afin d'évaluer la performance de la CEBC en considérant l'influence (i) des conditions climatiques (précipitations, température, humidité relative, vitesse du vent, albédo et rayonnement solaire) d'ici 2100 pour trois scénarios climatiques et (ii) des conditions extrêmes de sécheresse. Les critères de performance ont été atteints avec tous les scénarios climatiques testés indiquant ainsi que le design de la CEBC de Lorraine est robuste face aux CC et aux conditions extrêmes de sécheresse. Plus généralement, cette étude illustre l'utilité des modélisations numériques pour quantifier l'influence des CC sur la performance à long terme des CEBC à contrôler la génération de DMA.

Mots clés : Couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC), Drainage minier acide (DMA), Restauration de site minier, Modélisation numérique, Changements climatiques

4.3 Introduction

Acid mine drainage (AMD) is one of the main environmental issues faced by the mining industry worldwide (Aubertin et al., 2002, 2016). When sulfide minerals contained in tailings are exposed to water and oxygen they can oxidize and generate AMD which is usually characterized by low pH and high sulfate and metal concentrations (Jambor, 1994; Nordstrom, 2000; Aubertin et al., 2002). AMD generation can last for hundreds of years after mine closure if no control measures are put in place (Bussière et al., 2001). Control of oxygen migration with engineered barriers, such as covers with capillary barrier effects (CCBEs), is often considered as the most efficient method for preventing AMD under humid climatic conditions (SRK, 1989; MEND, 2001).

The underlying concepts behind CCBEs were developed in the 1980s (Nicholson et al., 1989; Aubertin et al., 1995, 1999) and the effectiveness of CCBEs was later documented through both laboratory and in situ studies (Aubertin et al. 1995; O’Kane et al. 1998, Yanful 1993; Yanful et al., 1999; Bussière et al., 2004, 2006, 2007, 2009). A CCBE is typically made of three layers or more. A contrast in the unsaturated hydraulic properties of the materials that make up each layer of the CCBE tends to impede the downward flow of water and helps to maintain a high degree of saturation (S_r) in the fine-grained layer, which is also called the moisture-retaining layer (MRL). This high degree of saturation in the MRL limits oxygen flux that reaches the reactive tailings and thus, helps to limit acid production (Nicholson et al., 1989; Aachib, 1997, Aubertin et al., 1995, 1999; Yanful et al., 1999).

CCBEs are usually designed through laboratory- and field-based studies, as well as numerical simulations (e.g., Ricard et al., 1997; Nastev and Aubertin, 2000). Average historical data are typically used to define climatic conditions and set the top boundary conditions, while severe drought events are simulated to assess the performance of CCBEs under the most unfavorable conditions. For example, a two-month period without precipitation is often considered as extreme drought conditions in Québec (Ricard et al. 1997; Aubertin et al. 1999; Bussière et al. 2003; Pabst 2011; Ethier et al. 2018; Broda et al., 2014). However, significant changes in temperature and precipitation are expected across Québec by the end of the 21st century because of climate change

(CC) (Desjarlais et al., 2010). Although the impacts of CC on geotechnical infrastructures have increasingly been the focus of studies in recent years (IPCC 2007, 2013, 2014a, 2014b; Vardon, 2015), only relatively few studies have examined mining infrastructures (Pearce et al., 2009, 2010; Ford et al., 2010) and reclamation scenarios (Alam et al., 2018; Bussière et al., 2017). A more detailed evaluation of the effects of CC (including more intense drought events; Guay et al., 2015) would help to more precisely assess the robustness of cover systems in the long-term, while avoiding excessively conservative (and more costly) designs.

In this study, numerical simulations were conducted to investigate the impacts of CC on the hydrogeological behavior of the Lorraine mine, which is located in western Québec (Canada). At the Lorraine site, the acid generating tailings impoundment was reclaimed using a CCBE. After validating the numerical model using historical, in situ hydrogeological measurements, two factors were assessed for their influence on the CCBE's performance: (i) the evolution of climatic conditions (i.e., precipitation, temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation) by 2100, and (ii) the historical and projected extreme drought events. This study is one of the first attempts to quantify the impacts of CC on the long-term performance of AMD control methods in the Canadian context.

4.4 Materials and methods

4.4.1 Lorraine mine site

The Lorraine mine site is located 45 km east of Ville-Marie in Abitibi-Témiscamingue, which is located in the western part of Québec (Fig. 4.1) and characterized by a humid continental climate. The polymetallic deposit of Lorraine was discovered in 1961 and exploited between 1964 and 1968 for Cu, Ni, Au and Ag (Lavergne, 1985). Nearly 600,000 tonnes of tailings were generated during the operation. The tailings storage facility (TSF) covers an area of approximately 15.5 ha with a tailings thickness that varies from a few centimeters in the north portion of the site to 6 m in the southern portion. The tailings were deposited in a shallow valley which was connected to the nearby Lett creek in the south and two retention dikes were built during exploitation. The water table is close to the surface in the northern part of the site while the tailings in the central and southern parts are unsaturated (Nastev and Aubertin, 2000).



Figure 4.1: Location of the Lorraine mine site. Province of Québec and Abitibi-Témiscamingue region are highlighted in red and orange respectively. The blue triangle indicates the location of the Lorraine mine site and the green cross shows the location of the Earlton airport meteorological station

The tailings at Lorraine are highly acid-generating and contain approximately 10 % sulfide minerals, which mainly comprise pyrrhotite with traces of pyrite and chalcopyrite. The tailings do not contain any carbonate (neutralizing) minerals (Bernier, 1996). Their net neutralization potential (NNP) is around $-200 \text{ kgCaCO}_3 \text{ eq/t}$ (Bernier, 1996).

The Lorraine TSF was abandoned for thirty years. Prior to reclamation, pHs values were between 2.2 and 2.6 and chemical analyses indicated high sulfate (3730 to 9190 mg/L) and metal concentrations (Cu from 0.135 to 0.804 mg/L; Fe from 838 to 3200 mg/L; Ni from 0.21 to 9.5 mg/L; Zn from 0.19 to 1 mg/L) (Entraco, 1996). Reclamation work started in 1997 based on recommendations proposed by Aubertin (1996). The reclamation plan involved the construction of a CCBE, which would act as an oxygen barrier complemented with a passive effluent treatment system comprised of three dolomitic drains and one limestone drain. The proposed design for the

CCBE was determined using laboratory tests and numerical simulations that integrated representative average climatic boundary conditions (Nastev and Aubertin, 2000).

4.4.2 CCBE configuration and material properties

Construction of the CCBE at the Lorraine site began in the summer of 1998 and ended in the spring of 1999. The cover was made of three layers (from bottom to top): (i) a 0.3-m sandy layer acting as capillary break layer (CBL), (ii) a 0.5-m layer of silt used as the MRL, and (iii) 0.3-m layer of a sand and gravel for the protection layer (Fig. 4.2b; Aubertin, 1996; Nastev and Aubertin, 2000). The silt comprising the MRL was non-plastic (ML; ASTM D2487) and the sand used in the bottom and top layers was uniform with a low proportion of silt (SP-SM) (Dagenais, 2005). The main physical and hydrogeological properties of these materials are summarized in Table 4.1. More information about the design, construction, and material characterizations of the CCBE can be found in Nastev and Aubertin (2000), Dagenais (2005), and Dagenais et al. (2001, 2005).

Tableau 4.1: Properties of the silt and sand used in the Lorraine CCBE (adapted from Dagenais et al., 2001). D_{10} is the diameter corresponding to 10 % passing on the cumulative grain-size distribution curve; C_U is the coefficient of uniformity; G_s is the specific gravity; k_{sat} is the saturated hydraulic conductivity; AEV is the air entry value and n is the porosity

Properties	Silt	Sand
D_{10} (mm)	0.001 to 0.0021	0.06 to 0.15
C_U (-)	5.1 to 7.1	2.5 to 3.3
G_s (-)	2.76	2.70
k_{sat} ($m \cdot s^{-1}$)	2×10^{-8} to 1×10^{-7} (n from 0.42 to 0.48)	7×10^{-5} ($n = 0.38$)
AEV (m of water)	2.9 to 5 (n from 0.38 to 0.46)	0.25 ($n = 0.38$)

4.4.3 CCBE instrumentation and performance monitoring

Twenty monitoring stations were installed along three instrumentation lines (Lines A, B, and C; Fig.4.2a). An equipment update was completed in 2008 to replace old probes and add five new stations along a new line (Line D) in the southern part of the site (Fig. 4.2a). Each station was monitored using four volumetric water content (θ) probes and four matrix suction (ψ) sensors located at different depths. Time-domain reflectometer (TDR) probes (Soil Moisture) were used in Lines A, B and C. For stations along Line D, θ was measured with ECH₂O probes (Meter Group

Inc.), which use the frequency domain (FD) approach to calculate the dielectric permittivity of the soil and deduce the volumetric water content (Robinson and Dean 1993; Hilhorst and Dirksen 1994). ECH₂O probes were calibrated in the laboratory prior installation (Fabre, 2008). To measure ψ , Irrrometer Watermark (WM) granular matrix sensors were used (White and Zegelin, 1995).

Volumetric water contents and suctions were measured four to eight times per year between 1999 and 2008 (Bussière et al., 2009) and daily automatic measurements were performed at stations along Line D between 2008 to 2011 (Maqsoud et al., 2012).

Eleven piezometers were also installed to measure piezometric levels in the TSF (Fig. 4.2a) (Jolette, 2001; Maqsoud and Bussière, 2008). Piezometric levels were measured during the summer on a monthly basis between 1999 and 2009, and daily measurements were carried out for the PO3, PO4 and PO6 piezometers between 2009 and 2011 (Maqsoud et al., 2012). Table 4.2 summarizes the type of probes and the frequency of measurements for the monitoring stations and piezometers.

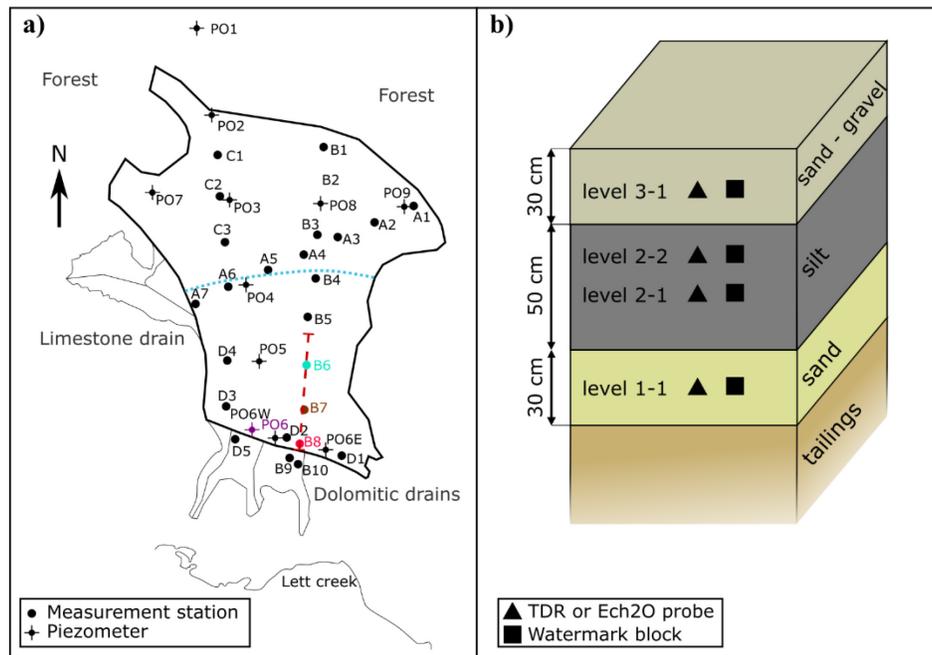


Figure 4.2: **a** Location of monitoring stations and piezometers at the Lorraine site. Highlighted stations and the red dashed line represent, respectively the stations and the cross-section used in the numerical simulations presented in this paper. The blue dotted line corresponds approximately to the limit between the unsaturated zone in the south and the saturated zone in the north. **b** Location of the probes in the cover (adapted from Dagenais et al., 2001; Maqsoud and Bussière, 2008; Bresson et al., 2018)

Tableau 4.2: Type of probes and frequency of measurements for the different monitoring stations and piezometers

<i>Station</i>	Probes		Period	Frequency
	θ	ψ		
Lines A, B and C	TDR	WM	1999 - 2008	4 to 8 times/year
Line D	ECH ₂ O	WM	2008 - 2011	Daily
<i>Piezometer</i>				
PO1 to 9	Manual		1999 - 2009	4 to 6 times/year
PO3, 4 and 6	Automatic		2009 - 2011	Daily

Monitoring indicated that the degree of saturation in the MRL remained above 85 % across the entire site all year long and that suctions in the MRL were most below the air entry value (AEV) of the silt most of the time over the first ten years following the construction of the CCBE (Bussière et al., 2009). Capillary barrier effects are well developed from the center of the TSF to the southern part of the site. The MRL in the northern part of the site was below the water table and was consequently fully saturated at all times.

4.5 Numerical model

Hydrogeological numerical simulations were conducted using SEEP/W 2018 (Geo-Slope International Ltd., 2017). SEEP/W is a code that uses the finite element method (FEM) to simulate the movement of liquid water or water vapor through saturated and unsaturated porous media. Previous works have demonstrated the capacity of SEEP/W to simulate the hydrogeological behavior of cover systems (Bussière et al., 2003; Dagenais, 2005; Aubertin et al., 2009; Pabst et al., 2017; Kalonji-Kabambi et al., 2017).

Water flow modeling with SEEP/W relies on Richard's equation and the assumptions that the porous medium is non-deformable, homogeneous, and isotropic, and the fluid is incompressible (Geo Slope International Ltd, 2015). SEEP/W simulates interactions between soil, vegetation, and the atmosphere thanks to the land-climate-interaction (LCI; Geo-Slope International Ltd., 2017). In the present study, six climatic parameters were used to define surface boundary conditions: air temperature, precipitation flux, relative humidity, wind speed, solar radiation and albedo. To

evaluate the actual evapotranspiration, SEEP/W integrates the Penman-Wilson formula (Wilson, 1990; Wilson et al., 1994).

4.5.1 Numerical model geometry

The numerical model simulates a cross section along the B transect crossing the tailings pond from the southern dike to the saturated zone in the middle of the site (Fig. 4.2a; Dagenais, 2005). The length of the model was limited to the first 125 m south of the site to reduce computation time. A parametric study comparing the hydrogeological behavior of the complete model ($X = 372$ m) with the reduced model validated the non-variability of boundary conditions beyond 120 m and defined the water table at 10 cm below the surface for the north-east model limit (Hotton, 2019).

The proposed model (Fig. 4.3) represents the southern portion of the site, which is particularly vulnerable to desaturation. The base of the model is located at 93.7 masl, while the maximal elevation of the tailings is 99.4 masl. The Lorraine tailings are 4.5 m thick on average in this part of the site. The dike is made of waste rocks and is 4 m high, 15 m wide at the base and 5 m wide at the top. The model is composed of a total of 17,548 quadrilateral and triangular elements with a higher density of elements in the cover layers.

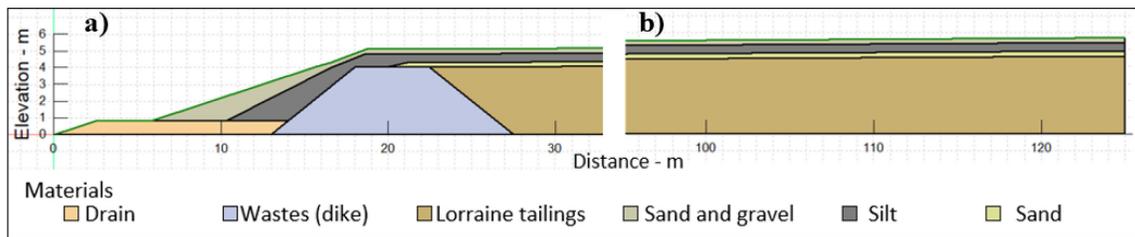


Figure 4.3: Numerical model of the Lorraine CCBE with SEEP/W at **a)** the south dike sector, and **b)** the north-east limit of the model. The total length of the model is 125 m

4.5.2 Material properties of the numerical model

The van Genuchten (1980) (Eq. 4.1) and Mualem (1976) models (Eq. 4.2) were, respectively, used to describe the water retention curves (WRCs) and the permeability functions (k_u) of the materials used in the numerical simulation.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{\text{sat}} - \theta_r}{[1 + (\alpha_{\text{vG}} \psi)^{n_{\text{vG}}}]^{m_{\text{vG}}}} \quad (4.1)$$

$$k(\psi) = k_{sat} \frac{\{1 - (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}} [1 + ((\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}})^{m_{vG}}]\}^2}{[1 + (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}}]^{m_{vG}/2}} \quad (4.2)$$

where, α_{vG} [L^{-1}], n_{vG} [-] and m_{vG} [-] are fitting parameters, θ_{sat} is the saturated volumetric water content [-], θ_r is the residual volumetric water content [-] and k_{sat} is the saturated hydraulic conductivity [$L.T^{-1}$].

The materials WRCs were defined through field and laboratory tests (Dagenais, 2005) and permeability functions were predicted using with Eq. 3 (Fig 4.4. And Table 4.3). The draining material WRC was not characterized but was defined from the SEEP/W library and corresponds to a uniform gravel.

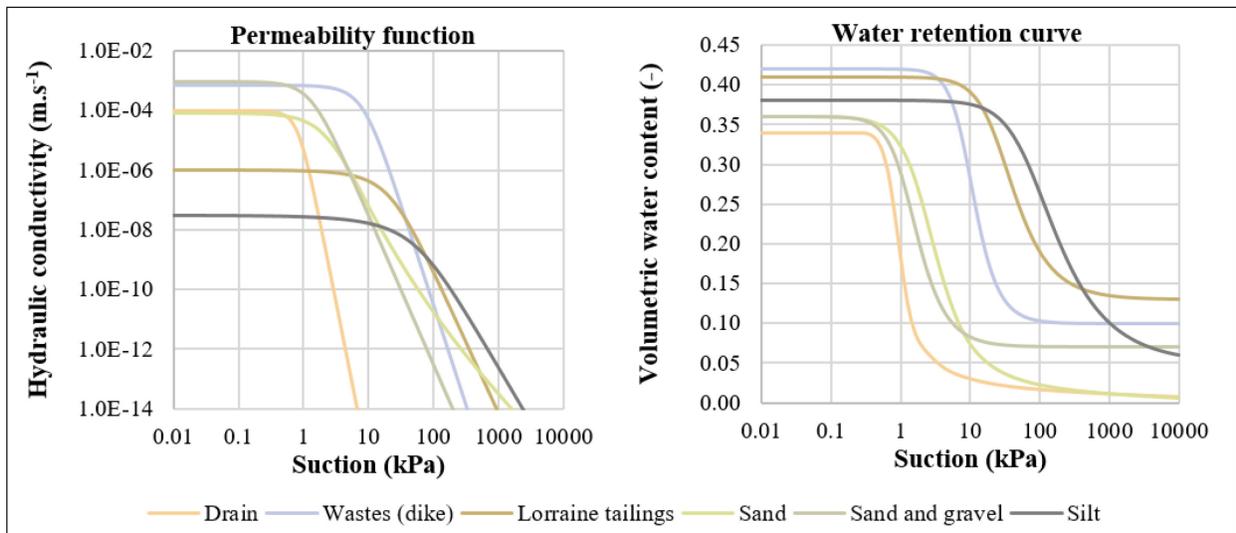


Figure 4.4: Permeability functions and WRCs of materials used in the numerical simulations

Tableau 4.3: Main material properties used in numerical simulations

Materials	k_{sat} ($m.s^{-1}$)	θ_s	θ_r	α_{vG} (cm^{-1})	n_{vG}
Drain	1×10^{-4}	0.34	0.07	0.100	3
Waste rocks (dike)	7×10^{-4}	0.42	0.1	0.011	2.9
Lorraine tailings	1×10^{-6}	0.41	0.13	0.004	2.1
Silt	3×10^{-8}	0.38	0.05	0.001	1.7
Sand	8×10^{-5}	0.36	0.03	0.030	4
Sand and gravel	9×10^{-4}	0.33	0.07	0.080	2.5

4.5.3 Boundary conditions and initial conditions

The TSF foundation is composed of a compacted till on top of the bedrock that can be considered as impermeable (Nastev and Aubertin, 2000); therefore, an impermeable boundary condition was applied at the base of the numerical model. A pressure head of 0 m was applied at the exit of the drain and the water table was fixed at 10 cm below the surface ($H = 5.6$ m) to the north-east (right) boundary of the model ($X = 125$ m).

Initial conditions were determined through a steady-state analysis with a 1.10^{-11} m.s⁻¹ constant infiltration rate at the surface and a water table fixed at $H = 5$ m and $H = 5.6$ m on the left and right boundaries of the model respectively. The results of this steady-state analysis accurately represented the hydrogeological conditions observed in situ after spring snowmelt; i.e., a slightly desaturated cover close to the dike and a full saturated cover with a piezometric level 10 cm below the surface at the north (right) part of the site. From these initial conditions, simulations were performed using a transient state with LCI boundary conditions for the historical climate, climate scenarios and drought events conditions.

4.5.3.1 Historical climate data

Historical climate data were obtained from Environment and Climate Change Canada's meteorological station at Earlton airport which is located 75 km north-west of the Lorraine mine site (Fig.4.1). This meteorological station is the closest to the Lorraine site that possessed all of the surface observations needed for this study. Less than 1 % of data were missing for two variables (relative humidity and wind speed). A linear interpolation was performed when relative humidity data were missing, and missing wind speed data were infilled with a value of 0 m.s⁻¹ as wind speed does not have a linear behavior. After this data treatment, a complete data set from 2001 to 2003 with daily precipitation rate, mean temperature, wind speed and relative humidity was produced (Fig.4.5). Observation data of daily solar radiation which depends on the presence or the absence of clouds were not available and were estimated in this study with the approximation provided by SEEP/W based on the latitude of the site (47.7°). The albedo was defined at 0.2 corresponding to a rocky soil or soil with low vegetation (Musy, 2005).

4.5.3.2 Climate scenarios

Climate models use representative concentration pathways (RCP; Moss et al., 2010) scenario (i.e., radiative forcing scenarios) to produce climate simulations. Nine climate models were selected and used RCP 4.5 and RCP 8.5 (i.e., radiative forcing by 2100 equals to 4.5 and 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively). These two RCP allow a good scatter representation with a decline then a stabilization (RCP 4.5) or a continuous increase (RCP 8.5) in radiative forcing. Bias correction using observations was performed on climate simulations to provide climate scenarios adapted to the studied site (Bresson, 2019). Among the eighteen climate scenarios available for this study, three were selected to represent the worst, the median and the more advantageous cases for a CCBE (cf. section 5.2). These climate scenarios were produced by IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM and GFDL-ESM2G models (Fig.4.5 and Table 4.4), referred to as IPSL, MIROC and GFDL respectively in this article, and used the RCP 8.5. The IPSL scenario is expected to be the worst case for this study with a combination of a high increase of temperatures ($+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ on average) and low increase in annual precipitation ($+0.7\%$). GFDL is considered a median climate scenario, with a temperature increase of $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and an increase of annual precipitation of 26.1% . The MIROC scenario presents the most advantageous climate scenario, with temperature and precipitation increasing by $+9.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+51.1\%$, respectively. Three years of these climate scenarios, from 2098 to 2100, were applied to the numerical simulations and were chosen to be representative of the 2100 horizon climate scenarios. Daily data were used in the simulations. The other parameters used in the simulations (i.e., relative humidity, wind speed, solar radiation, and albedo) are presented in Hotton (2019).

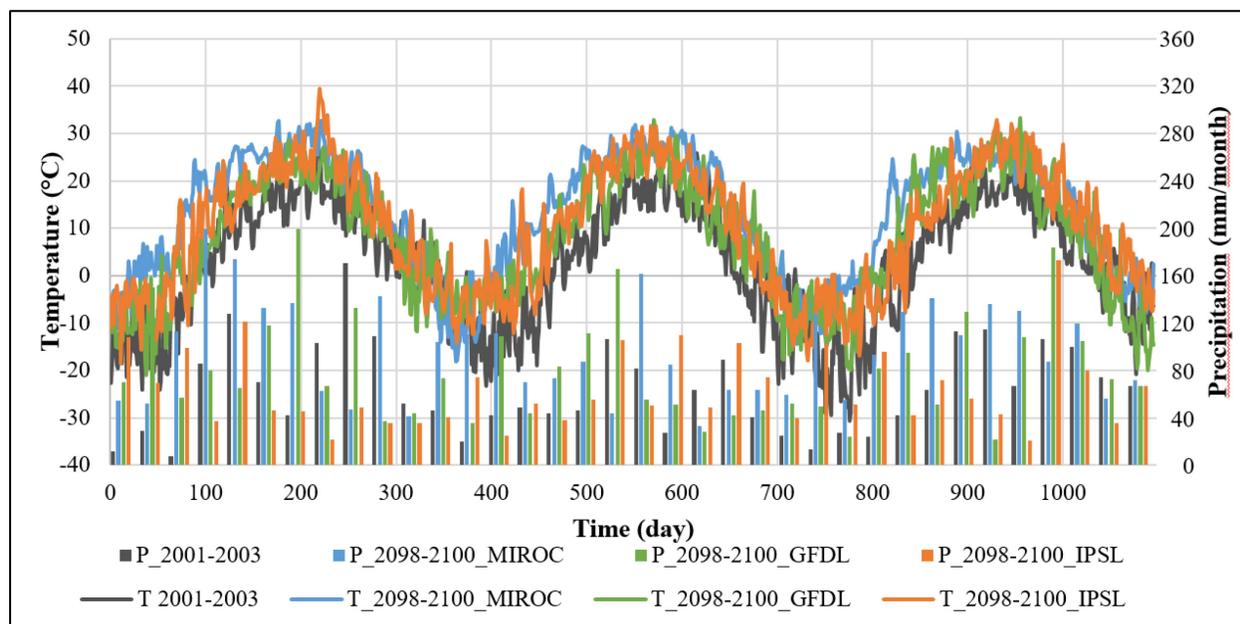


Figure 4.5: Evolution of temperature and precipitation from 2001 to 2003 for historical climate and from 2098 to 2100 for the three climate scenarios used in the numerical simulations

Tableau 4.4: Summary of the climate scenarios used in the numerical simulations with relative increases in precipitation and temperature between the historical period (2001 – 2003) and projections (2098 – 2100). ΔT and ΔPr indicate the relative changes in temperature and precipitation, respectively, and RCP indicates the representative concentration pathway

Climate scenario	ΔT (°C)	ΔPr (%)	RCP	Meteorological Institute	Reference
MIROC-ESM	9.9	51.1	8.5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Watanabe et al. (2011)
GFDL-ESM2G	5.1	26.1	8.5	NOAA-GFDL Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Dunne et al. (2012, 2013)
IPSL-CM5A-MR	7.0	0.7	8.5	Institut Pierre Simon Laplace (France)	Dufresne et al. (2013)

4.5.3.3 Drought event conditions

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) defines a drought as, “A period of abnormally dry weather long enough to cause a serious hydrological imbalance.” (IPCC, 2014a, 2014b). Although, a multitude of approaches exist to predict extreme drought conditions

(Alexander et al., 2006; Tebaldi et al., 2006; Vicente-Serrano et al., 2010), none have specifically been developed for applications in the mining sector. In this study, an original methodological approach is proposed to integrate extreme drought conditions for the Lorraine CCBE. More specifically, extreme drought conditions were applied to the numerical simulations of the Lorraine CCBE to determine their impacts on the phreatic surface and the degree of saturation in the MRL and to assess the cover's resilience to the extreme conditions that are expected to become more frequent in the future (Guay et al., 2015).

The duration and the intensity of future extreme drought events was selected based on the works of Alexander et al. (2006), Tebaldi et al. (2006), and Hennessy et al. (1999). A future drought event was defined, based on the relative change in projected drought properties using the IPSL climate scenario. The relative change was calculated between historical period (1981 – 2010) and future period (2071 – 2100) and was applied to the more drastic drought historically observed at the Lorraine site. Three steps were followed to determine the more extreme drought based on observation data between 1953 and 2018 from the Earlton airport station:

1. Selection of the periods with daily average temperatures above 5 °C to avoid the frozen period during when the oxygen diffusion is negligible (Nyameogo et al., 2018);
2. Calculation of the duration of drought events (d) considering the number of consecutive days with daily precipitation below 1 mm;
3. Calculation of the cumulative precipitation before the identified drought periods (CPBD) over 30 days.

For the Lorraine mine site, the longest historical drought occurred in May 1999 and lasted for 42 days and the minimal historical CPBD was 3 mm in April 1958. The relative changes in terms of duration and CPBD at horizon 2100 were calculated comparing historical and future droughts events projected by IPSL scenario. The same three steps presented previously were followed to determine the maximal duration and the minimal CPBD of droughts projected by IPSL scenario. Increases of about 22 % for the maximal drought duration and about 50 % for the minimal CPBD were projected. Thus, the future extreme drought event applied to the numerical simulations was characterized by a duration of 51 days and a CPBD of 6 mm. These conditions of droughts were then applied to precipitation time series of the simulation with the

IPSL climate scenario for the 2098 – 2100 period (Fig. 4.6). Temperatures, relative humidity, wind speed, solar radiation, and albedo during the drought even were not modified.

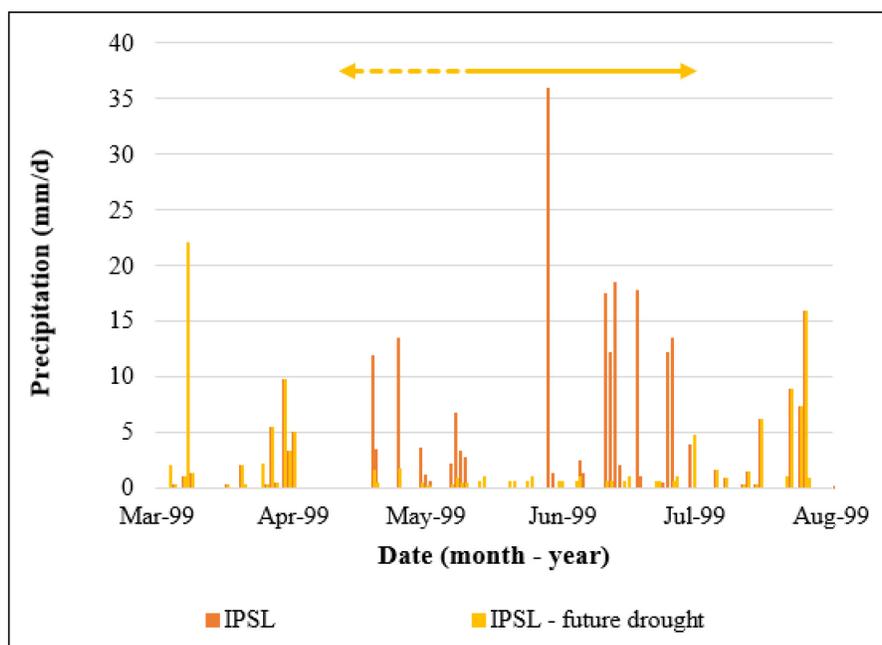


Figure 4.6: Precipitation levels used to simulate drought events for the period between 2098 and 2100 with the IPSL climate scenario. The yellow double arrow represents the duration of the drought event with the coarse dashed portion associated to the 30 days of CPBD and the solid line portion representing the future drought duration (51 days)

For CCBE design in the Québec context, previous studies used numerical modeling to simulate extreme droughts that were defined as two-month periods without precipitation applied after wet conditions similar to the spring melt; in these conditions. Using these conditions, the MRL was at its maximal degree of saturation before the application of the drought (Ricard et al. 1997; Bussière et al. 2003; Broda et al., 2014). An additional simulation was performed to compare the new drought approach developed in this study (using the 51 days of drought and a CPBD of 6 mm) with the previous one (two months without precipitation in July and August 2002). Table 4.5 summarizes the main characteristics of climate data and drought events used in the different numerical simulations.

Tableau 4.5: Summary of the main characteristics of drought events applied in the numerical simulations. CPBD is the cumulative precipitation before drought

Simulation	Simulated period	Drought characteristics		
		Period	CPBD (mm)	Duration (d)
Historical data	2001 – 2003	August 2002	82.6	11
IPSL climate scenario	2098 – 2100	May 2099	48.3	18
Historical climate scenario + 2-month drought	2001 – 2003	July – August 2002	102.9	60
IPSL climate scenario + future drought	2098 – 2100	April – May 2099	6.0	51

4.6 Transient simulation results

4.6.1 Numerical model validation

The numerical model was validated by comparing field measurements with simulated data for the 2001 – 2003 period. Piezometer measurements at PO6 (located near the dike; Fig. 4.2a) from 2001 to 2003 were compared with simulated piezometric heads at the same location (Fig. 4.7). General trends in the seasonal hydraulic head variations were reproduced well by the model; the winter and summer hydraulic head decreases, as well as the spring and fall head increases are all captured in the model. Measured heads varied between 95.63 and 96.35 masl during the summer (May - November), simulated values were between 94.90 and 96.43 masl during the same period. The determination coefficient (R^2) was 0.54 and the root mean square error (RMSE) was 0.16 m (Fig. 4.8), which is within the typical calibration target for hydraulic heads (i.e., 15 % of the measured hydraulic heads range, or 0.24 m in this case; ASTM 2008). As frozen periods are not critical regarding the control of water and oxygen migration through the CCBE thanks to the frozen soil, the numerical model is considered representative even if there is no observed hydraulic head data available for winter periods.

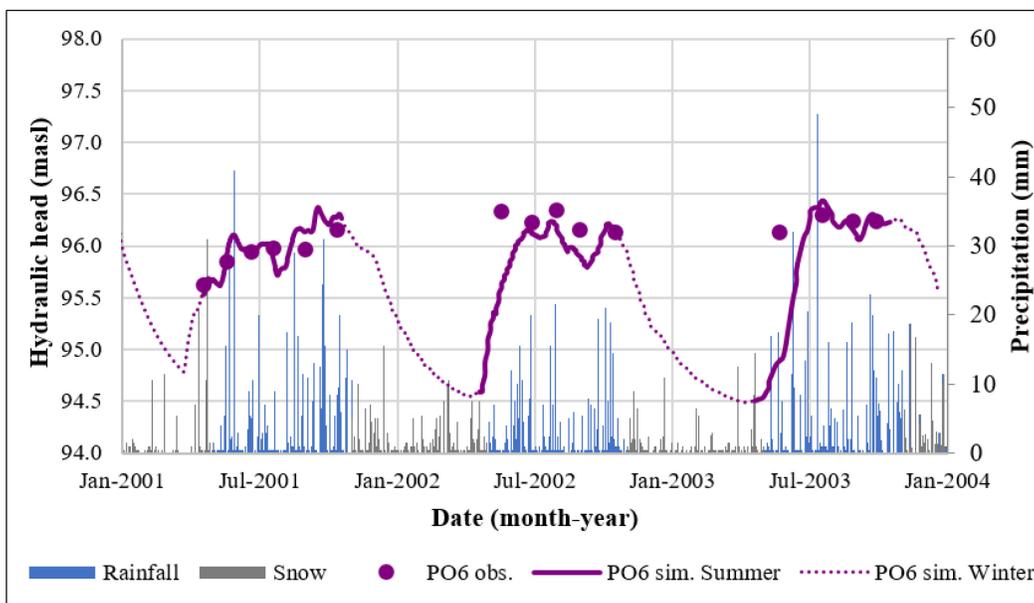


Figure 4.7: Observed (obs.) and simulated (sim.) piezometric heads at the PO6 observation well between January 2001 and January 2004. Precipitation (rainfall and snow) observed at Earlton airport station from January 2001 to December 2003 is also shown

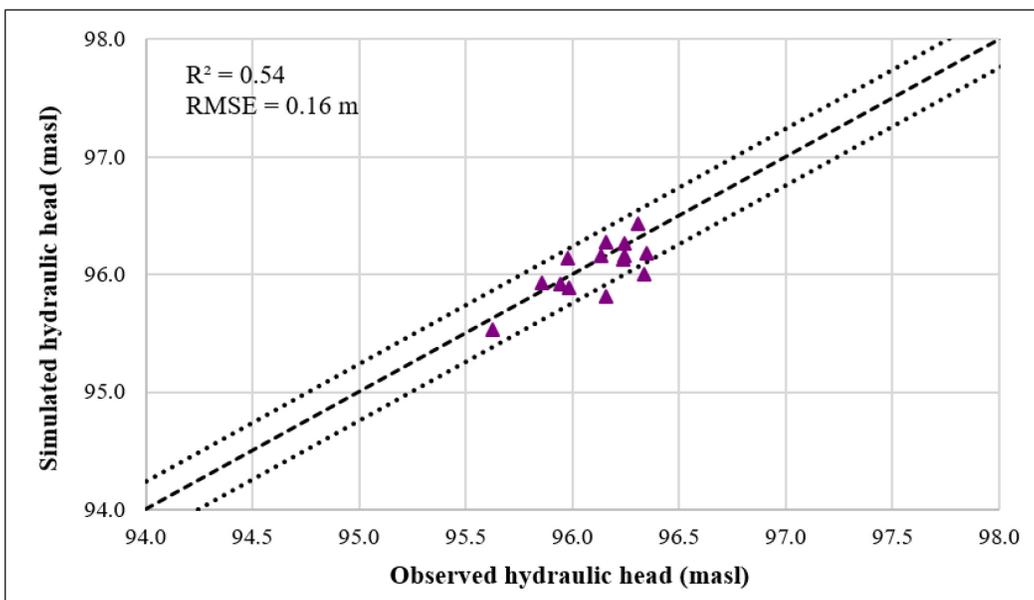


Figure 4.8: Simulated vs. observed hydraulic head at the PO6 observation well during the 2001 – 2003 period. The determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) are indicated. The dashed line indicates a 1:1 slope and the dotted lines represent the envelop related to calibration target for hydraulic heads (± 0.24 m)

Simulated volumetric water content (θ) values were in the same range and followed the same trends as field measurements (Fig 4.9). The seasonal variations were reproduced well. The lowest saturation in the MRL occurred around February-March because of frozen precipitation (snow) during the winter months (from November to April). Similarly, the increase in saturation occurred around May because of snow melt in the spring and higher rainfall. Results were compared for the 2001 – 2003 period at level 2-1 in the MRL (i.e., 55 cm below the cover surface; see Fig. 4.2b) at stations B6, B7, and B8 (see Fig. 4.2a). Simulated water contents were within the sensors' error (± 0.03 , indicated in Fig 4.10; Soilmoisture, CA; Meter Group Inc.) except at station B8 where the simulation slightly overestimates the θ values during the summer. Measurements were above the typical performance criteria most of the time ($\theta > 0.32$ for a porosity of 0.38 for the B6 and B7 stations, and $\theta > 0.29$ for a porosity of 0.34 for the B8 station; i.e., $S_r > 85\%$; Aubertin et al., 1995; 2002). Considering that the numerical simulations were able to reproduce the variations in the hydraulic heads and θ values in the MRL fairly well for most of the stations, the model was deemed acceptable for predicting the hydrogeological response of the Lorraine CCBE to projected climate scenarios.

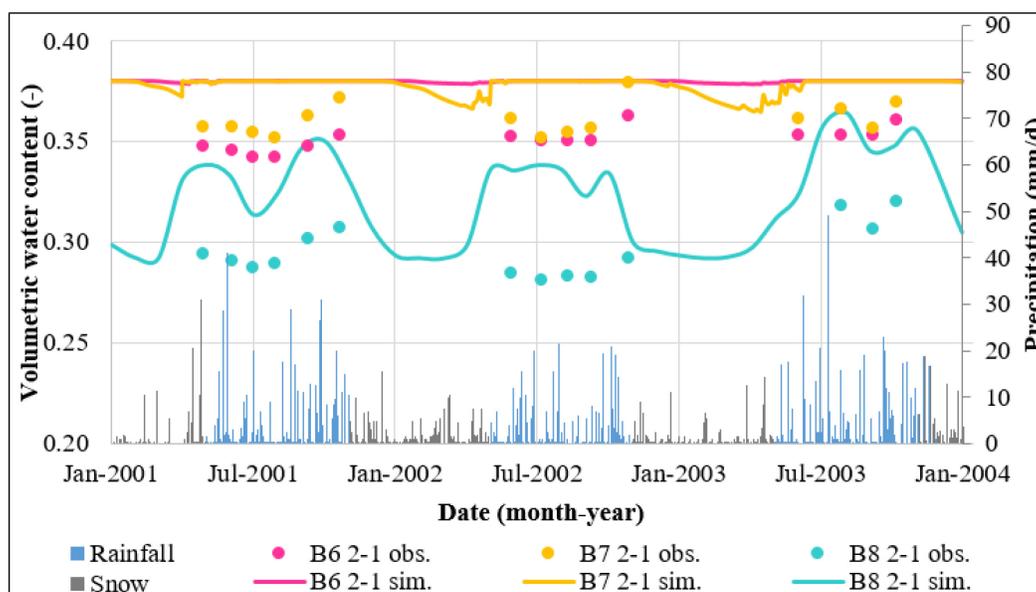


Figure 4.9: Observed (obs.) vs. simulated (sim.) volumetric water contents at level 2-1 in the MRL at the monitoring stations B6, B7 ($n = 0.38$), and B8 ($n = 0.34$) from January 2001 to December 2003. Precipitation (rainfall and snow) observed at Earlton airport station from January 2001 to December 2003 is also shown

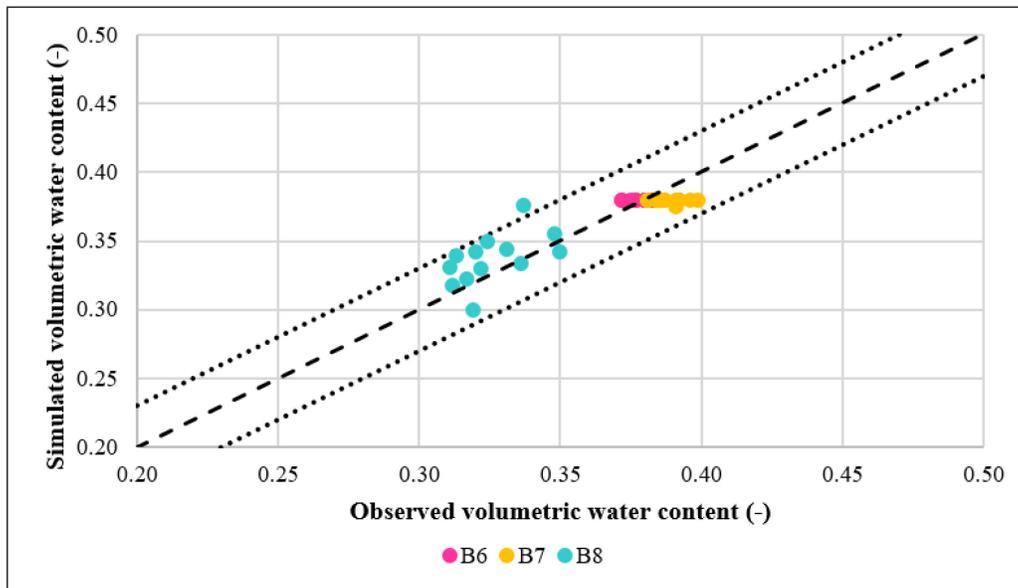


Figure 4.10: Simulated vs. observed volumetric contents at stations B6, B7, and B8 during the 2001 – 2003 period. The dashed line indicates a the 1:1 slope and the dotted lines represent the envelop related to the error of the volumetric water content measurements (± 0.03)

4.6.2 Climate change simulations

Simulated piezometric levels at PO6 presented the same trends for the three climate scenarios as for the simulation with historical climate data. The lowest levels occurred during winter because of frozen precipitation (snow), decreases in summer were associated with higher evaporation and peak levels in the spring were associated with snowmelt (Fig. 4.11). Slight differences in piezometric level variations occurred with the CC simulations with respect to the historical climate data. The MIROC climate scenario predicts an increase in the annual average piezometric level of about 19 cm and the GFDL scenario predicts similar variations. More significant changes were observed with the IPSL climate scenario which predicts a decrease of the annual average piezometric level of 14 cm in 2100 compared to the 2001 – 2003 period. The impacts of snowmelt in the spring occurred earlier with the three climate scenarios. The increasing piezometric levels occurred near the beginning of May for the historical climate data (days 480 and 850) while the same increases occurred at the end of March for the MIROC scenario, at the beginning of April for

the GFDL scenario, and at the end of April for the IPSL scenario. These results provide evidence for the shortening of the winter season with CC.

The differences in θ values between historical climate data and the different climate scenarios were relatively limited (average < 0.02 for stations B6 and B7, or a S_r of approximately 4 %; Fig. 4.12). The θ values simulated for the climate scenarios were always above the performance criteria ($\theta > 0.32$ for a porosity of 0.38 for the B6 and B7 stations, and $\theta > 0.29$ for a porosity of 0.34 for the B8 station). The volumetric water content for station B8 increased to values between 0.04 and 0.06 with the CC scenarios, which corresponds to an increase in S_r between 12 and 15 %. The CC simulations did not significantly affect the S_r in the MRL at stations B6 and B7. However, for station B8, S_r in the MRL increased by 15 % due to the increase in precipitation associated with the three climate scenarios.

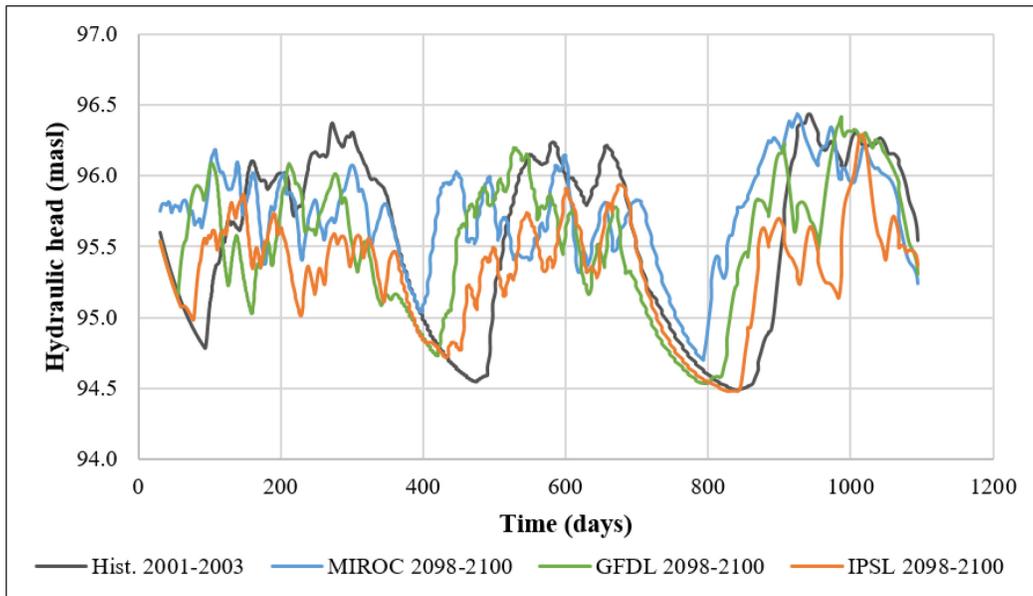


Figure 4.11: Piezometric level simulated for PO6 with historical climate from 2001 – 2003 vs three climate scenarios from 2098 – 2100

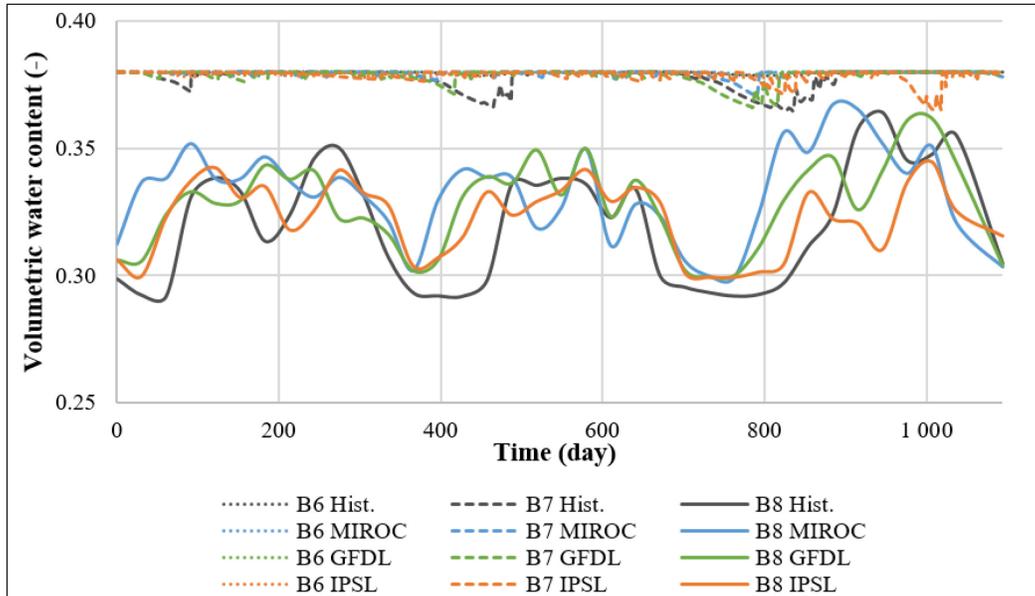


Figure 4.12: Variation in the simulated volumetric water content at level 2-1 in the MRL (55 cm below the cover surface) at stations B6, B7 ($n = 0.38$), and B8 ($n = 0.34$) for the historical climate data (2001 - 2003) and three climate scenarios (2098 - 2100)

4.6.3 Drought event simulations

For the drought simulations using the IPSL climate scenario, hydraulic heads were slightly lower during the dry period (Fig. 4.13a). The minimal simulated hydraulic head with the IPSL scenario was 95.06 masl during the drought event under normal conditions and 94.84 masl under future drought conditions. A first gap between the two climate scenarios was simulated when the CPBD was applied, with a piezometric level 42 cm lower with drought conditions, and the biggest gap occurred at the end of the dry period in June 2099 with a piezometric level about 60 cm lower with the drought conditions. However, the piezometric levels simulated for drought events quickly reached similar values as the reference scenario approximately 15 days after the dry period (Fig. 4.13a), thus showing that the system has a good capacity to recover from a drought event. Even if the piezometric level decreases with drought conditions and slight decreases in θ values are observed in the MRL, it remains very close to saturation and the performance criteria is reached ($\theta > 0.32$ for a porosity of 0.38 for station B7; Fig 4.13b) indicating that the capillary barrier effects are well developed in the CCBE.

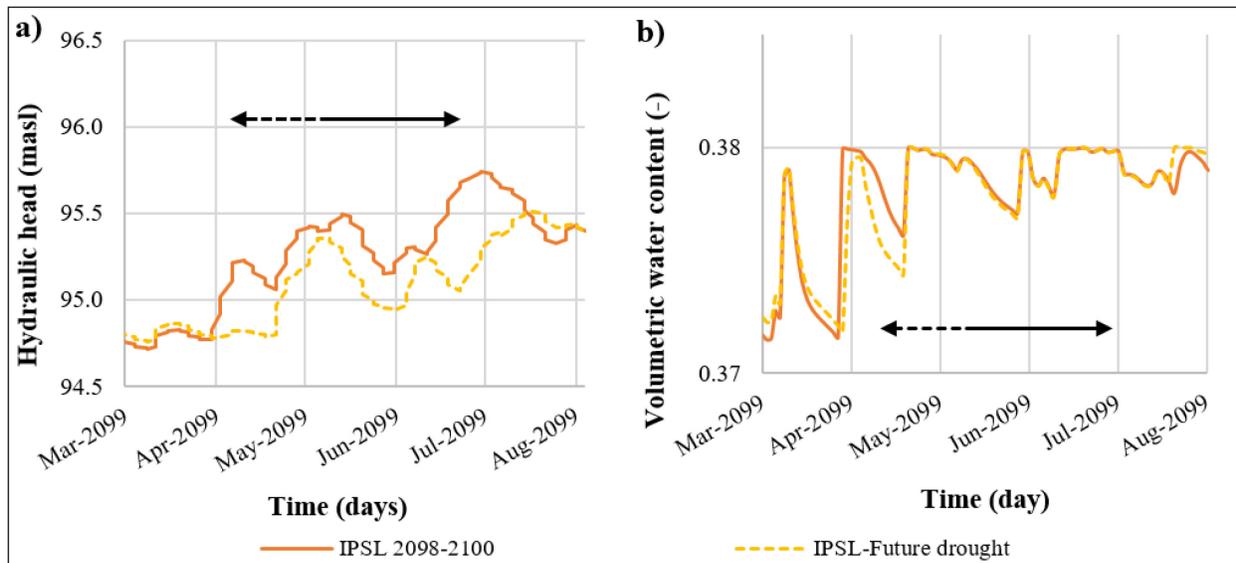


Figure 4.13: **a** Piezometric head at PO6 and **b** volumetric water contents at stations B7 in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated with future drought conditions applied on the IP SL climate scenario from 2098 to 2100. The black double arrow represents the duration of the drought event with the dashed portion indicating the 30 days of CPBD and the solid portion representing the future drought duration (51 days)

4.6.3.1 Previous vs. new drought criteria

Piezometric levels simulated at PO6 and volumetric water contents simulated at station B7 for 2002 are presented in Fig. 4.14 for comparison between the new drought approach developed in this study and the two-month drought approach used in prior studies. Then piezometric level decreased to lower values with the old approach than with the new drought approach, with minimal levels of 94.8 and 95.3 masl, respectively (Fig. 4.14a). The θ values in the MRL showed similar results; the minimal θ with the two-months without precipitation approach was 0.37 while it was around 0.38 with the new methodology (Fig. 4.14b). However, the differences in term of piezometric level and θ are relatively small (maximal $\Delta_H = 0.50$ m and $\Delta_\theta = 0.01$) and both parameters recover rapidly after droughts. These results indicate that the method used by the designer of the Lorraine CCBE to consider extreme drought events was more conservative than the new method proposed in this study.

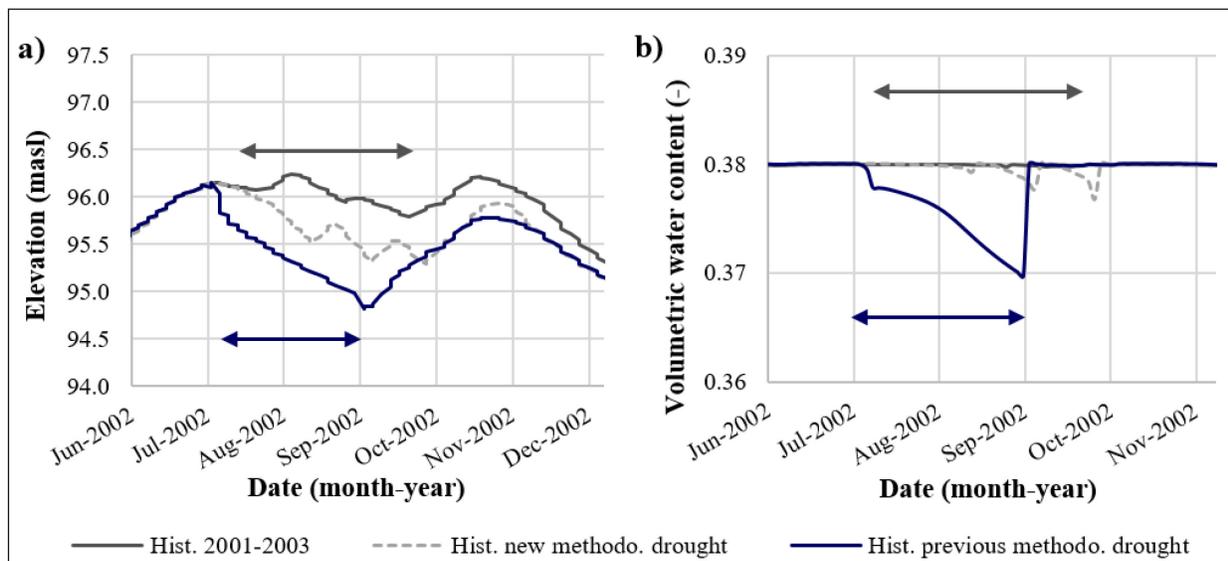


Figure 4.14: a Piezometric head at PO6 location and **b** volumetric water content at B7 station in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated for historical climate with new and previous drought methodologies. The double arrows represent duration of the drought event; the grey one for the new methodology (51 days + 30 days of CPBD) and the blue one for the previous methodology (60 days)

4.7 Discussion

Hydrogeological modeling is an effective tool to assess the performance of cover systems such as CCBE (Nastev and Aubertin, 2000; Broda et al., 2004). The results presented in this article show that a 2D numerical model is able to represent relatively precisely the hydrogeological behavior of the CCBE in the southern part of the Lorraine mine site, which is the most sensitive area in terms of cover performance due to the fairly deep water table. The cover system meets the performance criteria most of the time ($S_r > 85\%$). Climatic conditions were applied in these models as top boundary conditions and the influence of climate change and drought events (predicted by three different climatic models) on the CCBE's performance were assessed (in hydrogeological terms). Results showed that the cover system is robust even when CC and extreme drought conditions are applied. The influence of the CCBE's material properties with and without climate change and the selection and evolution of top boundary conditions are discussed in the following.

4.7.1 Influence of CCBE material properties

The results from this study indicate that the CC scenarios do not have a significant impact on the Lorraine CCBE with its actual design; however, the impact of CC on a CCBE made of materials having different hydrogeological properties has not been assessed. The contrast between the hydrogeological properties of the MRL and the two coarse-grained layers on either side is one of the most important parameters to create capillary barrier effects and maintain a high degree of saturation in the MRL (Akindunni et al. 1991; Morel-Seytoux, 1992). Properties such as the saturated hydraulic conductivity, permeability function, and WRC must be well defined due to their significant impacts on the hydrogeological behavior of the CCBE (Aubertin et al., 1996, Yanful et al., 2006, Pabst et al., 2018). In this study, the cover materials are assumed to be homogenous although, in reality, heterogeneities in the hydrogeological properties can occur on a relatively fine scale for a site of this size (Vick, 1983; Aubertin et al., 2002). It can, however, be difficult to integrate this aspect into numerical models (Dagenais, 2005). Complementary modeling was performed to evaluate the effect of varying (considered realistic for the Lorraine case) the cover materials' k_{sat} , k_u and WRCs on the performance following climate change. More specifically, alternative materials were simulated with a k_{sat} of $9.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ with an AEV of 1 m of water for the alternative sand, and a k_{sat} of $5.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ with an AEV of 2 m of water for the alternative silt (Fig. 4.15).

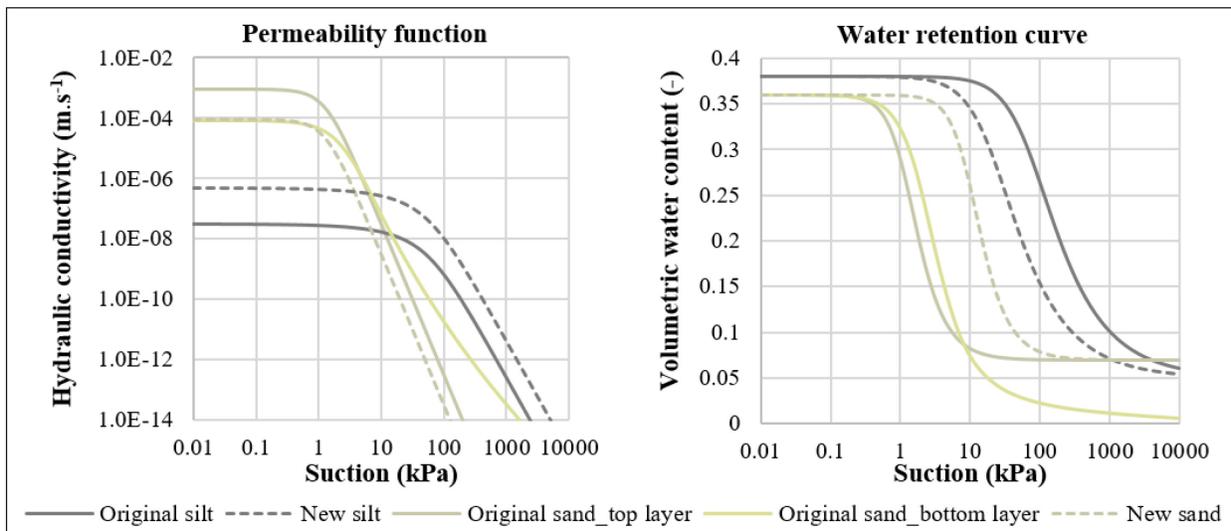


Figure 4.15: Permeability functions and WRCs of original (solid lines) and alternative (dotted lines) materials used in the numerical simulations

The results of numerical models with historical data and CC scenarios indicate that the CCBE performance with the alternative materials is impacted and confirm the well-known importance of the hydrogeological contrast between the existing MRL and CBL layers at the Lorraine site. However, predicted θ values with these alternative materials decreased below 0.32 at the bottom of the silt layer at station B7 meaning that the S_r values in the MRL can be lower than the performance target of 85 % ($\theta < 0.32$ for a porosity of 0.38 for station B7; Fig. 4.16). The θ values for the IPSL scenario for the future period (2098 – 2100) were higher than the θ for the historical climate data (2001 – 2003) meaning that applying CC scenarios to the model does not affect the performance of this theoretical (less efficient) CCBE. The CCBE performance will not change significantly even if precipitation and temperature will increase in the future.

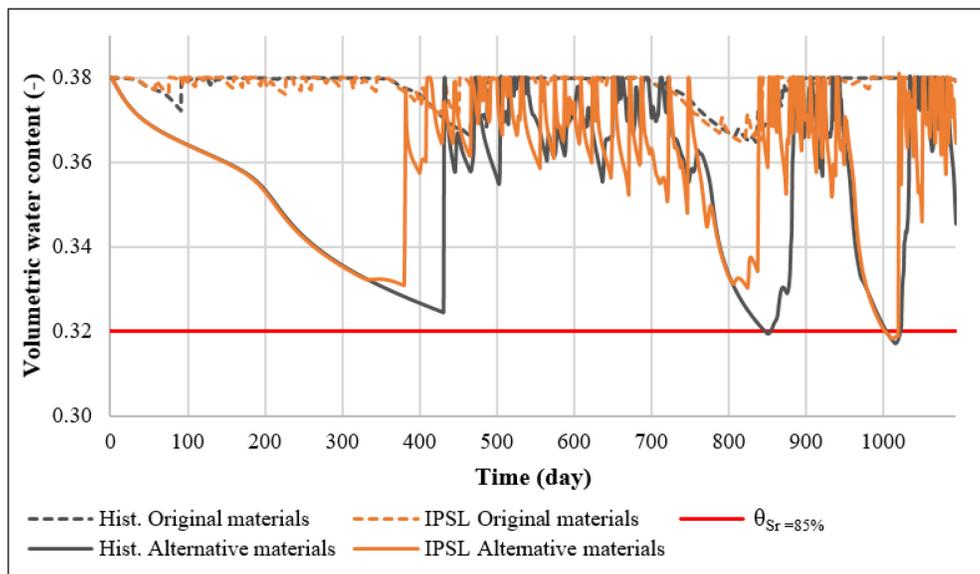


Figure 4.16: Volumetric water contents at station B7 in the MRL (level 2-1; $n = 0.38$) simulated with original and alternative materials for the historical period (2001 – 2003) and future period (2098 – 2100) with the ISPL scenario. $\theta_{S_r=85\%}$ represents the θ for a degree of saturation of 85 %

4.7.2 Influence of surface boundary conditions

Reclamation covers are engineered structures that are site-specific and depend primarily upon climate/water balance factors (MEND, 2011). Four potential impacts of climate change relevant to AMD generation and control in many Canadian mining operations were identified by the Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND, 2011): (i) increase in average temperatures, (ii) change in mean annual precipitation, (iii) increase in the frequency and intensity of extreme

weather events, and (iv) permafrost degradation. The magnitude and nature of these changes and impacts may vary across regions and the projected impacts are also influenced by the selected climate scenario (NRCan, 2008).

A wide range of climatic variations from different climate scenarios were used in this study, however, there are a multitude of climate models that can lead to different hydrogeological behaviors in the Lorraine CCBE (Bresson, 2019). The initial selection of climate models for this study filtered models to include only those with all parameters and temporal series needed for the simulations in SEEP/W. This resulted in a selection of nine climate models which were associated with RCP 4.5 and RCP 8.5 (Fig. 4.17). The objective was to select two extreme scenarios and one median scenario in terms of relative temperature and precipitation changes to assess the full range of possibilities in a sensitivity framework. Fig. 4.17 presents range in the different climate scenarios in terms of future changes of temperature (ΔT) and precipitation (ΔPr); ΔT varied from 1.4 to 9.9 °C and ΔPr varied from 0.7 % to 52.7%. Most of the scenarios were included between $\Delta T = 3.2$ to 7.1°C and $\Delta Pr = 12.9$ to 42.8 % in terms of relative changes in temperature and precipitation, respectively. However, this study shows that, because of the materials used at the Lorraine site, the CCBE is robust against CC and the selection of one scenario instead of the others would not have changed the prediction in terms of the cover's ability to control AMD generation.

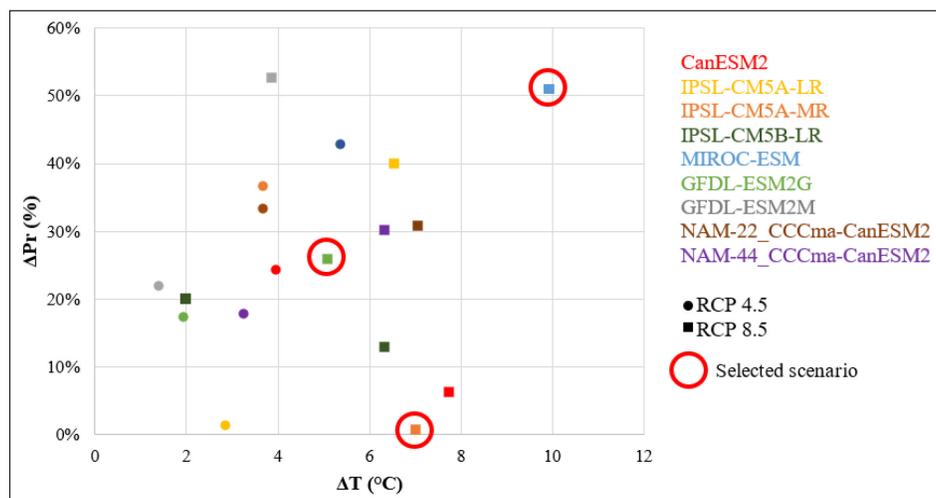


Figure 4.17: Increasing of temperature vs increasing of precipitation with respect to historical data (2001 – 2003) and future climate change data (2098 – 2100) for different climate scenarios at the Lorraine mine site. Red circles correspond to the three climate scenarios selected for the numerical simulations in this study

Another parameter that must be considered is vegetation, which can influence the top boundary condition. In this study, the Penman-Wilson method (Wilson et al., 1994) and an albedo for a rocky soil or a soil with low vegetation (Musy, 2005) were used instead of the Penman-Monteith method (Monteith, 1981), which calculates the potential evaporation for vegetated soils where transpiration is dominant compared to evaporation. The use of the Penman-Wilson equation was justified for the period between 2001 and 2003, i.e., the years used to validate the numerical model. However, as vegetation has started to colonize the northern part of the Lorraine site (Smirnova et al., 2011), complementary numerical analyses would be necessary to develop a better understanding of the long-term impact of vegetation on the hydrogeological behavior of the Lorraine mine site.

4.8 Conclusions and recommendations

The Lorraine mine site was reclaimed with a CCBE in 1999 using the average historical precipitation rate as a surface boundary condition in the design. In this study, a 2D numerical model was developed (based on field and laboratory data) using SEEP/W to assess the hydrogeological behavior of the Lorraine CCBE. The model was validated by comparing simulations results with field measurements for transient state conditions over three-year periods of historical climate data (January 2001 to December 2003). Variations in the simulated hydraulic heads and volumetric water content values were consistent with field data (RMSE = 0.16 m, i.e., < 15 % of the measured hydraulic heads' range).

Three different climate scenarios (IPSL, MIROC, and GFDL) and two types of drought events were applied to the numerical model to assess the impact of future climatic conditions on the CCBE's performance. The simulations performed with the ISPL scenario, which was associated with a low increase in precipitation (+0.7 %) and a high increase in temperature (+7 °C), indicated that the piezometric level could decrease by an average annual value of 14 cm in 2100. Furthermore, an 82 cm decrease is expected for a drought lasting 51 days associated to a 6 mm cumulative precipitation over the 30-day period preceding the dry period. Despite this drop in phreatic level due to extreme drought, no significant changes were observed in the capacity of the CCBE to maintain its MRL close to saturation.

Simulation results with homogenous materials hydrogeological properties suggest that the CCBE built at the Lorraine mine site is robust for present and future climates, as well as in the case of

extreme drought events are. The capillary barrier effects are effective under all conditions, which keep S_r of the MRL above 85 % at all times. However, predictions showed that the cover was less effective when theoretical sand and silt layers with a lower contrast in unsaturated hydrogeological properties were used. Specific attention on quality control during construction is important since the material properties directly affect the presence of capillary barrier effects that are essential to the performance of the CCBE to control oxygen migration into the reactive tailings under the cover.

Numerical simulations of hydrogeological behavior are important to assess mine site reclamation techniques to limit AMD generation. Since these infrastructures must be effective for hundreds of years, it is essential to systematically integrate climate change and extreme climatic events into their design. Additionally, since a reclamation cover is site-specific, local climate scenarios and specific drought conditions must be considered in their design. However, the numerical simulations performed in this study were specific to the Lorraine CCBE. Further research should be conducted to develop a more general methodological approach that integrates CC and future extreme climatic conditions for any sites. Furthermore, in the context of mine site reclamation, it would be beneficial to integrate vegetation and its evolution with CC into long-term numerical simulations to assess the impact of this parameter on the CCBE hydrogeological behavior.

4.9 Acknowledgements

This work was funded by the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) and the Research Institute on Mines and the Environment (RIME) UQAT-Polytechnique. The authors would like to thank also the Ministry of Energy and Natural Resources of Quebec (MERN), and Ouranos Inc. for their support. We also acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling, which is responsible for CMIP, and we thank the climate modeling groups for producing and making their model output available. The U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison provided coordinating support and led the development of software infrastructure for CMIP in partnership with the Global Organization for Earth System Science Portals. Gary Schudel is warmly thanked for helping to improve the manuscript.

4.10 References

- Aachib M (1997) Étude en laboratoire de la performance de barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA. Doctoral Thesis, Department of Civil, Geological and Mining Engineering, École Polytechnique de Montréal, QC, Canada
- Alam MS, Barbour SL, Elshorbagy A, Huang M (2018) The Impact of Climate Change on the Water Balance of Oil Sands Reclamation Covers and Natural Soil Profiles. *J. Hydrometeorol.* 19(11): 1731-1752, doi.org/10.1175/JHM-D-17-0230.1
- Alexander LV, Zhang ., Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Tank AK, ... Tagipour, A (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res-Atmos.* 111(D5), doi.org/10.1029/2005JD006290
- Akindunni FF, Gillham RW, Nicholson RV (1991) Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Can. Geotech. J.* 28:446–451, doi.org/10.1139/t91-054
- ASTM Standard D2487 (2007) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International
- ASTM (2008) Standard guide for calibrating a groundwater flow model application D5981–96(2008). American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, 6 pp
- Aubertin M (1996) Recouvrement multicouche pour le parc à résidus du site minier Lorraine. Report submitted to MRNQ (SDM-R-96-23), 30 pp
- Aubertin M, Chapuis R, Aachib M, Bussière B, Ricard J, Tremblay L (1995) Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. École Polytechnique de Montréal, QC, Canada, NEDEM/MEND Projet 2.22.2a, 199 pp. <http://www.mend-nedem.org>. Accessed December 2018
- Aubertin M, Bussière B, Aachib M, Chapuis RP, Crespo JR (1996) Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1:3-13
- Aubertin M, Bussière B, Monzon M, Joanes AM, Gagnon D, Barbera J.M, Aachib M, Bédard C, Chapuis RP, Bernier L (1999) Étude sur les barrières sèches construites à partir des résidus

miniers. Phase II, Essais en place. Rapport de Recherche, Projet CDT P1899.NEDEM/MEND 2.22.2c.

Aubertin M, Bussière B, Bernier L (2002) Environnement et gestion des résidus miniers [CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechnique de Montréal, QC, Canada.

Aubertin M, Cifuentes E, Apithy S, Bussière B, Molson J, Chapuis RP (2009) Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Can. Geotech. J.* 46(10): 1146-1164, doi.org/10.1139/T09-050

Aubertin M, Bussière B, Pabst T, James M, Mbonimpa M (2016) Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. *Geo-Chicago 2016*, pp 343-358, doi.org/10.1061/9780784480137.034

Bernier L (1996) Rapport d'analyses minéralogiques sur 7 échantillons de résidus miniers, Mine Lorraine, Témiscamingue, Québec. Géoberex Recherche, 14 pp

Bresson É, Demers I, Roy P, Pabst T, Chavaillaz Y (2018) Efficiency of reclamation methods under climate change: definition of a drought index. 18th International Conference on Tailings and Mine Waste, Keystone, Colorado, USA

Bresson É (2019- in progress) Projection et indices climatiques pour les sites de Lorraine, Doyon-Westwood et Canadian Malartic. FRQNT Project

Broda S, Aubertin M, Blessent D, Maqsood A, Bussière B (2014) Simulating the variation of the phreatic surface level to assess reclamation techniques for an acidic tailings impoundment - A fieldscale study. *GeoRegina 2014: 67th CGS Conference*, Regina, SK, Canada. 7 pp

Bussière B, Aubertin M, Julien M (2001) Couvertures avec effets de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide, aspects théoriques et pratiques. *Vecteur Environnement* 34(3):37-50

Bussière B, Aubertin M, Chapuis RP (2003) The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Can. Geotech. J.* 40(3): 512-535, doi: 10.1139/T03-001

Bussière B, Benzaazoua M, Aubertin M, Mbonimpa M (2004) A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environ. Geol.* 45(5):609-622, doi.org/10.1007/s00254-003-0919-6

- Bussière B, Maqsoud A, Aubertin M, Matschuk J, McMullen J, Julien M (2006) Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Québec. *CIM Bull.*, 1(6):1–11
- Bussière B, Aubertin M, Mbonimpa M, Molson R, Chapuis R (2007) Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behavior of oxygen barriers made of silty materials: *Can. Geotech. J.* 44(3):245, doi:10.1139/T06-120
- Bussière B, Potvin R, Dagenais AM, Aubertin M, Maqsoud A, Cyr J (2009) Restauration du site minier Lorraine, Latulipe, Québec: Résultats de 10 ans de suivi. *Déchets Sci. Et Tech.* 54:49-64
- Bussière B, Demers I, Charron P, Bossé B, Roy P, Jébrak M, Trépanier S (2017) Analyse de risque et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Report submitted to MERN, 106 pp
- Dagenais AM (2005) Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires. Doctoral Thesis, Department of Civil, Geological and Mining Engineering,  cole Polytechnique de Montréal, QC, Canada. 394 pp
- Dagenais AM, Aubertin M, Bussière B, Bernier L, Cyr J (2001) Monitoring at the Lorraine mine site: a follow up on the remediation plan. Paper presented at the 2001 National Association of Abandoned Mine Land Programs Annual Conference: Land Reborn: Tolls for the 21st Century, Athens, Ohio, Proceedings on CD-Rom
- Dagenais AM, Aubertin M, Bussière B, Cyr J (2005) Performance of the Lorraine mine site cover to limit oxygen migration. Proceedings of the SME Annual Meeting, February 28-March 2 2005, Salt Lake City, UT
- Desjarlais C, Allard M, Bélanger D, Blondlot A, Bouffard A, Bourque A, Chaumont D, Gosselin P, Houle D, Larriv e C, Lease N, Pham AT, Roy R, Savard JP, Turcotte R, Villeneuve C (2010) *Savoir s’adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 128 pp
- Dufresne JL, Foujols MA, Denvil S, Caubel A, Marti O, Aumont O, Balkanski Y, Bekki S, Bellenger H, Benschila R, Bony S, Bopp L, Braconnot P, Brockmann P, Cadule P, Cheruy F, Codron F, Cozic A, Cugnet D, de Noblet N, Duvel JP, Eth  C, Fairhead L, Fichet T, Flavoni S, Friedlingstein P, Grandpeix JY, Guez L, Guilyardi E, Hauglustaine D, Hourdin

- F, Idelkadi A, Ghattas J, Joussaume S, Kageyama M, Krinner G, Labetoulle S, Lahellec S, Lefebvre MP, Lefevre F, Levy C, Li ZX, Lloyd J, Lott F, Madec G, Mancip M, Marchand M, Masson S, Meurdesoif Y, Mignot J, Musat I, Parouty S, Polcher J, Rio C, Schulz M, Swingedouw D, Szopa S, Talandier C, Terray P, Viovy N, Vuichard N (2013) Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40(9-10): 2123-2165, doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1
- Dunne JP, John JG, Adcroft AJ, Griffies SM, Hallberg RW, Shevliakova E, Stouffer RJ, Cooke W, Dunne KA, Harrison MJ, Krasting JP, Malyshev SL, Milly PC, Phillipps PJ, Sentman LT, Samuels BL, Spelman MJ, Winton M, Wittenberg AT, Zadeh N (2012) GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Climate* 25: 6646–6665, doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- Dunne JP, John JG, Shevliakova E, Stouffer RJ, Krasting JP, Malyshev SL, Milly PC, Phillipps PJ, Sentman LT, Adcroft AJ, Cooke W, Dunne KA, Griffies SM, Hallberg RW, Harrison MJ, Levy H, Wittenberg AT, Phillips PJ, Zadeh N (2013) GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Climate* 26: 2247–2267, doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00150.1
- Entraco Inc. (1996) Conception d'un programme de restauration du site minier Lorraine. Rapport final 70 pp
- Ethier MP, Bussière B, Broda S, Aubertin M (2018) Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeol. J.* 26(4):1201-1219, <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1713-y>
- Fabre C (2008) Remise à jour de l'instrumentation d'un site minier réhabilité: Site Lorraine, Latulipe, Québec. Rapport de stage, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, France
- Ford J, Pearce T, Prno J, Duerden F, Ford LB, Beaumier M, Smith T (2010) Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector. *Reg. Environ. Change* 10(1): 65-81, doi.org/10.1007/s10113-009-0094-8

- Geo-Slope International Ltd. (2015) Seepage modelling with SEEP/W, an engineering methodology. Copyright 2004-2015. Geo-Slope Ltd. Calgary, AB, Canada
- Geo-Slope International Ltd. (2017) Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018. Calgary, AB, Canada
- Guay C, Minville M, Braun, M (2015) A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. *Can. Water. Resour. J.* 40(3):285-302, doi.org/10.1080/07011784.2015.1043583
- Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM (1999) "Australian Rainfall Changes, 1910-1995." *Aust. Meteorol. Mag.* 48 (1): 1–13
- Hilhorst MA, Dirksen C (1994) Dielectric water content sensors: time domain versus frequency domain. In *Time domain reflectometry in environmental, infrastructure, and mining applications*, KM O'Connor et al.(eds.). US Dept. Interior Bureau of Mines, Northwestern Univ., Evanston, Illinois, pp 23-33
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535pp, doi.org/10.1017/CBO9781107415324
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014a) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University

Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp, doi.org/10.1017/CBO9781107415379

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014b) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp, doi.org/10.1017/CBO9781107415386

Jambor JL (1994) Chapter 3, Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. In Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. Edited by DW Blowes and JL Jambor

Jolette D (2001) Travaux effectués au site minier Lorraine. Rapport de travaux de terrain. Chaire Industrielle CRSNG-Polytechnique-UQAT, 13p

Kalonji-Kabambi A, Bussière B, Demers I (2017) Hydrogeological Behavior of Covers with Capillary Barrier Effects Made of Mining Materials. *Geotech. Geol. Eng.* 35(3):1199-1220, doi.org/10.1007/s10706-017-0174-3

Lavergne C (1985) Gîtes minéraux à tonnage évalué et production minérale du Québec. Ministère de l'énergie et des ressources. DV 85-08, 76 pp

Maqsood A, Bussière B (2008) Mise à jour de l'instrumentation du site Lorraine. Report of URSTM submitted to MRNF, 12 pp

Maqsood A, Bussière B, Aubertin M, Cyr J (2012) Transient hydrogeological behavior of the Lorraine CCBE (Québec, Canada). GESRIM 2012: International Congress on the Management of the Mining Wastes and Closed Mines, 3-6 avril 2012, Marrakech, Morocco

Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) (2001) Manual report 5.4.2, vols 1–6. CANMET, Ottawa

- Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) (2011) Climate Change and Acid Rock Drainage –Risks for the Canadian Mining Sector. Mine Environment Neutral Drainage (MEND), Mining Association of Canada MEND Report 1.61.7.
- Monteith JL (1981) Evaporation and surface temperature. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 107:1-27, doi.org/10.1002/qj.49710745102
- Morel-Seytoux HJ (1992) L'effet de barrière capillaire à l'interface de deux couches de sol aux propriétés fort contrastées. *Hydrol. Continent* 7:117–128
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi ., Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weynant JP, Wilbanks T. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282): 747-756, doi:10.1038/nature08823
- Mualem Y (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res* 12(3):513-522, doi.org/10.1029/WR012i003p00513
- Musy A (2005) Cours Hydrologie générale - Chapitre 4: Evaporation et interception. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire d'écohydrologie ECHO. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre4/chapitre4.html>. Accessed February 2019
- Nastev M, Aubertin M (2000) Hydrogeological modelling for the reclamation work at the Lorraine mine site Québec. 53rd Canadian Geotechnical Conference and 1st joint IAHCNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Montreal, QC, Canada, pp 311-318
- Natural Resources Canada (NRCan) (2008), From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007. Ottawa, ON: Government of Canada
- Nicholson RV, Gillham RWM, Cherry JA, Reardon EJ (1989) Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Can. Geotech. J.* 26:1-8, doi.org/10.1139/t89-001
- Nordstrom DK (2000) Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters. *Internat. Geol. Rev.* 42: 499-515, doi.org/10.1080/00206810009465095

- Nyameogo GFT, Mbonimpa M, Bussière B, Awoh AS (2018) Influence of frozen conditions on the oxygen diffusion coefficient in unsaturated porous materials. *Acta Geotech.* 1-13, doi.org/10.1007/s11440-018-0690-1
- O'Kane M, Wilson GW, Barbour L (1998) Instrumentation and monitoring of a engineered soil cover system for mine waste rock. *Can. Geotech. J.* 35:828-845, doi.org/10.1139/t98-051
- Pabst T (2011) Étude expérimentale et numérique du comportement hydro- géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés. Doctoral Thesis, Department of Civil, Geological and Mining Engineering, École Polytechnique de Montréal, QC, Canada
- Pabst T, Aubertin M, Bussière B, Molson J (2017) Experimental and numerical evaluation of single-layer covers placed on acid-generating tailings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4):1421-1438, doi.org/10.1007/s10706-017-0185-0
- Pabst T, Bussière B, Aubertin M, Molson J (2018) Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydro-geochemical assessment. *J. Contam. Hydrol.* 214:39-53, doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.05.006
- Pearce T, Ford JD, Prno J, Duerden F (2009) Climate change and Canadian mining: opportunities for adaptation. Report prepared for the David Suzuki Foundation, 1-50
- Pearce TD, Ford JD, Prno J, Duerden F, Pittman J, Beaumier M, Smit B (2010) Climate change and mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(3): 347-368, doi.org/10.1007/s11027-010-9269-3
- Ricard JF, Aubertin M, Firlotte FW, Knapp R, McMullen J (1997) Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, QC. 4th ICARD, Vancouver, May 31–June 6, 1997, pp 1515–1530
- Robinson M, Dean TJ (1993) Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrol. Process.* 7(1):77-86, doi.org/10.1002/hyp.3360070108
- Shock CC, Barnum JM, Seddigh M (1998) Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. Proc. Int. Irrig. Show, San Diego California USA

- Shock CC, Wang FX, Flock R, Feibert E, Shock CA, Pereira A (2013). Irrigation monitoring using soil water tension. Sustainable agriculture techniques, EM 8900, revised march 2013. Oregon State University.
- Smirnova E, Bussière B, Tremblay F, Bergeron, Y (2011) Vegetation Succession and Impacts of Biointrusion on Covers Used to Limit Acid Mine Drainage. *J. Environ. Qual.* 40(1):133-143, doi:10.2134/jeq2010.0051
- SRK (Steffen Robertson and Kirsten) (1989) Draft acid rock technical guide. BC AMD Task Force, SRK, Vancouver
- Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster JM, Meehl GA (2006) Going to the extremes. *Climatic change*, 79(3-4):185-211, doi.org/10.1007/s10584-006-9051-4
- van Genuchten MT (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(5):892-898, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Vardon PJ (2015) Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review. *Environmental Geotechnics*, 2(3):166-174, doi.org/10.1680/envgeo.13.00055
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno J I (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate* 23(7):1696-1718, doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1
- Vick, S.G. (1983). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. John Wiley & Sons.
- Watanabe S, Hajima T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, Nozawa T, Kawase H, Abe M, Yokohata T, Ise T, Sato H, Kato E, Takata K, Emori S, Kawamiya M (2011) MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.* 4(4):845, doi:10.5194/gmd-4-845-2011
- Weeks B, Wilson GW (2005) Variations in moisture content for a soil cover over a 10 year period. *Can. Geotech. J.* 42:1615–1630, doi: 10.1139/T05-070
- White I, Zegelin S J, Wilson LG (1995) Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, pp 343-385

- Wilson GW (1990) Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Wilson GW, Fredlund DG, Barbour SL (1994) Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Can. Geotechn. J.* 31(2):151-161, doi.org/10.1139/t94-021
- Yanful EK (1993) Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *J. Geotech. Eng-ASCE* 119(8):1207-1228, doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:8(1207)
- Yanful EK, Simms PH, Payant SC (1999) Soil covers for controlling acid generation in mine tailing, a laboratory evaluation of the physics and geochemistry. *Water Air Soil Pol.* 114:347-375, doi.org/10.1023/A:1005187613503
- Yanful EK, Mousavi SM, De Souza LP (2006) A numerical study of soil cover performance. *J. Environ. Manage.* 81(1):72-92, doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.10.006

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Plusieurs aspects n'ont pu être abordés dans les précédents chapitres, principalement en lien avec la méthodologie de la modélisation numérique et d'autres facteurs pouvant avoir un impact sur la performance de la CEBC. Dans ce qui suit, une discussion est présentée concernant plus spécifiquement deux composantes susceptibles d'influencer la modélisation du comportement hydrogéologique de la CEBC de Lorraine :

- L'effet de la géométrie du modèle numérique;
- L'impact de la végétation.

5.1 Influence de la géométrie du modèle numérique

Les modélisations numériques 2D du comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine effectuées dans cette étude ont été réalisées à l'aide du logiciel SEEP/W. Elles ont permis d'intégrer six paramètres climatiques (température, précipitations, vitesse du vent, humidité relative, albédo et rayonnement solaire) dans la condition frontière de surface LCI. Cependant, afin de prendre en compte ces conditions climatiques et de réaliser des modélisations ayant des temps de calculs raisonnables, seuls les 125 premiers mètres au sud du parc ont été simulés dans le chapitre précédent. Cependant, un premier modèle, défini avec les dimensions réelles du site Lorraine, a initialement été construit. Les simulations effectuées en utilisant la fonction LCI des différents scénarios climatiques pour ce modèle présentaient des temps de calcul de l'ordre de plusieurs jours et n'atteignaient généralement pas la convergence malgré la réduction du maillage, l'adaptation du pas de temps et l'ajustement des paramètres de convergence (nombre d'itérations; différence maximale de pression, égalité du nombre de chiffres significatifs).

Afin de s'assurer de la validité du modèle réduit, une analyse paramétrique basée sur une approche similaire à celle utilisée par Dagenais (2005) a été effectuée à partir d'un modèle représentant la géométrie complète du site Lorraine. Les modélisations ont également permis de fixer l'élévation de la nappe à l'extrémité nord-est du modèle réduit.

5.1.1 Géométrie du modèle complet

Le premier modèle numérique 2D représentant la totalité de la section nord-sud du site Lorraine, situé le long du transect B, a initialement été construit à l'aide de SEEP/W (cf. ligne pointillée bleue de la figure 5.1) en se basant sur les mêmes informations utilisées pour le modèle réduit et présentées au chapitre 3 (section 3.2.1; Fontaine, 1999a; Nastev et Aubertin 2000; Dagenais 2005). La longueur du modèle complet représente la longueur réelle du parc à résidus du site Lorraine, soit 372 m depuis le pied de la digue au sud du site jusqu'à l'étang situé au nord-est (cf. figure 3.2).

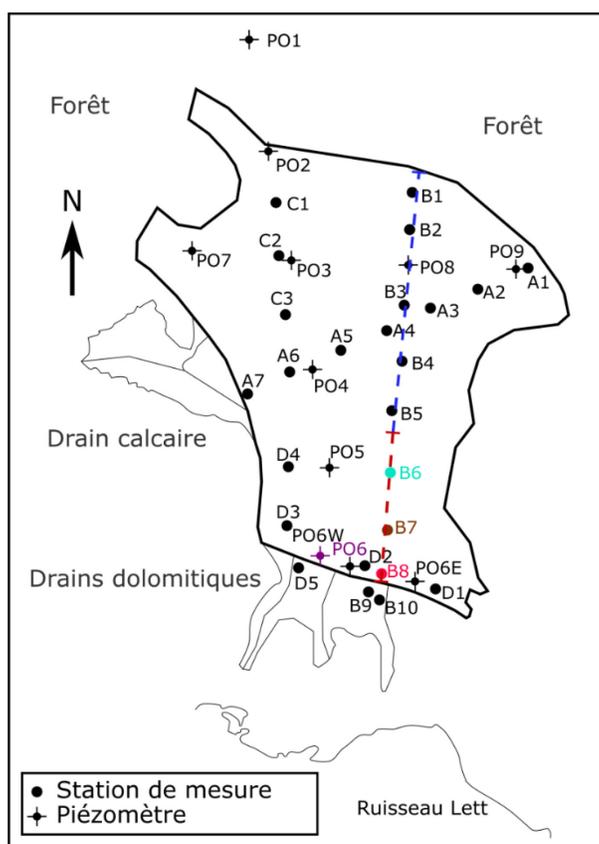


Figure 5.1 : Localisation des sections transversales utilisées pour les simulations numériques. La ligne en pointillés rouges représente la section du modèle 120 m et la ligne en pointillés bleus représente la section du modèle 372 m (adapté d'après Dagenais et al., 2001; Maqsoud et Bussière, 2008)

La figure 5.2 présente la géométrie du modèle proche de la digue (figure 5.2a) et dans la partie nord-est du parc (figure 5.2b). La géométrie au sud du site est identique à celle du modèle réduit, i.e., la digue est constituée de résidus grossiers, mesure 4 m de haut, 15 m de large à la base et 5 m

de large au sommet et le matériau du drain est situé du côté aval de la digue. La limite au nord-est du site présente quant à elle une géométrie différente avec la nappe phréatique qui affleure et la présence d'une petite étendue d'eau à la surface. La base du modèle se situe comme pour le modèle réduit à une élévation de 93,68 masl près de la digue tandis que la partie supérieure se situe à 100,88 masl ; une épaisseur maximale des résidus Lorraine de 2,0 m à l'extrémité nord-est du modèle a été fixée, basée sur les travaux de Dagenais (2005). Le maillage du modèle est constitué de 46 928 éléments quadrilatéraux et triangulaires avec une densité d'éléments plus importante dans les couches du recouvrement associé à une longueur des arêtes aux alentours de 15 cm afin d'améliorer la précision des simulations dans cette zone critique.

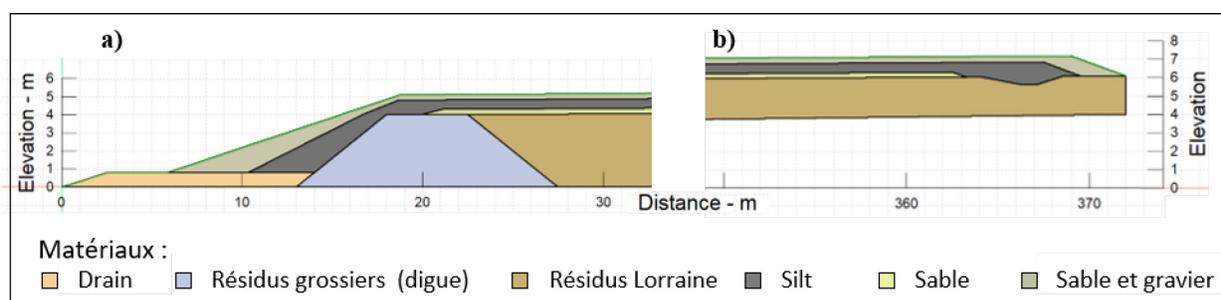


Figure 5.2 : Modèle numérique de la longueur totale de la CEBC du site Lorraine avec **a** le secteur de la digue au sud du site et **b** la limite nord-est du recouvrement

Les propriétés des matériaux et les paramètres de convergence sont identiques à ceux appliqués au modèle réduit (cf. chapitre 3, sections 3.2.2 et 3.3.3). Les conditions initiales et frontières sont quant à elles différentes.

5.1.2 Conditions initiales et frontières du modèle de taille complète

Comme pour le modèle réduit, une analyse en régime permanent a tout d'abord été effectuée afin d'obtenir les conditions initiales des simulations en régime transitoire en appliquant à la surface du modèle un taux initial de précipitation constant et égal à $1.10^{-11} \text{m.s}^{-1}$. La même condition d'imperméabilité a été appliquée à la base du modèle, de même que la charge totale égale à 0 m à la sortie du drain afin de simuler l'effluent final. Les conditions aux frontières au nord-est du modèle différent du modèle réduit et correspondent aux conditions représentant l'étendue d'eau présente sur le site, soit une charge totale de 5,5 m appliquée sur la partie émergée (figure 5.3). Les conditions frontières en surface sont également différentes de celles appliquées sur le modèle réduit. En effet, la LCI ne pouvant être appliquée en raison du temps de calcul trop long,

l'utilisation de taux d'infiltration a ici été choisie; cette approche a été utilisée dans de précédentes études au site Lorraine (Nastev et Aubertin, 2000; Dagenais, 2005).

Les taux d'infiltration ont été calculés selon l'approche présentée ci-dessous, développée pour le site minier Manitou (Leblanc, Richelieu Hydrogéologie Inc., communication personnelle 2018). Les données journalières de température et de précipitations (pluie et neige) entre 2001 et 2003 ont été utilisées pour estimer l'infiltration (INF; équations 5.1 et 5.2) et l'évapotranspiration (EVT; équations 5.3 à 5.5). La recharge nette (RN) a ensuite été calculée à partir des valeurs de INF et EVT (équations 5.6 et 5.7).

$$\text{Si } T > 0^{\circ}\text{C}; \quad \text{INF} = ((N_{\text{sol}(j-1)} - N_{\text{sol}(j)}) / 2 + P) / 2,25 \text{ (mm)} \quad (5.1)$$

$$\text{Si } T < 0^{\circ}\text{C}; \quad \text{INF} = 0 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$\text{Si } T > 10^{\circ}\text{C}; \quad \text{EVT} = 2 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$\text{Si } T > 15^{\circ}\text{C}; \quad \text{EVT} = 4 \text{ mm} \quad (5.4)$$

$$\text{Si } T < 10^{\circ}\text{C}; \quad \text{EVT} = 0 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$\text{Si } \text{INF} - \text{EVT} < 0; \quad \text{RN} = 0 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$$\text{Si } \text{INF} - \text{EVT} > 0; \quad \text{RN} = \text{INF} - \text{EVT} \text{ (mm)} \quad (5.7)$$

Avec T la température de l'air en °C; $N_{\text{sol}(j-1)}$ l'épaisseur de neige au sol en cm pour le jour j-1; $N_{\text{sol}(j)}$ l'épaisseur de neige au sol en cm pour le jour j; P les précipitations sous forme de pluie en mm, la valeur 2,25 est utilisée comme facteur de correction pour le ruissellement.

Ainsi, selon cette méthode, le taux d'infiltration pour la période 2001-2003 est d'environ 200 mm/an, correspondant à 22 % des précipitations totales observées. Ce taux d'infiltration se retrouve dans la plage de valeur utilisée dans les travaux de Nastev et Aubertin (2000) pour la conception de la CEBC du site Lorraine (310 mm/an pour des résidus non-couverts, 110 mm/an pour des résidus couverts). Comme on le verra dans la section suivante, cette valeur de 22% sera variée dans les simulations numériques afin de voir son influence sur le comportement hydrogéologique du site.

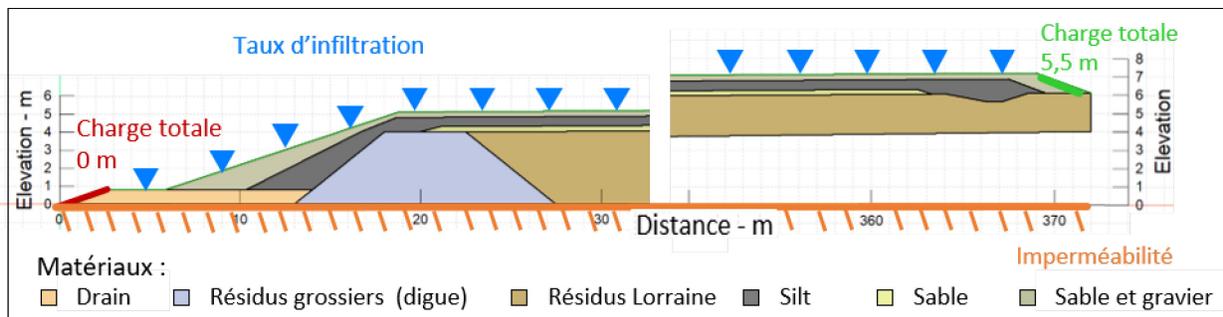


Figure 5.3 : Conditions aux frontières appliquées au modèle numérique en régime transitoire sur le modèle complet de la CEBC du site Lorraine

5.1.3 Analyse paramétrique de la condition de surface

A partir des conditions initiales précédemment décrites, plusieurs simulations en régime transitoire ont été effectuées sur le modèle de taille complète afin d'étudier le comportement hydrogéologique du recouvrement au nord du site (au-delà des 125 premiers mètres). Trois taux d'infiltration ont été appliqués au modèle comme condition de surface afin d'évaluer leurs impacts sur le niveau piézométrique. Les précipitations historiques entre 2001 et 2003 ont été utilisées comme flux d'eau en condition de surface avec trois taux d'infiltration différents : 12,5 % ; 22 %, 50 %.

Les niveaux piézométriques simulés à $X = 125\text{m}$ du modèle complet indiquent que le niveau phréatique se stabilise après la première année et reste proche de la surface en tout temps avec les trois taux d'infiltration testés (figure 5.4). Pour la dernière année simulée, les trois niveaux piézométriques simulés se trouvent compris entre la surface ($Y = 5.74\text{ m}$) et 0,30 m sous la surface avec une moyenne pour la période estivale (entre mai et octobre 2003) autour de 0,10 m sous la surface du recouvrement. Cette faible variabilité des conditions au-delà des 125 premiers mètres du modèle de taille complète a permis de définir la position de la nappe phréatique pour l'extrémité nord-est du modèle de taille réduite. Ainsi, une valeur de 10 cm sous la surface du recouvrement a été choisie (voir Chapitre 4).

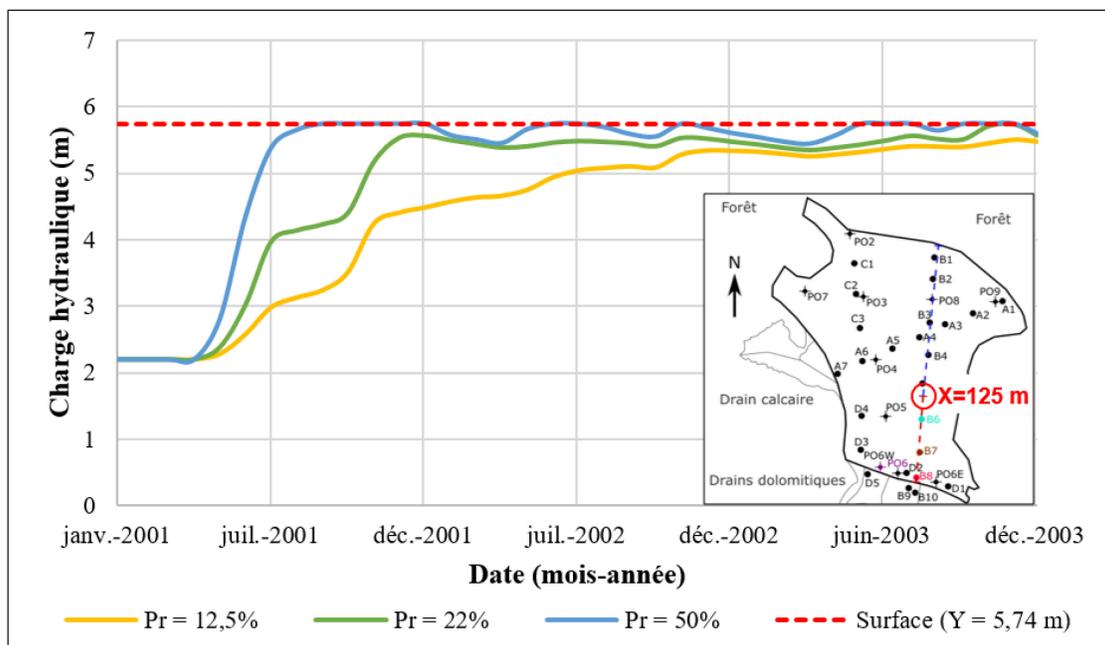


Figure 5.4 : Variations du niveau piézométrique à $X = 125\text{m}$ pour les modélisations du modèle complet de la CEBC de Lorraine avec différents taux de précipitations en condition frontière de surface. La localisation de la simulation ($X = 125\text{m}$) est indiquée sur la figure en bas à droite

5.2 Influence de la végétation

La végétalisation d'un site minier fait partie intégrante des étapes de restauration pendant ou après son exploitation. Au Québec, la directive 019 (MELCC, 2012) et le Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des miniers au Québec (MERN, 2017) encadrent la procédure de restauration et définissent les objectifs de la végétalisation. Selon cette réglementation, les travaux de végétalisation contribuent à atteindre l'état satisfaisant de la restauration d'un site minier en permettant l'obtention d'un état visuel acceptable et en intégrant le site restauré dans le paysage. Toutes les aires d'accumulation du site doivent ainsi être végétalisées : haldes à stériles, parcs à résidus, ouvrages de retenue, routes, etc. Sur un recouvrement de type CEBC, comme celui implanté sur le site Lorraine, la revégétalisation n'a pas été assistée et la végétation s'est établie par colonisation naturelle des plantes provenant de la forêt adjacente. Cependant, plusieurs études indiquent que la présence de végétation influence le bilan hydrique des recouvrements (Waugh, 2001; Smirnova et al., 2011; Guittonny et al. 2018). Sur le site Lorraine, les travaux de Smirnova et al. (2011) ont démontré le développement de la végétation sur le recouvrement et ont mis en

évidence l'impact possible des bio-intrusions sur la performance à long terme de la CEBC. L'impact de la colonisation racinaire est également étudié dans les travaux de Guittonny et al. (2018) qui indiquent que les racines des plantes absorbent directement l'eau du sol, perdue par transpiration, et qu'elles peuvent également modifier les propriétés des matériaux en produisant de la matière organique et en créant des biopores; ces modifications pourraient affecter le degré de saturation et modifier la capacité de stockage de l'eau des recouvrements.

Malgré la connaissance de ces phénomènes, les modèles numériques simulant le comportement hydrogéologique des recouvrements prennent peu en compte l'influence de la végétation (Guittonny et al., 2018). Une modélisation numérique préliminaire a donc ici été effectuée afin d'évaluer l'impact d'un couvert végétal théorique sur le modèle de la CEBC de Lorraine. Une modélisation numérique a été effectuée sur les trois années du scénario climatique futur IPSL afin d'évaluer l'impact de la végétation pour la période future (2098 – 2100).

5.2.1 Sélection et propriétés de la végétation

Le site Lorraine se situe dans la zone du bouclier boréal qui s'étend du nord de la Saskatchewan jusqu'à Terre-Neuve avec une forêt principalement fermée comprenant des épinettes noires et blanches, du sapin baumier et du mélèze du côté des conifères, et du peuplier faux-tremble, du peuplier baumier et du bouleau blanc du côté des feuillus (figure 5.5; Peckham et al., 2008). Un seul jeu de données de végétation ne pouvant être appliqué à la simulation, il a ici été choisi de prendre en considération les paramètres d'une seule espèce végétale. La sélection d'une espèce de feuillus par rapport à une espèce de conifère s'est basée sur le critère de l'évapotranspiration qui est plus importante pour les feuillus. En effet, l'évapotranspiration est évaluée au Canada à 500 mm/an pour une forêt de feuillus, tandis qu'elle est de 300 mm/an pour une forêt de conifères (Li et al., 2013). De plus, les travaux de Guittonny et al. (2016) ont démontré que les feuillus représentent 86 à 88 % des espèces d'arbres et arbustes présents sur le site Lorraine. Un cas théorique et conceptuel d'une forêt mature composée d'une espèce de feuillus typique de la forêt boréale et que l'on retrouve sur le site Lorraine a ainsi été définie. Les travaux retrouvés dans la littérature sur ce type de végétation ont permis de sélectionner le peuplier baumier, *Populus balsamifera* comme l'espèce la plus représentative pour cette simulation (Peckham et al., 2008; Smirnova et al., 2011; Guittonny et al., 2016).

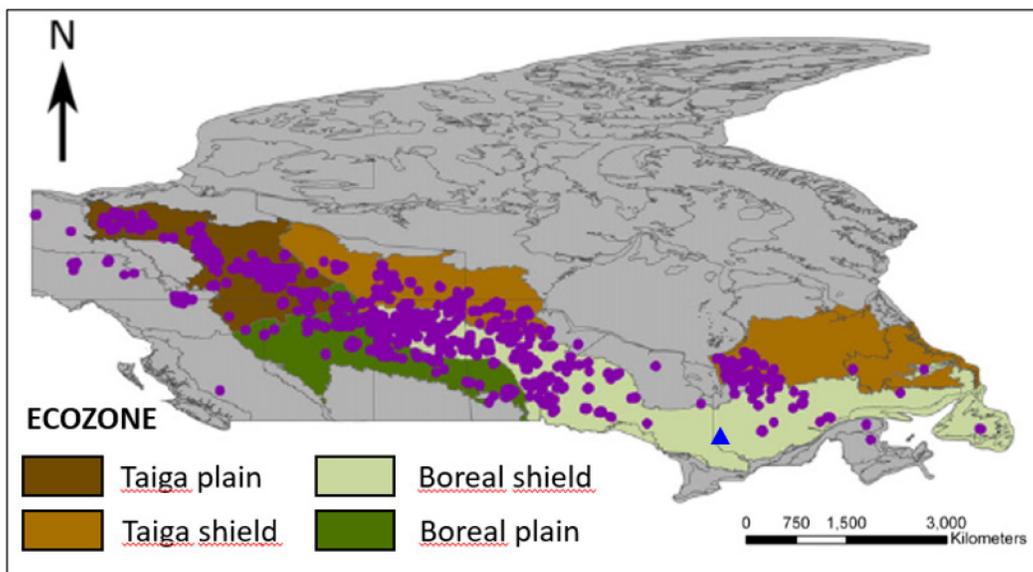


Figure 5.5 : Localisation du site Lorraine (triangle bleu) par rapport aux écozones terrestres canadiennes. Les contours des provinces canadiennes se superposent aux écozones qui apparaissent en couleurs autres que le gris. Les points violets correspondent aux échantillons de l'étude de Peckham et al. (2008)

Avec le logiciel SEEP/W, la condition aux frontières LCI permet de simuler l'absorption d'eau racinaire lorsque les paramètres de végétation suivants sont entrés dans le modèle : l'indice de surface foliaire (en anglais LAI pour leaf area index), le point de flétrissement, la profondeur des racines et la fraction du couvert végétal. La hauteur de la végétation doit également être définie afin de calculer l'évapotranspiration en appliquant la méthode de calcul de Penman-Monteith (Monteith, 1981) qui calcule l'évaporation potentielle pour des sols végétés.

- Détermination du LAI

Le LAI est une grandeur sans dimension, qui exprime la surface foliaire d'un arbre ou d'un peuplement par unité de surface de sol. Il est déterminé par le calcul de l'intégralité des surfaces des feuilles de la plante sur la surface de sol que couvre cette plante (Soudani et al., 2001). Plusieurs études sur les mesures de LAI de peuplements de feuillus en contexte de forêt boréale indiquent un intervalle de LAI compris entre 1 et 4 en fonction de la productivité du peuplement (Chen et al., 1997; Peckham et al., 2008). La valeur de LAI maximal a ici été défini à 2 ce qui correspond au LAI d'un peuplier faux-tremble moyennement productif (Chen et al., 1997); en considérant que le LAI de ce type d'arbre est similaire au peuplier baumier se développant sur un sol sableux comme

celui de la couche de protection de la CEBC du site Lorraine. En effet, la croissance aérienne des espèces ligneuses est limitée sur la CEBC de Lorraine (Guittony et al., 2016). Bien que la colonisation d'espèces ligneuses soit possible sur un substrat minéral, la croissance des arbres peut être limitée par la concentration en nutriments, en particulier l'azote (Bradshaw, 1983)

La saison de croissance des arbres feuillus pour le Témiscamingue, où se situe le site Lorraine, peut être définie comme commençant mi-mai et se terminant mi-novembre (Guittony, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, communication personnelle, 2019). À partir de ces informations, les variations du LAI en fonction du temps ont pu être tracées pour les trois années simulées dans la modélisation (figure 5.6).

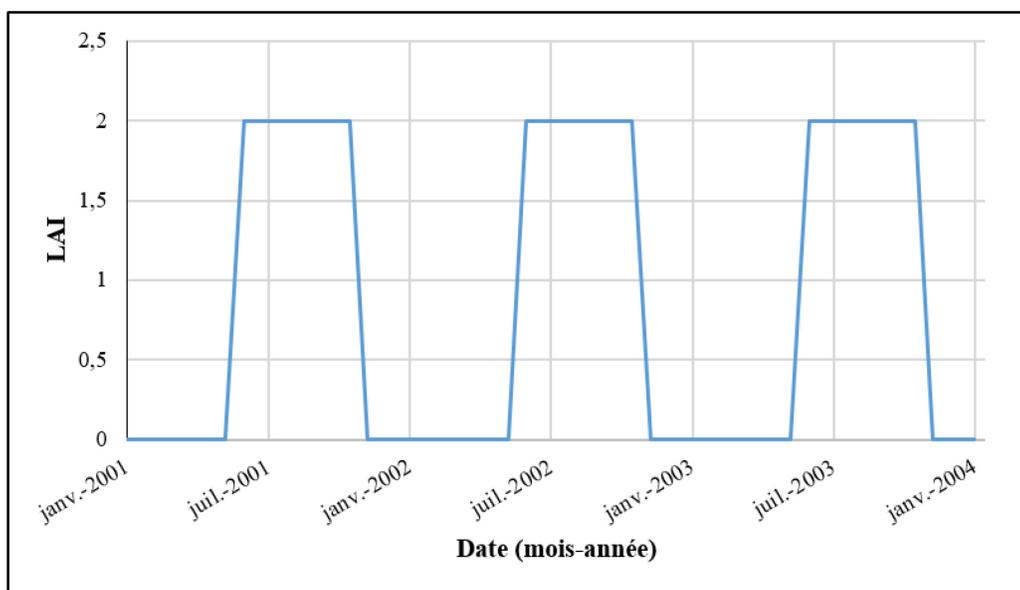


Figure 5.6 : Variations du LAI du peuplement de peupliers baumiers théorique appliquées à la simulation numérique avec végétation

- Détermination du point de flétrissement

Le point de flétrissement correspond au seuil en deçà duquel la plupart des plantes ne peuvent pas survivre plus longtemps à cause l'humidité limitée du sol (Brooks et al., 1991). La disponibilité de l'eau dans un sol est considérablement réduite à partir d'une succion matricielle (ψ) de -1500 kPa car les courants d'eau capillaire et les tensions superficielles des films d'eau autour des particules du sol sont perturbés; c'est à partir de cette valeur que la majorité des plantes commencent à se faner et qu'elle est donc référée comme point de flétrissement (Brooks et al, 1991; Lambers et al.,

2008). Dans SEEP/W, le point de flétrissement est associé à la fonction appelée « limite d'humidité des végétaux » (en anglais, plant moisture limiting function), qui détermine le pourcentage de diminution de la capacité des plantes à absorber l'eau quand la pression négative augmente dans le sol non saturé, doit être déterminée (Geo-Slope International Ltd., 2016; figure 5.7). La fonction présentée à la figure 5.7 est issue du manuel de Geo-Slope International Ltd. (2016).

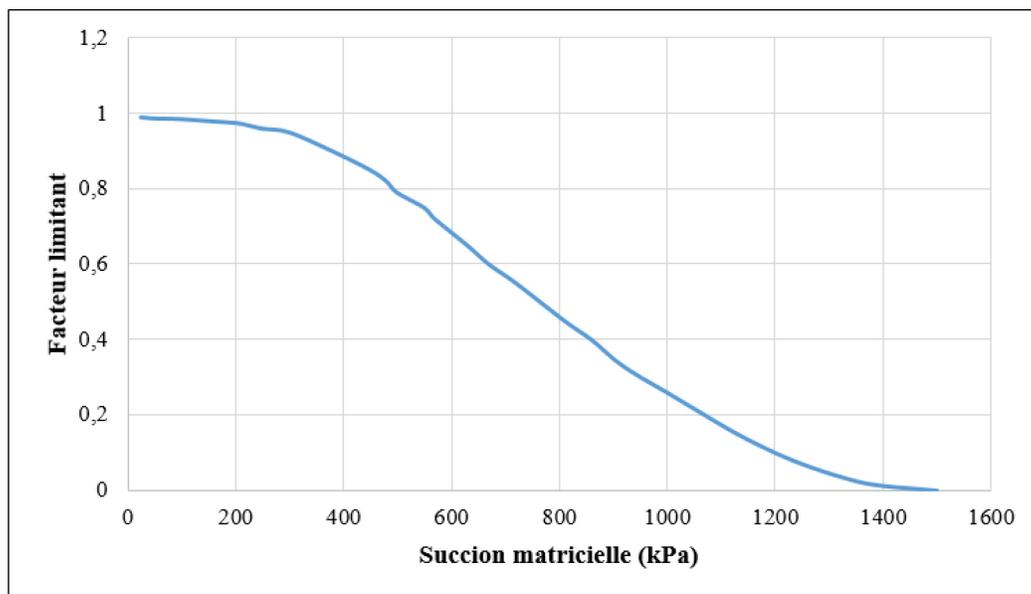


Figure 5.7 : Fonction de limite d'humidité du peuplement de peupliers baumiers théorique appliquées à la simulation numérique avec végétation. Adapté de Geo-Slope International Ltd. (2016)

- Détermination de la profondeur des racines

Dans les recouvrements de restauration minière tels que les CEBC, le développement racinaire est soumis à des contraintes particulières liées aux propriétés des matériaux (matériaux naturels ou miniers; Guittony et al., 2018). Pour le site Lorraine, la profondeur moyenne des racines des peupliers baumiers était de 0,4 m en 2008 (Smirnova et al., 2009, 2011). Pour limiter les risques d'endommagement de la CEBC, des travaux d'entretien ont été effectués en 2012 consistant à extraire les espèces ligneuses à la pelle mécanique (Guittony et al., 2016). Depuis ces travaux d'entretien, la végétation a de nouveau colonisé le site Lorraine et des travaux sont en cours afin d'évaluer la colonisation racinaire dans le recouvrement et l'impact sur le fonctionnement de la CEBC. La profondeur maximale des racines semble cependant ne pas dépasser les 20 premiers

centimètres de la couche de rétention d'eau (Guittony, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, communication personnelle, 2019) et a donc été fixée pour les modélisations à 50 cm sous la surface du recouvrement.

- Détermination de la densité des racines

La densité des racines est prise en compte dans SEEP/W et consiste en la longueur des racines par volume de sol. La densité normalisée est intégrée en fonction de la profondeur normalisée des racines (pente 1:1) pour donner une longueur totale de racines sous une unité de surface. Cette normalisation garantit que la distribution d'absorption d'eau racinaire est égale à l'unité sur la profondeur maximale des racines (Geo-Slope International Ltd, 2017).

- Détermination du couvert végétal et de la hauteur des arbres

Considérant une forêt mature de peupliers baumiers pour les modélisations numériques, le couvert végétal a été défini à 100 % pour les trois années modélisées. La hauteur de la population de peupliers baumiers simulées a été fixé à la hauteur maximale des arbres de cette espèce, soit 25 m (RNCan, 2015).

Les paramètres de végétation ainsi définis ont été appliqués au scénario climatique IPSL pour la période 2098 – 2100 avec les mêmes conditions climatiques de température, précipitations, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement solaire. Seul l'albédo a été ajusté à une valeur de 0,05 correspondant à l'albédo d'une forêt (Musy, 2005).

5.2.2 Résultats des simulations avec végétation

Les résultats des simulations effectuées avec les données de végétation correspondant à un peuplement de peupliers baumiers matures appliquées sur le scénario climatique IPSL indiquent que le couvert végétal tel qu'il a été défini influence de façon conséquente le comportement hydrogéologique du site Lorraine restauré par une CEBC. En effet, la valeur moyenne du niveau piézométrique simulé avec la végétation est de 94,84 masl alors qu'elle est de 95,38 masl avec le scénario climatique IPSL et de 95,56 masl avec les données climatiques historiques (figure 5.8). L'effet de la végétation simulée réduit l'amplitude des variations du niveau piézométrique; les valeurs minimales restent proches des scénarios historique et futur avec IPSL, mais les valeurs

maximales ne sont pas atteintes. Les écarts maximaux entre la modélisation avec végétation et celle avec le climat historique sont observés au début de l'automne pour les trois années simulés (aux environs des jours 240, 650 et 1000). La moyenne des baisses maximales de niveau piézométrique pour les trois années et de 1,76 m entre les simulations des niveaux piézométriques avec végétation et CC et ceux simulés pour le climat historique sans végétation.

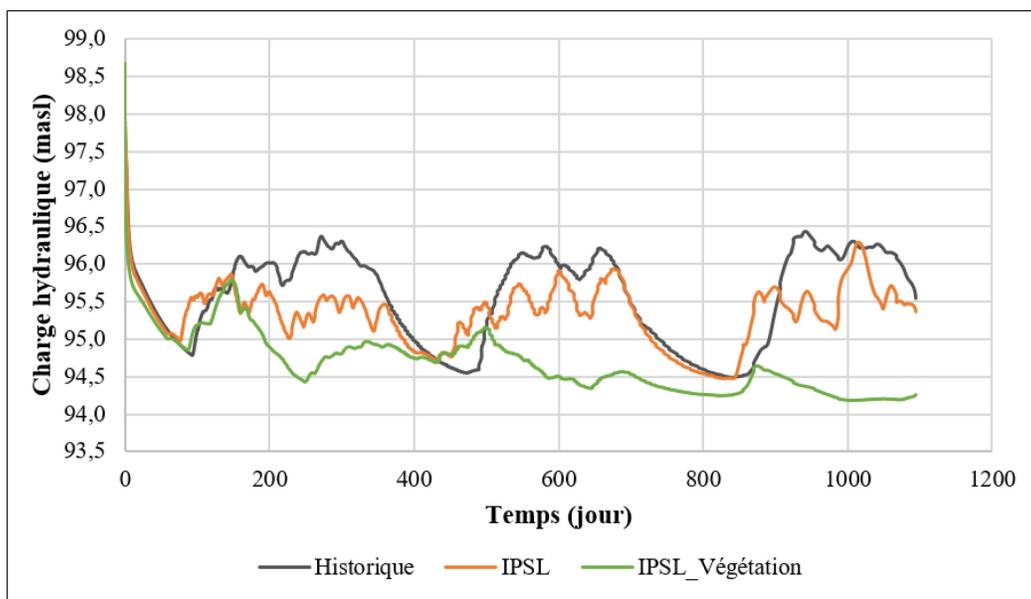


Figure 5.8 : Variation des niveaux piézométriques simulés à PO6 pour les simulations avec le climat historique (2001 - 2003), le scénario IPSL et le scénario IPSL avec végétation (2098 - 2100)

Les variations des teneurs en eau volumique simulées dans la couche de rétention d'eau présentent un comportement similaire aux niveaux piézométriques; les valeurs de θ avec la végétation sont en moyenne plus faibles que les valeurs simulées avec le scénario IPSL et les données climatiques historiques (figure 5.9). Les effets de la végétation ont moins d'impacts sur la saturation de la couche de rétention d'eau lorsque la nappe phréatique est proche de la surface comme c'est le cas pour la station B6. Les valeurs de θ diminuent légèrement pour la station B6, mais restent très proches de la saturation ($\theta_{\text{sat}} = 0,38$ pour la station B6). Les effets de la végétation sont plus marqués lorsque la nappe est plus basse, comme à la station B7 par exemple où les θ simulées atteignent des valeurs de 0,32 dans le haut de la couche, correspondant au seuil limite défini par le critère de performance des CEBC ($S_r = 85 \%$, i.e., $\theta = 0,32$ pour une porosité de 0,38 mesurée à la station B7). Les θ simulées à la station B8 présentent des variations similaires dans le bas de couche de

rétenction d'eau pour les simulations avec et sans végétation. Dans le haut de la couche, les θ simulées avec la végétation sont plus faibles, mais restent tout de même très proche des valeurs simulées avec le scénario climatique IPSL sans végétation et celui simulé avec le scénario historique. Les valeurs simulées dans le haut de la couche sont à quelques reprises inférieures à 0,29 et n'atteignent pas le critère de performance ($S_r = 85 \%$, i.e., $\theta = 0,29$ pour une porosité de 0,34 mesurée à la station B8). Dans le bas de la couche de la station B8 les valeurs sont cependant supérieures à 0,29.

La végétation telle que simulée influence le comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine, en particulier au sud du site, lorsque la nappe phréatique est basse et proche de la digue. Il est important de noter que la végétation simulée dans cette étude est un cas théorique et simplifié d'un peuplement de peupliers baumiers mature. Il est essentiel pour les travaux à venir de préciser davantage la composition et les caractéristiques du couvert végétal présent sur le site et d'étudier plus en détails les liens entre le comportement hydrogéologique du recouvrement et le comportement physiologique des plantes.

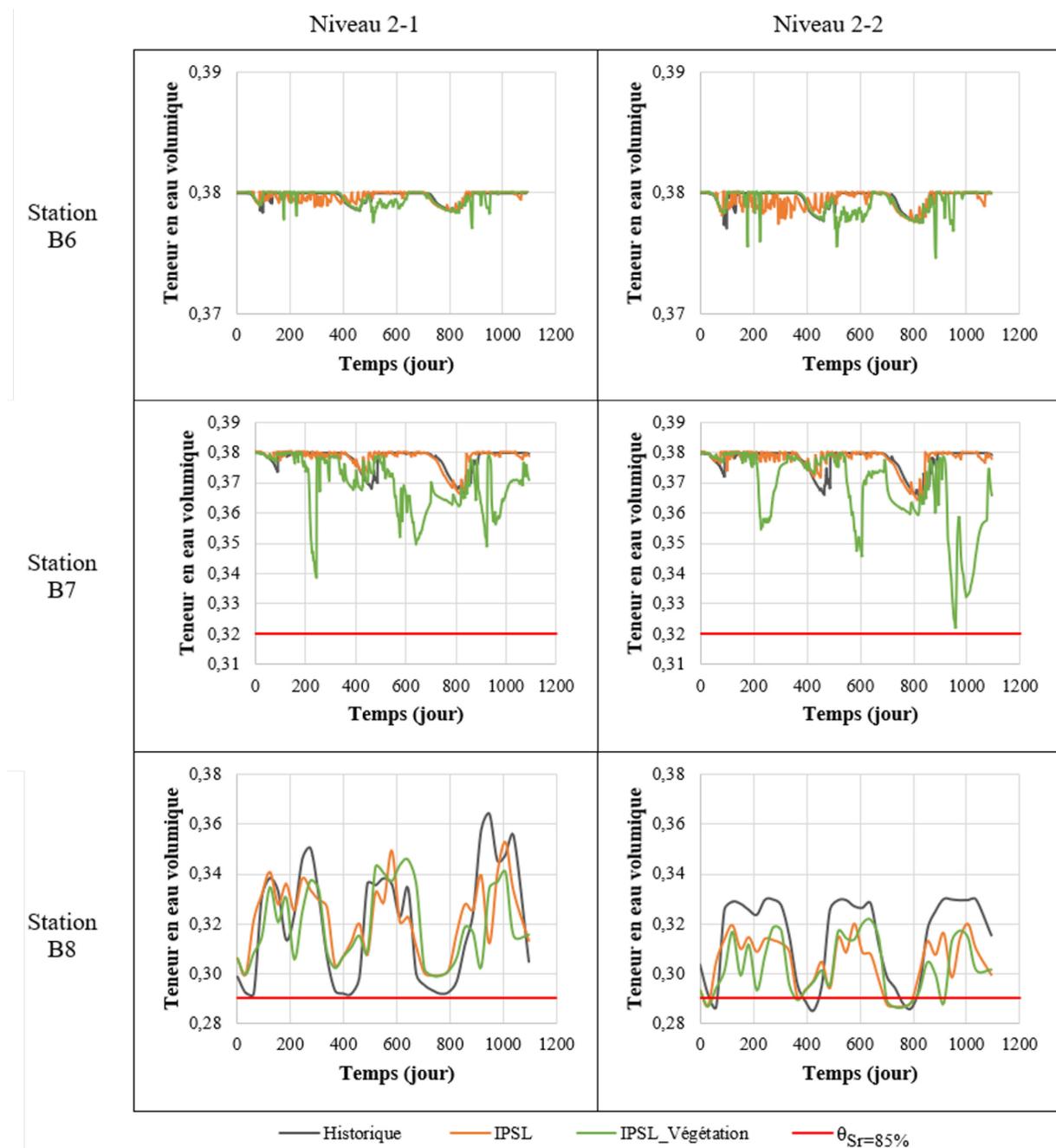


Figure 5.9 : Variation des teneurs en eau volumique en bas et en haut de la couche de rétention (niveaux 2-1 et 2-2, respectivement) aux stations B6, B7 ($n = 0.38$), et B8 ($n = 0.34$) pour les simulations avec le climat historique (2001 - 2003), le scénario IPSL et le scénario IPSL avec végétation (2098 - 2100). $\theta_{Sr=85\%}$ représente la teneur en eau volumique pour un degré de saturation de 85 %

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Sommaire et principales conclusions

La restauration des sites miniers générateurs de drainage minier acide (DMA) constitue un défi majeur auquel doit faire face l'industrie minière et les gouvernements responsables des sites miniers abandonnés. La production de DMA, liée à l'oxydation des minéraux sulfureux dans les aires d'accumulation (parcs à résidus et haldes à stériles), peut contaminer les eaux de surfaces, les eaux souterraines et peut affecter significativement les écosystèmes environnants si elle n'est pas contrôlée. Plusieurs techniques ont été étudiées et mises en place depuis le début des années 1980 afin de résoudre ces problématiques et ce, à des coûts abordables pour l'industrie minière.

À ces problématiques environnementales bien connues de l'exploitation minière auxquelles il faut trouver des solutions, s'ajoutent de nouveaux risques en lien avec les changements climatiques (CC). Des récentes études indiquent que les CC vont toucher toutes les étapes du cycle de vie d'une mine, depuis l'exploration jusqu'à la fermeture. Cependant, peu de travaux spécifiques à l'interaction entre les CC et la restauration minière ont été effectués. De plus, la conception actuelle des ouvrages de restauration intègre seulement les paramètres climatiques actuels moyens et/ou extrêmes, mais ne prennent pas en considération les CC.

En climat humide, la réduction de l'apport en oxygène vers les rejets réactifs est une des principales techniques utilisées pour contrôler la production de DMA. La diffusion de l'oxygène étant jusqu'à 10 000 fois plus faible dans l'eau que dans l'air, une des techniques développées consiste à maintenir une couche de matériau saturée en eau (la couche de rétention d'eau) dans un recouvrement placé au-dessus des résidus réactifs. C'est basé sur cet objectif que les couvertures à effets de barrière capillaire (CEBC) ont été développées. Ces recouvrements sont constitués de plusieurs couches de matériaux dont le contraste de granulométrie et de propriétés hydrogéologiques favorise la mise en place d'effets de barrière capillaire, réduisant considérablement l'écoulement vertical de l'eau depuis un matériau fin vers un matériau grossier sous-jacent.

Comme la plupart des ouvrages de restauration minière, les CEBC ont des durées de vie très longues voire indéfinies et ont de multiples interactions avec le milieu naturel environnant. L'efficacité d'une CEBC étant intrinsèquement dépendante des conditions climatiques

(précipitations, sécheresse), les CC prévus pourraient devenir un paramètre d'influence majeur. L'objectif principal de ce projet était d'évaluer, à l'aide de la modélisation numérique, l'influence des CC sur le comportement hydrogéologique de la CEBC installée sur l'ancien site minier abandonné Lorraine au Québec.

Un modèle numérique représentant la CEBC du site Lorraine a ainsi été construit à l'aide du logiciel SEEP/W. À l'aide de la condition aux frontières Land-Climate-Interaction (LCI), les variations journalières de six paramètres climatiques (température, précipitations, vitesse du vent, humidité relative, albédo et rayonnement solaire) ont pu être intégrées au modèle comme condition frontière de surface. Une première simulation a permis de modéliser le comportement hydrogéologique de la CEBC en tenant compte du climat historique observé entre 2001 et 2003 à la station météorologique de l'aéroport d'Earlton, situé 75 km au nord-ouest du site Lorraine. Les niveaux piézométriques et les teneurs en eau volumique simulés ont été comparés aux mesures effectuées sur le terrain pour cette période et ont permis de valider le modèle. Les niveaux piézométriques simulés comparés à ceux mesurés indiquaient un coefficient de corrélation de 0,54 et une erreur quadratique moyenne (RMSE) égale à 0,16 m se situant dans l'intervalle typique de calibration des charges hydrauliques. Quant aux teneurs en eau volumiques simulées, elles se situaient toutes dans l'intervalle d'erreur ($\pm 0,03$) lié aux mesures des données observées. Ce modèle pouvait donc être considéré comme étant représentatif pour prédire le comportement hydrogéologique de la CEBC de Lorraine.

Trois scénarios climatiques ont ensuite été sélectionnés parmi les différents modèles de CC disponibles pour le site Lorraine et ont été appliqués au modèle validé de la CEBC pour la période 2098 – 2100. Le scénario considéré comme ayant le plus d'impact pour la saturation de la couche de rétention d'eau de la CEBC était celui présentant la plus faible augmentation de précipitations (+ 0,7 %) et la plus forte augmentation de température (+ 7 °C) en termes de changement relatif entre l'horizon historique et l'horizon 2100. La comparaison des niveaux piézométriques avec et sans CC indiquent une baisse du niveau piézométrique moyen d'environ 14 cm avec le scénario IPSL sur les trois années simulées. Cependant, malgré cette baisse du niveau phréatique, les teneurs en eau volumique dans la couche de rétention d'eau restent proches des valeurs simulées avec le climat historique et le degré de saturation reste toujours supérieur au critère de performance des CEBC, i.e. $S_r > 85\%$. Ainsi, la principale conclusion de cette partie du travail est que, malgré le scénario avec CC le plus pessimiste vis à vis la performance à long terme des CEBC, les effets de

barrière capillaire demeurent bien développés, ce qui rend la CEBC de Lorraine robuste face aux CC.

Afin d'évaluer l'efficacité de la CEBC de Lorraine face à des événements de sécheresse qui pourraient causer une désaturation de la couche de rétention d'eau, des simulations de conditions extrêmes ont été réalisées. La méthode développée dans cette étude consistait à étudier les observations météorologiques de la station de l'aéroport d'Earlton afin de déterminer la durée maximale des sécheresses observées et le minimum de précipitations cumulées sur les 30 jours précédents la sécheresse (CPBD). Une sécheresse historique de 42 jours avec un CPBD de 3 mm a ainsi pu être définie comme conditions de sécheresse extrêmes. Le même travail a été effectué sur les données climatiques projetées avec le scénario IPSL afin de calculer le changement relatif entre la période historique et la période future de sécheresse. Ainsi une augmentation de 22 % de la durée des sécheresses et une augmentation de 50 % du CPBD ont été calculée pour l'horizon 2100. Une sécheresse future a ainsi été définie et appliquée au scénario IPSL en considérant une durée de 51 jours et un CPBD de 6 mm. Les résultats de cette simulation avec une sécheresse future appliquée en mai 2099 indiquent que le niveau piézométrique minimal simulé durant cette période baisse de 22 cm avec la sécheresse. Le plus gros écart simulé entre la modélisation avec et sans sécheresse est de 42 cm à la fin de la période sèche. Cependant, le niveau piézométrique simulé avec sécheresse remonte rapidement après celle-ci et atteint le niveau simulé sans sécheresse après 15 jours environ. Les teneurs en eau volumiques dans la couche de rétention d'eau restent cependant proches de celles simulées pour le scénario sans sécheresse et les degrés de saturation sont supérieurs à 85 % en tout temps. La principale conclusion tirée de cette partie du travail est que la sécheresse extrême future n'affectera pas plus la performance de la CEBC que la sécheresse extrême actuelle.

Une deuxième méthode de simulation avec conditions extrêmes, inspirée de la méthode utilisée dans de précédentes études sur la conception d'ouvrages de restauration minière, a également été testée dans ce projet. Une période de deux mois sans précipitation a été appliquée sur le scénario avec climat historique pour les mois de juillet et août 2002, considérant ainsi que le recouvrement avant la sécheresse présentait des conditions de saturation élevée, correspondant à celles observées après la fonte des neiges. Cette sécheresse de deux mois appliquée sur le scénario climatique historique (en 2002) indique que le comportement hydrogéologique de la CEBC subit davantage d'impact avec celui-ci par rapport au scénario défini avec la nouvelle approche. En effet, l'élévation

du niveau piézométrique et les teneurs en eau volumique diminuent davantage. Cependant, les deux paramètres rejoignent rapidement, après la sécheresse, les valeurs simulées avec le scénario historique original. Les résultats indiquent donc que l'ancienne approche est plus conservatrice que celle développée dans cette étude.

Les simulations effectuées avec changements climatiques et conditions extrêmes de sécheresse indiquent donc des variations du comportement hydrogéologique de la CEBC de Lorraine en fonction des différents scénarios testés. Cependant les résultats confirment que le recouvrement de type CEBC demeurera efficace d'ici 2100, avec des effets de barrières capillaires bien développés au sein du recouvrement.

Enfin, l'étude a également permis de montrer que les propriétés des matériaux, et en particulier le contraste entre la couche de rétention d'eau et le bris capillaire est très important, mais que la performance plus faible obtenue sur un tel système n'est pas affectée significativement par les CC. De plus, la prise en compte de la colonisation végétale a brièvement été abordée dans cette étude. Les modélisations effectuées avec un cas théorique de forêt mature de peupliers baumiers appliqué au scénario climatique IPSL indiquent une modification notable du comportement de la CEBC avec des degrés de saturation dans la couche de rétention d'eau qui frôlent le critère limite de performance.

6.2 Recommandations

Les résultats de ces travaux de recherche ont permis de mettre en avant l'influence des changements climatiques et des événements de sécheresse extrêmes sur le comportement hydrogéologique de la CEBC du site Lorraine. Ils ont permis de prédire que la performance à long-terme de la CEBC semble assurée par le design suffisamment robuste du recouvrement; les effets de barrière capillaire sont bien développés même en condition extrême de sécheresse actuelle et projetée en 2100 avec CC. Cependant dans d'autres conditions (hydrogéologiques, climatiques, etc.) et dans le cas d'autres types de recouvrements, l'impact des CC et des conditions extrêmes pourrait être davantage problématique. Dit autrement, chaque cas de restauration devrait être étudié spécifiquement puisque les conclusions de cette étude ne peuvent pas être généralisées à tous les sites.

Dans l'éventualité où la performance à long-terme d'ouvrages de restauration minière serait davantage étudiée, plusieurs aspects pourraient être précisés lors de futurs travaux de recherche :

- Effectuer un monitoring sur le long terme afin de calibrer et valider les modèles numériques sur une période prolongée. Pour le site Lorraine en particulier, une mise à jour des stations de mesure serait bénéfique en installant, par exemple, des sondes automatiques permettant d'obtenir des mesures journalières du niveau piézométrique, des teneurs en eau volumique et des succions au sein du recouvrement;
- Prendre en compte des périodes de modélisation plus longues. Pour le site Lorraine, les modélisations ont été effectuées sur des périodes de 3 ans; en augmentant à 5 voire 10 ans, les incertitudes liées à la variabilité naturelle du climat serait réduite et les changements climatiques seraient plus représentatifs;
- Améliorer les paramètres de convergence des modèles numériques (pas de temps, maillage, nombre d'itération, etc.) afin de pouvoir modéliser des périodes plus longues tout en appliquant les LCI des scénarios climatiques. Pour les modèles de la CEBC de Lorraine, cela permettrait également de prendre en compte la longueur totale du recouvrement;
- Vérifier la validation des modélisations numériques durant les périodes hivernales en combinant SEEP/W et TEMP/W de la suite GeoStudio (Geo-Slope International Ltd.) pour tenir compte des variations de conductivité hydraulique des matériaux saturés et non saturés dans les sols gelés. À noter que des mesures hivernales entre 2009 et 2011 dans la section nord-ouest du parc (PO3 et PO4), où la nappe est plus près de la surface, ont montré une baisse du niveau phréatique de l'ordre de 0,6 à 0,8 m (Maqoud, communications personnelles);
- Intégrer la végétation de façon plus précise dans les modèles numériques en tenant compte des différentes espèces végétales présentes et de leur évolution avec les CC afin d'évaluer leur influence sur le bilan hydrique (ruissellement, évapotranspiration) et sur la consommation d'oxygène;
- Réaliser une étude similaire sur d'autres cas réels comme la CEBC du site Les Terrains Aurifères (Ricard et al., 1997), par exemple, et sur d'autres types de recouvrement tels

qu'étudié par Lieber (en cours) pour la nappe phréatique surélevée envisagée sur le site Doyon-Westwood;

- Préciser les conditions extrêmes de sécheresse en tenant compte de la récurrence des épisodes de sécheresse et de l'augmentation de leur fréquence avec les CC;
- Étudier le bilan hydrique en conditions extrêmes de précipitations comme proposer par les travaux de recherche actuellement effectués sur le site minier de Canadian Malartic par exemple (Gandonou, en cours; Labonté-Raymond, en cours).

De tels travaux permettraient par la suite de développer des indices climatiques adaptés au secteur minier, modifiables à chaque site afin de tenir compte des scénarios climatiques locaux. Cette approche méthodologique permettrait de prendre en considération les CC et les futures conditions climatiques extrêmes dès la conception des ouvrages de restauration minière et faciliterait l'intégration des CC dans les cadres réglementaires.

RÉFÉRENCES

- Aachib M. 1997. Étude en laboratoire de la performance de barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA. Thèse de Doctorat, Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 298p.
- Aachib, M., Mbonimpa, M. et Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air, and Soil Pollution*, 156(1), 163-193.
- Adem, A. A., Melesse, A. M., Tilahun, S. A., Setegn, S. G., Ayana, E. K., Wale, A. et Assefa, T. T. (2014). Climate change projections in the upper Gilgel Abay River catchment, Blue Nile basin Ethiopia. In *Nile River Basin*, 363-388. Springer International Publishing.
- Adu-Wusu, C., Yanful, E.K., Lanteigne, L. et O’Kane, M. (2007). Prediction of the water balance of two soil cover systems. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(2), 215-237.
- Ahmad, F. (2018). Effect Of Climate Change on a Monolithic Desulphurized Tailings Cover. Master Thesis, Civil Engineering, York University, Toronto, ON, Canada, 238p.
- Akindunni F.F., Gillham R.W. et Nicholson R.V. (1991). Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal.*, 28:446–451.
- Alam, M. S., Barbour, S. L., Elshorbagy, A. et Huang, M. (2018). The Impact of Climate Change on the Water Balance of Oil Sands Reclamation Covers and Natural Soil Profiles. *Journal of Hydrometeorology*, 19(11), 1731-1752.
- Alam, Md.S., Barbour, L., Elshorbagy, A. et Huang, M. (2017). The Impact of Climate Change on the Performance of Oil Sands Reclamation Covers: A Comparison of Multiple General Circulation Models and Representative Concentration Pathways. *GeoOttawa 2017*, 8p.
- Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W. et Rock, S. A. (2006). Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1393-1403.

- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A. K., ... et Tagipour, A. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Amyot, G. et Vézina, S. (1997). Flooding as a reclamation solution to an acidic tailings pond – the Solbec case. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, vol. 2. Vancouver, B.C., Canada, 31 May – June 6, 1997, 681-696.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. et Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.
- ASTM Standard D2487 (2007). “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2008). *Standard guide for calibrating a groundwater flow model application D5981–96(2008)*. American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA, 6p.
- Aubertin, M. (1996). Recouvrement multicouche pour le parc à résidus du site minier Lorraine. Report submitted to MRNQ (SDM-R-96-23), 30 pp.
- Aubertin, M. et Chapuis, R. P. (1991). Considérations hydro-géotechniques pour l'entreposage des résidus miniers dans le nord-ouest du Québec. In *Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Montreal, MEND/Canmet , 3:1,22.
- Aubertin, M., Chapuis, R., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J. et Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. École Polytechnique de Montréal, QC, Canada, NEDEM/MEND Projet 2.22.2a, 199p.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R.P. et Crespo, J.R. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1:3,13.
- Aubertin, M., Chapuis, R. P., Bouchentouf, A. et Bussière, B. (1997). Unsaturated flow modeling of inclined layers for the analysis of covers. In *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, Vancouver, BC, 31, 731-746.

- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A.M., Gagnon, D., Barbera, J.M., Aachib, M., Bédard, C., Chapuis, R.P. et Bernier, L. (1999a). Étude sur les barrières sèches construites à partir des résidus miniers. Phase II, Essais en place. Rapport de Recherche, Projet CDT P1899.NEDEM/MEND 2.22.2c.
- Aubertin, M., Dagenais, A-M., Bussière, B. et Bernier, L. (1999b). Suivi du comportement de la couverture multicouche et des drains calcaires au site Minier Lorraine. Rapport d'avancement 2. Projet CDT2427.
- Aubertin, M., Aachib, M. et Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4), 215-233.
- Aubertin, M., Bussière B. et Bernier, L (2002). Environnement et gestion des résidus miniers [CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechnique de Montréal, QC, Canada.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. et 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., Cifuentes, E., Apithy, S., Bussière, B., Molson, J. et Chapuis, R. P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(10), 1146-1164.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B. et James, M. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA: Symposium 2015 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada, 14-17 juin 2015, 67p.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M. et Mbonimpa, M. (2016). Review of the reclamation techniques for acid-generating mine wastes upon closure of disposal sites. *Geo-Chicago 2016*, 343-358.
- Awoh, A. S. (2012). Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Bathe, K. J. (2001). *Finite Element Procedure*, Prentice Hall of India, New Delhi.

- Bédart, C., Bernier L., Lemieux J. et Latour, F. (2005). Plan de fermeture et restauration du parc à résidus miniers de la Mine Bouchard-Hébert. Symposium 2005 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Belzile, N., Chen, Y.W. et Li, Y. (2004). A review on pyrrhotite oxidation: *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 84, 65-76.
- Benson, C. H., Khire, M. et Bosscher, P. (1993). Final cover hydrologic evaluation. *Environmental Geotechnics Report*, 93-4.
- Benson, C., Abichou, T., Albright, W., Gee, G. et Roesler, A. (2001). Field evaluation of alternative earthen final covers. *International Journal of Phytoremediation*, 3(1), 105-127.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M. et Blier, A. (2008). "Integrated sulphidic mine tailings management using environmental desulphurization and cemented paste backfill." *Minerais Engineering*, vol. 21 (4), 330-340.
- Bernier, L. (1996). Rapport d'analyses minéralogiques sur 7 échantillons de résidus miniers, Mine Lorraine, Témiscamingue, Québec. *Géoberex Recherche*, 14p.
- Blowes, D.W., Reardon, E.J., Jambor, J.L. et Cherry, J.A. (1991). The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings. *Geochemical et Cosmochimical Acta*, 55, 965-978.
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L. et Weisener, C. G. (2003). The geochemistry of acid mine drainage. *Treatise on geochemistry*, 9, 612.
- Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weissner, C.J., Paktunc, D., Gould, W.D., Johnson, D.B., 2013. The geochemistry of acid mine drainage. In: *Treatise on Geochemistry*, second edition, 11, 131–190.
- Bossé, B. 2014. « Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride ». Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada, 224p.
- Bowerman, A.G. et Redente, E.F. (1998). Biointrusion of protective barriers at hazardous waste sites. *J. Environ. Qual.*, 27, 625-632.

- Bradshaw, A. D. (1983). The reconstruction of ecosystems. *Journal of applied Ecology*, 20(1), 1-17.
- Bresson, É., Demers, I., Roy, P., Pabst, T. et Chavaillaz, Y. (2018). Efficiency of reclamation methods under climate change: definition of a drought index. 18th International Conference on Tailings and Mine Waste, Keystone, CO, USA.
- Bresson É. (2019- en cours). Projection et indices climatiques pour les sites de Lorraine, Doyon-Westwood et Canadian Malartic. FRQNT Project.
- Broda, S., Aubertin, M., Blessent, D., Maqsood, A. et Bussière, B. (2014). Simulating the variation of the phreatic surface level to assess reclamation techniques for an acidic tailings impoundment - A fieldscale study. *GeoRegina 2014: 67th CGS Conference*, Regina, SK, Canada. 7p.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., Gregersen, H. M. et Thames, J. L. (1991). *Hydrology and the management of watersheds*. Ames.
- Business for Social Responsibility (BSR) (2011). *Adapting to climate change: a guide for the mining industry*.
- Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*. Thèse de Doctorat. Département des génies civil, géologique et des mines. École polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J. et Bois, D. (1995). Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA: analyse technico-économique sur deux cas réels. In *Proceedings of Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment*, Ed. Hynes TP & Blanchette MC, Sudbury, ON, Canada, 1, 59-68.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., Lelièvre, J, Bois, D. et Servant, S. (1998). *Valorisation des résidus miniers. Une approche intégrée. Phase II. Rapport final URSTM-UQAT*. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 194p.
- Bussière, B., Idrissi, M., Elkadri, N. E. et Aubertin, M. (2000). Simulation des écoulements dans les milieux poreux de saturation variable à l'aide de la formulation mixte de l'équation de

- Richards. 1re Conférence conjointe AIH-CNC et SCG sur l'eau souterraine. Montréal : Société Canadienne de Géotechnique, 335-342.
- Bussière, B., Aubertin, M. et Julien, M. (2001). Couvertures avec effets de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide, aspects théoriques et pratiques. *Vecteur Environnement*, 34(3), 37-50.
- Bussière, B., Aubertin, M. et Chapuis, R.P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 512-535.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M. et 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., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, R. et Benzaazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées, Symposium 2005 sur l'environnement et les mines.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J. et Julien, M. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec. *CIM Bulletin*, 1(6), 1-11.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J. et Chapuis, R. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Potvin, R., Dagenais, A. M., Aubertin, M., Maqsoud, A. et Cyr, J. (2009). Restauration du site minier Lorraine, Latulipe, Québec: Résultats de 10 ans de suivi. *Déchets Sci. Et Tech.*, 54, 49-64.
- Bussière, B., Demers, I., Charron, P., Bossé, B., Roy, P., Jébrak, M., Trépanier, S. (2017). Analyse de risque et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Report submitted to MERN, 106p.
- Casajus, N., Périé, C., Logan, T., Lambert, M. C., de Blois, S. et Berteaux, D. (2016). An objective approach to select climate scenarios when projecting species distribution under climate change. *PloS one*, 11(3), e0152495.

- Chapuis, R. P. et Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 616-628
- Charron, I. (2014). Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 86 p.
- Charron, I. (2016). Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation, Édition 2016. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 94 p.
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., et Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D24), 29429-29443.
- Collin, M. et Rasmuson, A. (1988). A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science Society of America Journal*, 52(6), 1559-1565.
- Dagenais, A.M. (2005). Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires. Thèse de Doctorat, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 394p.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L. et Cyr, J. (2001). Monitoring at the Lorraine mine site: a follow up on the remediation plan. Paper presented at the 2001 National Association of Abandoned Mine Land Programs Annual Conference: Land Reborn: Tolls for the 21st Century, Athens, Ohio. Proceedings on CD-Rom.
- Dagenais, A.M., Aubertin, M., Bussière, B. et Cyr, J. (2005). Performance of the Lorraine mine site cover to limit oxygen migration. Proceedings of the SME Annual Meeting, February 28-March 2 2005, Salt Lake City, UT, USA.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65.
- Déandreis, C., Braconnot, P. et Planton, S. (2014). Impact du changement climatique sur la gestion des réseaux de chaleur. Étude réalisée pour l'entreprise DALKIA.

- Demers, I. (2008). Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M. et Blier, A. (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21(4), 317-329.
- Desjarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A.T., Roy, R., Savard, J.P., Turcotte, R. et Villeneuve, C. (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 128p.
- Dhatt G., G. Touzot et Lefrancois, E. (2005). *Méthode des éléments finis*. Hermes - Lavoisier.
- Doughty, C. (2000). Numerical model of water flow in a fractured basalt vadose zone: Box Canyon site, Idaho. *Water Resources Research*, 36(12), 3521-3534.
- Doughty, C. (2007). Modeling geologic storage of carbon dioxide: comparison of non-hysteretic and hysteretic characteristic curves. *Energy Conversion and Management*, 48(6), 1768-1781.
- Drias (2018). Données Météo-France, CERFACS, IPSL. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/63>. Consulté le 22 avril 2018.
- Duerden, F., Pearce, T., Ford, J. et Pittman, J. (2014). Case studies of adaptation to climate change in the Yukon mining sector: from planning and operation to remediation and restoration. Report to Natural Resources Canada and the Adaptation Platform Mining Working Group, 1-23.
- Dufresne, J. L., Foujols, M. A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ... et Bony, S. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2123-2165.
- Dunne, J.P., J.G. John, A.J. Adcroft, S.M. Griffies, R.W. Hallberg, E. Shevliakova, R.J. Stouffer, W. Cooke, K.A. Dunne, M.J. Harrison, J.P. Krasting, S.L. Malyshev, P.C. Milly, P.J. Phillipps, L.T. Sentman, B.L. Samuels, M.J. Spelman, M. Winton, A.T. Wittenberg et N. Zadeh (2012). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part

- I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Climate*, 25, 6646–6665.
- Dunne, J.P., J.G. John, E. Shevliakova, R.J. Stouffer, J.P. Krasting, S.L. Malyshev, P.C. Milly, L.T. Sentman, A.J. Adcroft, W. Cooke, K.A. Dunne, S.M. Griffies, R.W. Hallberg, M.J. Harrison, H. Levy, A.T. Wittenberg, P.J. Phillips, et N. Zadeh (2013). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *J. Climate*, 26, 2247–2267.
- Elberling, B. (2005). Temperature and oxygen control on pyrite oxydation in frozen mine tailings. *Cold Regions Science and Technology*, 41, 121-133.
- Elghali, A., Benzaazoua, M., Bussière, B., Schaumann, D., Graham, S., Genty, T., Noel, J., Kenedy, C. et Cayouette, J. (2017). Investigation of the role of hardpans on the geochemical behavior of the Joutel mine tailings. 17th International Conference on Tailings and Mine Waste, Edmonton, AB, Canada.
- Entraco Inc. (1996). Conception d'un programme de restauration du site minier Lorraine. Rapport final. 70 p.
- Environnement et Changement climatique Canada (2017). Normales climatiques canadiennes de 1981 à 2010. Canadian climate program. Atmospheric Environment Service, Downsview, ON, Canada.
- Ethier, M. P. (2018). Évaluation de la performance du système de recouvrement monocouche avec nappe surélevée pour la restauration d'un parc à résidus abandonné. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada 393p.
- Ethier, M. P., Bussière, B., Broda, S., et Aubertin, M. (2018). Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 26(4), 1201-1219.
- Eymard, R., Gallouët, T. et Herbin, R. (2000). Finite volume methods. *Handbook of numerical analysis*, 7, 713-1018
- Fabre C. (2008). Remise à jour de l'instrumentation d'un site minier réhabilité: Site Lorraine, Latulipe, Québec. Rapport de stage, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, France.

- Fala, O. (2002). Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques. Mémoire de Maîtrise (M.Sc.A), Génie Minéral, Dépt. CGM, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 295p.
- Fala, O. (2008). Analyses des conditions d'écoulement non saturés dans les haldes à stériles. Thèse de Doctorat, Département de Génie Civil Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.
- Fayer, M.J. (2000). UNSAT-H version 3.0, Unsaturated soil water and heat flow model, Pacific Northwest Laboratory, Richland, USA.
- Feenstra, J. F. (1998). Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies.
- Fernandez, J. E. (2003). Design for change: Part 1: diversified lifetimes. *Architectural Research Quarterly*, 7(2), 169-182.
- Fontaine, R. (1999a). Restauration du site minier Lorraine. Rapport de surveillance des travaux 7209-700-02. Dessau-Soprin, Val d'Or, Québec, 33 p.
- Fontaine, R. (1999b). Restauration du site minier Lorraine. Rapport de contrôle qualitatif des matériaux (7209-700). Dessau-Soprin inc.
- Ford, J. D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Ford, L. B., Beaumier, M. et Smith, T. (2010). Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector. *Regional Environmental Change*, 10(1), 65-81.
- Fraser Basin Council (FBC) et Galore Creek Mining Corporation (2014). A Climate Change Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector: Addressing Weather-Related Challenges at the Galore Creek Project, Northwestern British Columbia. Ottawa: Natural Resources Canada.
- Fraser Basin Council (FBC) et Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation (MIRARCO) (2014a). A Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector: Climate Change Planning at Glencore in Sudbury, Ontario. Ottawa: Natural Resources Canada.

- Fraser Basin Council (FBC) et Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation (MIRARCO) (2014b). A Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector: Enhancing Weather Resiliency at Nyrstar Myra Falls. Ottawa: Natural Resources Canada.
- Fredlund, D. G., Xing, A. et Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. et Fredlund, M.D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc. NJ.
- Gee, G.W., Benson, C.H. et Albright, W.H. (2006). Comments on « Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the Southwestern USA ». *Vadose Zone Journal*, 5(2), 809-812.
- Genty, T., Bussière, B., Potvin, R., Benzaazoua, M. et Zagury, G. J. (2012). Dissolution of calcitic marble and dolomitic rock in high iron concentrated acid mine drainage: application to anoxic limestone drains. *Environmental earth sciences*, 66(8), 2387-2401.
- Genty, T., Bussière, B., Paradie, M. et Neculita, C. M. (2016). Passive biochemical treatment of ferriferous mine drainage: Lorraine mine site, Northern Quebec, Canada. In Proc. of the International Mine Water Association (IMWA) Conference, July, 11-15.
- Geo-Slope International (1994). *SEEP/W V3 User's Guide*.
- Geo-Slope International (1996). *SEEP/W V4 User's guide*.
- Geo-Slope International Ltd. (2016). *Transpiration by Root Water Uptake*. Calgary, AB, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (2017). *Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018*. Calgary, AB, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. 2015. *Seepage modelling with SEEP/W, an engineering methodology*. Calgary, AB, Canada.
- Godunov, S. K. et Ryabenki, V. S. (1964). *Theory of difference schemes-an introduction*. Amsterdam: North Holland, 1964.

- Grenier, P.E. (1967). Bibliographie annotée sur la minéralisation métallique dans les régions de Noranda, Matagami, Val D'Or et Chibougameau. Ministère des richesses naturelles. Étude spéciale 2, 305 p.
- Guay, C., Minville, M. et Braun, M. (2015). A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec. *Canadian Water Resources*, 40(3), 285-302.
- Guittonny M., Bussière B., Maqoud A., Proteau A., Ben Khouya T. et Botula YD. (2018). Colonisation racinaire dans les recouvrements miniers et impact sur leur fonctionnement. Symposium 2018 sur les Mines and l'Environnement, Rouyn-Noranda, QC, Canada, 17-20 juin 2018.
- Guittonny-Larchevêque M., Beaulieu A., Proteau A., Bussière B. et Abdelkadir M. (2016). Vegetation management on tailings impoundments reclaimed with capillary barrier effects. In 5th International Symposium on Sediment Management Montreal, Canada July 10-13, 2016, 45p.
- Hawkins, E. et Sutton, R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90, 1095– 1107.
- Hawkins, E. et Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Clim. Dyn.* 37, 407–418.
- Hennessy, K.J., Suppiah, R. et Page, C.M. (1999) "Australian Rainfall Changes, 1910-1995." *Aust. Meteorol. Mag.* 48 (1): 1–13.
- Hilhorst, M. A. et Dirksen, C. (1994). Dielectric water content sensors: time domain versus frequency domain. In *Time domain reflectometry in environmental, infrastructure, and mining applications*, KM O'Connor et al. (eds.). US Dept. Interior Bureau of Mines, Northwestern Univ., Evanston, IL, USA, 23-33.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic Press Inc., New York, 413 p.
- Holder, A. W. (1996). *Testing and validation of FLOTRAN: A ground water flow and contaminant transport model*. Thèse de Doctorat, Rice University.

- Holder, A. W., Bedient, P. B. et Dawson, C. N. (2000). FLOTRAN, a three-dimensional ground water model, with comparisons to analytical solutions and other models. *Advances in Water Resources*, 23(5), 517-530.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. et Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Huard, F. (2014). Régionalisation statistique pour les études d'impact du changement climatique : pourquoi et comment – tour d'horizon méthodologique. Présentation effectuée pour l'INRA.
- Humber, A.J. (1995). Separation of sulphide minerals from mill tailings. *Proceedings of Sudbury' 95, Conference on Mining and the Environment*, Ed. Hynes T.P. & Blanchette M.C., Sudbury, ON, Canada, 1, 149-158.
- Instones, A., Anisimov, O. A., Brigham, L., Goering, D., Krustalev, L. N., Ladanyi, B. et Larsen, J. O., (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *Arctic Climate Impact Assessment Scientific Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 907–944.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea,

T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014b). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 p.

International Council of Mining and Metals (ICMM) (2013). Adapting to a changing climate: Implications for the mining and metals industry. Disponible sur www.icmm.com/document/5173, vérifié le 18 février 2018.

Jambor, J.L. (1994). Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products. J.L. Jambor and D.W. Blowes (Editors), Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine-waste. Mineralogical Association of Canada, Nepean, 59-102.

Jollette D. (2001). Travaux effectués au site minier Lorraine. Rapport de travaux de terrain. Chaire Industrielle CRSNG-Polytechnique-UQAT, 13p

Journeaux Assoc. (2012). Engineering challenges for tailings management facilities and associated infrastructure with regard to climate change in nunavut. (Report no. L-11-1472). Nunavut: Journeaux Assoc. Division Lab Journeaux Inc.

Jung, Y., Pau, G. S. H., Finsterle, S. et Pollyea, R. M. (2017). TOUGH3: A new efficient version of the TOUGH suite of multiphase flow and transport simulators. *Computers & Geosciences*, 108, 2-7.

Kalonji-Kabambi, A. K. (2014). Étude du comportement hydrogéologique de couvertures avec effet de barrière capillaire faites entièrement de matériaux miniers. Mémoire de Maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.

- Kalonji-Kabambi, A. K., Bussière, B. et Demers, I. (2017). Hydrogeological Behaviour of Covers with Capillary Barrier Effects Made of Mining Materials. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(3), 1199-1220.
- Khire, M. V., Benson, C. H. et Bosscher, P. J. (2000). Capillary barriers: Design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8), 695-708.
- Kleinmann, R.L.P, Crera, D. et Pacelli, R.R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Eng.*, 33, 300-306.
- Knidiri, J. (2015). Évaluation de l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif de type stockage-relargage constitué de rejets calcaires phosphatés en climat aride. Thèse de Doctorat, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.
- Knutti, R. et Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369p.
- Kovacs, G. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Lambers, H., Chapin III, F. S. et Pons, T. L. (2008). *Plant physiological ecology*. Springer Science & Business Media.
- Larochelle, C. G., Bussière, B. et Pabst, T. (2019). Acid-Generating Waste Rocks as Capillary Break Layers in Covers with Capillary Barrier Effects for Mine Site Reclamation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(3), 57.
- Lavergne, C. (1985). Gîtes minéraux à tonnage évalué et production minérale du Québec. Ministère de l'énergie et des ressources. DV 85-08, 76.
- Lawrence, R. W. et Wang, Y. (1997, May). Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. In *Proceedings of the fourth international conference on acid rock drainage*, 1, 451-464.
- Lehner, S., Savage, K., Ciobanu, M. et Cliffel, D.E. (2007). The effect of As, Co, and Ni impurities on pyrite oxidation kinetics. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 71, 2491-2509.

- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. et Bush, E. (2008). From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007; Government of Canada, Ottawa, ON, 448p.
- Lieber, É., Demers, I., Pabst, T., Bresson, É. (2018). Effect of climate change on the performance of a monolayer cover combined with an elevated water table to prevent acid mine drainage, GeoEdmonton 2018 - 71st Canadian Geotechnical Conference, 23-26 Sept. 2018, Edmonton, Canada.
- Liu, J., Chen, J. M., & Cihlar, J. (2003). Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass. *Water resources research*, 39(7).
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. et Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of hydrology*, 347(1), 197-210.
- Maqsood, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Aubertin, M. et Wilson, W. G. (2007). Instrumentation and monitoring techniques for oxygen barrier covers used to control acid mine drainage. In *Mining Industry Conference, CIM, Montréal*. [CD-ROM].
- Maqsood, A. et Bussière, B. (2008). Mise à jour de l'instrumentation du site Lorraine. Report of URSTM submitted to MRNF, 12p.
- Maqsood, A., Bussière, B., Aubertin et M., Cyr, J. (2012). Transient hydrogeological behaviour of the Lorraine CCBE (Québec, Canada). *GESRIM 2012: International Congress on the Management of the Mining Wastes and Closed Mines*, 3-6 avril 2012, Marrakech, Morocco.
- Marceau, D. (2007). « 6MIG905, Méthode des éléments finis » Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC, Canada.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M. et Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. et 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.
- McDonald, M. G. et Harbaugh, A. W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Reston, U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875.

- Mermillod-Blondin, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bussière, B., Aubertin, M., Kongolo, M. et De Donato, P. (2005). La désulfuration environnementale pour une gestion intégrée des résidus générateurs de DMA. Symposium sur l'Environnement et les mines, Rouyn-Noranda, QC, Canada, 14-16 mai 2005, 30p.
- Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. et Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574.
- Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) (2001). Manual report 5.4.2, vols 1–6. CANMET, Ottawa, ON, Canada.
- Mine Environment Neutral Drainage Program (MEND) (2011). Climate Change and Acid Rock Drainage –Risks for the Canadian Mining Sector. Mine Environment Neutral Drainage (MEND), Mining Association of Canada MEND Report 1.61.7.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) (2017). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) (2012). Directive 019 sur l'industrie minière. Disponible sur http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019, vérifié le 13 mars 2019.
- Monteith, J.L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107: 1-27
- Morel-Seytoux, H.J. (1992). L'effet de barrière capillaire à l'interface de deux couches de sol aux propriétés fort contrastées. *Hydrol. Continent*, 7:117–128.
- Morin, K.A. et Hutt, N.M. (1997). Environmental Geochemistry of Mine site Drainage, Practical Theory and Case Studies. MDAG Publishing, 333p.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weynant, J.P. et

- Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Ministère des Ressources Naturelles (MRN) (1998). Restauration du site minier Lorraine, devis. Projet SDM-R-98-3.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- Musy A. (2005) Cours Hydrologie générale - Chapitre 4 : Évaporation et interception. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire d'écohydrologie ECHO. Disponible sur <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre4/chapitre4.html>. Vérifié le 27 février 2019.
- Musy, A. et Soutter, M. (1991). *Physique du sol* (Vol. 6). PPUR presses polytechniques.
- Myhre, G., Stordal, F., Restad, K. et Isaksen, I. S. (1998). Estimation of the direct radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Tellus B*, 50(5), 463-477.
- Mylona, E., Xenidis, A. et Paspaliaris, I. (2000). Inhibition of acid generation from sulphidic wastes by the addition of small amounts of limestone. *Minerals Engineering*, 13(10-11), 1161-1175.
- Nastev, M. (1998). Restauration du site minier Lorraine, rapport technique de conception du recouvrement final. Soprin ADS, Montréal, QC, Canada.
- Nastev, M. et Aubertin, M. (2000). Hydrogeological modelling for the reclamation work at the Lorraine mine site Québec. 53rd Canadian Geotechnical Conference and 1st joint IAHCNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Montreal, QC, Canada, 311-318.
- Natural Resources Canada (NRCan) (2008), *From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007*. Ottawa, ON: Government of Canada.
- Neuman, S.P. (1973). Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *Journal of hydraulic division of american society of civil engineers*, 99, 2233-2250.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A. et 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. et Scharer, J.M., (1994). Pyrrhotite oxidation kinetics. In *The Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation.*, in American Chemical Society Symposium, Ser., 550, 14-30.
- Nordstrom, D.K. et Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits , Part A , Processes, Techniques, & Health Issues*. Rev. Econ. Geol., 6A, 133-157.
- Nordstrom, D.K. (2000). Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters: *International Geology Review*, 42, 499- 515.
- Nunavut Regional Adaptation Collaborative (2012). *Vulnerability Assessment of the Mining Sector to Climate Change: Task 1*.
- Nyameogo, G. F. T., Mbonimpa, M., Bussière, B. et Awoh, A. S. (2018). Influence of frozen conditions on the oxygen diffusion coefficient in unsaturated porous materials. *Acta Geotechnica*, 14, 1-13.
- O'kane, M., Wilson, G. W. et Barbour, S. L. (1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5), 828-846.
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Zagury, G. et Bussiere, B. (2005). "An evaluation of the elevated water table concept using laboratory columns with sulphidic tailings [CD-ROM]". *Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical Conference and the 6th Joint International Association of Hydrogeologists–Canadian National Chapter and Canadian Geotechnical Society Conference*, Saskatoon, SK, Canada.
- Pabst, T. (2011). *Étude expérimentale et numérique du comportement hydrogéochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés*. Thèse de Doctorat, Montréal, QC, Canada, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, QC, Canada, 582p.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B. et Molson, J. (2017). Experimental and numerical evaluation of single-layer covers placed on acid-generating tailings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4), 1421-1438.

- Pabst, T., Bussière, B., Aubertin, M. et Molson, J. (2018). Comparative performance of cover systems to prevent acid mine drainage from pre-oxidized tailings: A numerical hydro-geochemical assessment. *Journal of contaminant hydrology*, 214, 39-53.
- Paktunc, A. (1999). "Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage." *Environmental Geology* 39(2): 103-112.
- Pearce, T., Ford, J. D., Prno, J. et Duerden, F. (2009). Climate change and Canadian mining: opportunities for adaptation. Report prepared for the David Suzuki Foundation, 1-50.
- Pearce, T.D., Ford, J.D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M. et Smit, B. (2010). Climate change and mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 16, no. 3, 347-368.
- Peckham, S. D., Ahl, D. E., Serbin, S. P. et Gower, S. T. (2008). Fire-induced changes in green-up and leaf maturity of the Canadian boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3594-3603.
- Perkins, E.H., Nesbitt, H.W., Gunter, W.D., St-Arnaud, L.C. et Mycroft, J.R. (1995). Critical review of geochemical processes and geochemical models adaptable for prediction of acidic drainage from waste rock. Report 1.42.1, Mine Environment Neutral Drainage (MEND).
- Perrin, A., Dion, J, Eng S., Sawyer, D., Nodelman, J.R., Comer, N., Auld, H., Sparling, E., Harris, M., Nodelman J.Y.H. et Kinnear, L. (2015). Economic Implications of Climate Change Adaptations for Mine Access Roads in Northern Canada. *Northern Climate ExChange*, Yukon Research Centre, Yukon College, 93p.
- Piazza, M., Page, C., Sanchez, E. et Terray, L. (2011). Comparaison des méthodes de désagrégation statistique et dynamique pour l'évaluation du changement climatique sur les zones de montagnes en France. SCAMPEI rapport semestriel d'activité, CERFACS.
- Pittman, J., Pearce, T. et Ford, J. (2013). Adaptation to climate change and potash mining in Saskatchewan: Case study from the Qu'Appelle River Watershed. Report to Natural Resources Canada and the Adaptation Platform Mining Working Group, 1-19.
- Plante, B., Bussière, B. et Benzaazoua, M. (2012). Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials. *Journal of Geochemical Exploration*, 114, 57-69.

- Plummer, D. A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., ... et De Elia, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 19(13), 3112-3132.
- Poirier, C. (2008). Etude paramétrique de l'écoulement de l'eau dans un drain de pierre calcaire par analyses numériques selon des variables granulométriques, géométriques et hydrauliques. Mémoire de Maîtrise, Département CGM, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada.
- Potvin, R. (2009). Évaluation à différentes échelles de la performance de systèmes de traitement passif pour des effluents fortement contaminés par le drainage minier acide. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Pratt, A.R., Nesbitt, H.W. et Muir, I.J. (1994). Generation of acids from mine waste oxidative leaching of pyrrhotite in dilute H₂SO₄ solutions at pH 3,0 : *Geochimica Cosmochimica Acta*, 58, 5147-5159.
- Pruess, K., Oldenburg, C. et Moridis, G. (1999). TOUGH2 user's guide. Version 2.0. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA.
- Rakotonimaro, T. V. (2017). Prétraitement et traitement passif du drainage minier acide ferrifère. Thèse de Doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- Reanalyses.org. (2010). Advancing reanalysis.org. <http://reanalyses.org>. Consulté le 29 mars 2019.
- Ressources Naturelles Canada (RNCan) (2015). Base de données "Arbres, insectes et maladies des forêts du Canada »- fiche « Peuplier baumier ». Disponible sur <https://aimfc.rncan.gc.ca/fr/arbres/fiche/53>, vérifié le 29 mars 2019.
- Ricard, J.F., Aubertin, M., Firlotte, F.W., Knapp, R. et McMullen, J. (1997). Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, Qc. In *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, B.C., 31 May- 6 June 1997, 31, 1515- 1530.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *physics*, 1(5), 318-333.

- Rimstidt, J. D. et Vaughan, D. J. (2003). Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 67(5), 873-880.
- RNCREQ, 2014 : Adaptation aux changements climatiques. Disponible sur www.rncreq.org/projets/adaptation.html, vérifié le 29 mars 2019.
- Robinson, M. et Dean, T. J. (1993). Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, 7(1), 77-86.
- Rodgers, C., Eng, S., Sparling, E., Douglas, A., Byer, P. et Auld, H. (2014). Assessing the Treatment of Climate Change Impacts and Adaptation in Project Level EAs in the Canadian Mining Sector, report submitted to Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada, 86p.
- Rooney, R. C., Robinson, D. T. et Petrone, R. (2015). Megaproject reclamation and climate change. *Nature Climate Change*, 5(11), 963-966.
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26(10), 2625-2629.
- Rowe, R.K., Brooker, J.R. et Fraser, M.J. (1998). POLLUTE v6 and POLLUTE-GUI user's guide. GAEA Environnemental Engineering Ltd. London, ON, Canada.
- Roy, P. (2015). Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier. Annexe 3 de l'Analyse de risque et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, MERN-URSTM, 2017. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 56p.
- Roy, P., Fournier, E. et Huard, D. (2017). Guide de normalisation pour les données météorologiques, l'information climatique et les prévisions relatives aux changements climatiques, Montréal, Ouranos, Montréal, QC, Canada, 52p.
- Scharer, J. M., Annable, W. K. et Nicholson, R. V. (1993). WATAIL 1.0 user's manual. Institute for Groundwater Research, University of Waterloo, Canada.
- Schroeder, P. R., Aziz, N. M., Lloyd, C. M. et Zappi, P. A. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: user's guide for version 3 (p.233). Washington, DC:

Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.

Shine, K. P. (2000). Radiative forcing of climate change. *Space Science Reviews*, 94(1-2), 363-373.

Shock, C.C., Barnum, J.M. et Seddigh, M. (1998). Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. Proc. Int. Irrig. Show, San Diego California USA.

Shock, C.C., Wang, F.X., Flock, R., Feibert, E., Shock, C.A. et Pereira A (2013). Irrigation monitoring using soil water tension. Sustainable agriculture techniques, EM 8900, Oregon State University.

Siegel, P., Mosé, R. et Ackerer, P. (1993). Application of the mixed hybrid finite element approximation in a groundwater flow model: implementation and comparison studies. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2.

Simunek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M., Toride, N. et Leij, F.J. (1999). The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection–dispersion equation. Versions 1.0 and 2.0. IGWMC-TPS-71. Int. Ground Water Modeling Ctr., Colorado School of Mines, Golden.

Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M. et van Genuchten, M.T. (2012). The HYDRUS-1D Software Pack for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media (Version 4.15).

Simunek, J., van Genuchten, M. T. et Kodesova, R. (2018). Thematic Issue on HYDRUS Software Applications to Subsurface Fluid Flow and Contaminant Transport. *J. Hydrol. Hydromech*, 66(2), 129-132.

Smirnova, E., Bussière, B., Tremblay, F. et Cyr, J. (2009). Vegetation succession and root penetration on the Lorraine cover used to limit acid mine drainage. In Proc. 34th Annual meeting and conf. of the CLRA, Québec, QC, Canada [on CD-ROM].

Smirnova, E., Bussière, B., Tremblay, F. et Bergeron, Y. (2011). Vegetation succession and impacts of biointrusion on covers used to limit acid mine drainage. *J. Environ. Qual.*, 40(1), 133-143.

- Smith, O. P. et Levasseur, G. (2002). Impacts of climate change on transportation infrastructure in Alaska. *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation*, 151-161.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. et Smith, R.M. (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. EPA-600/2-78- 054. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Soudani, K., Trautmann, J. et Walter, J. M. (2001). Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 324(4), 381-392.
- SRK (1989). Draft acid rock drainage. Technical Guide Vol. 1, British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Report, Prepared by Steffen, Robertson, Kirsten in Association with Norecol Environmental Consultants and Gormely Process Engineering.
- Tassé, N., Germain, D., Dufour, C. et Tremblay, R. (1996). Le recouvrement de résidus organiques au parc East Sullivan: au delà de la barrière d'oxygène. In *Colloque sur le Programme de Neutralisation des Eaux de Drainage dans l'Environnement Minier (NEDEM)*, Rouyn-Noranda, 1,106-128.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. et Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J. M. et Meehl, G. A. (2006). Going to the extremes. *Climatic change*, 79(3-4), 185-211.
- Teutschbein, C. et Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, 12-29.
- The Northern Review (2001). *Uncertain Future: Deliberate Action*. Circumpolar Climate Change Summit Whitehorse, Yukon.
- Therrien, R., McLaren, R. G., Sudicky, E. A. et Panday, S. M. (2010). HydroGeoSphere: a three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo, ON, 419p.

- Todd, D.K. et Mays, L.W. (2005). *Groundwater Hydrology*. Wiley, New York.
- Topp, G.C., Davis, J.L. et Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582.
- Trefry, M. G. et Muffels, C. (2007). FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. *Groundwater*, 45(5), 525-528.
- Trépanier, S. (2005). Étude sur des barrières visant à limiter l'impact de l'infiltration des racines sur la performance des recouvrements multicouches. Mémoire de Maîtrise en biologie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- van Genuchten, M. T. et Nielsen, D. R. (1985). On describing and predicting the hydraulic properties. In *Annales Geophysicae*, 3(5), 615-628.
- van Genuchten, M. V., Leij, F. J. et Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Vardon, P. J. (2015). Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review. *Environmental Geotechnics*, 2(3), 166-174.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. et López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vick, S.G. (1983). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. John Wiley & Sons.
- Watanabe S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori et M. Kawamiya (2011). MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 845.
- Watson, R. T., Zinyowera, M. C. et Moss, R. H. (1996). *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses*.
- Waugh, W.J. (2001). Uranium Mill Tailings Covers: Evaluating Long-Term Performance. In: *International Containment & Remediation Technology Conference*, Orlando, FL, 10-13.

- White, I., Zegelin, S. J. et Wilson, L. G. (1995). Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, 343-385.
- Whitman, S. K. (2016). *Inter-Code Comparison of Variably Saturated Fluid Flow and Prediction of Percolation through a Tailings Impoundment in Southeast Nevada, USA*. Thèse de Doctorat, University of Nevada, Reno, NV, USA.
- Williams, D. J., Currey, N. A., Ritchie, P. J., et Wilson, G. W. (2003). Kidston waste rock dump design and "Store and Release" cover performance seven years on.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. et Barbour, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Can. Geotechn. J.* 31(2):151-161.
- Wilson, G.W. (1990). *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. et Barbour, S.L. (1997). The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 145-155.
- Yagouti, A., Boulet, G., Vincent, L., Vescovi, L. et Mekis, E. (2008). Observed changes in daily temperature and precipitation indices for southern Québec, 1960–2005. *Atmosphere-Ocean*, 46(2), 243-256.
- Yanful, E. K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1207-1228.
- Yanful, E. K., Mousavi, S. M. et De Souza, L. P. (2006). A numerical study of soil cover performance. *Journal of environmental management*, 81(1), 72-92.
- Yanful, E.K., Simms, P.H. et Payant, S.C. (1999). Soil covers for controlling acid generation in mine tailing, a laboratory evaluation of the physics and geochemistry. *Water, Air, & Soil Pollution*, 114, 347-375.
- Yong, R. N. et Mohamed, A. M. O. (1992). Cyclic freeze thaw consideration in design of engineered soil covers for reactive tailings. In *Proceedings of the CSCE 2nd Environmental Specialty Conference, Québec*, 27-29.

- Zhan, G., Keller, J., Milczarek, M. et Giraud, J. (2014). 11 years of evapotranspiration cover performance at the AA leach pad at Barrick Goldstrike Mines. *Mine Water and the Environment*, 33(3), 195-205.
- Zhan, G., Mayer, A.B., McMuller, J. et Aubertin, M. (2001). Slope effect study on the capillary cover design for a spent leach pad. *Tailings and mine waste 01*. Fort Collins, CO, USA.
- Zhan, G., Schafer, W., Milczarek, M., Myers, K., Giraud, J., et Espell, R. (2006, March). The evolution of evapotranspiration cover system at Barrick Goldstrike Mines. In *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage, ICARD*, 6, 2585-2603.

**ANNEXE A RÉCAPITULATIF DE REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES RISQUES, LES VULNÉRABILITÉS,
LES OPPORTUNITÉS ET LES STRATÉGIES D'ADAPTATION POUR LES DIFFÉRENTS DOMAINES DE
L'INDUSTRIE MINIÈRE FACE AUX CC (PEARCE ET AL., 2009)**

Aspect of Industry	Sources	Exposure/Risk	Opportunity	Adaptation	Mitigation
Infrastructure	General sources relevant to climate change and Canadian mining infrastructure: Infrastructure Canada			General adaptations applicable to most mining infrastructure as offered by (Auld et al., 2006): Structural reinforcement, retrofitting, redundancy, and replacement More intensive maintenance routines	
1. Transportation	General sources relevant to climate change and Canadian transportation infrastructure: Transport Canada			General mitigation measures applicable to mining transportation as offered by IPCC, 2007: Increase fuel efficiency of vehicles Land-use/transport planning	
a) Roads	(Auld et al., 2006:8) (IJC, 2003:19) (Lemmen et al., 2008:84-85) (NRCan, 2004-143) (Mills & Andrey, 2002:3) (Instanes et al., 2005:928) (The Northern Review, 2001:78) (Alessa et al., 2008:266) (Yamaguchi et al., 2005) (IPCC, 2007a:2,15) (Bonsal et al., 2001:5-6) (Borrow, 2004)	Permafrost thaw causing cracks, sinking, slumping of road bed Lake-effect snow events block roads (Great Lakes region) Warmer temperatures causing melting of Northern ice roads		Terracing to create stability Abandon and rebuild elsewhere Increase all season road network Enhance load bearing capacity through snow removal and compaction Enhance thickness through surface flooding or spray-ice Modified transport schedules to coincide with mid-winter months Balloon transport (NRCan, 2004:	To mitigate against affects of permafrost thaw: Reduce ground warming in design and operation (insulation) Reduce ground disturbance at design phase Avoid thaw sensitive soil locations Use permafrost preserving infrastructure

				144) Increase in sea transport Intelligent Transport Systems (automated traffic control and advisory) (NRCan, 2004: 144).	
b) Marine	(Neale et al.:12) (Lemmen et al, 2008: 81-85) (IPCC, 2007c:2, 10-13) (Bonsal et al., 2001:5-6) (Instanes et al., 2005: 937)	Stronger winds increasing risks to barge traffic from waves and surges Increased variability in environmental conditions inhibiting on-route navigation.	Rising average temperatures causing reduced ice pack and allowing for longer shipping periods, shorter routes, greater exploration etc.		
c) Fresh Water	(Neale et al.:11-12) (Lemmen et al, 2008: 85) (Quinn, 2002:6-7) Lindeberg (Lindeberg and Albercook, 2000:39-42) (IJC, 2003: 4-31) (Mortsch and Quinn, 1996:906,910) (Mortsch et al., 2006) (Alessa et al.,	Decreased water levels in rivers, lakes (incl. the Great Lakes) due to greater evaporation and variation in precipitation events creating shallower ports and shipping channels; unknown consequences for flat bottom barges.	Rising average temperatures causing reduced ice pack and allowing for longer shipping period.	Increase all season road network Increase dredging Reduce ship loads Use of alternate transport methods (i.e. rail, road, etc.)	

	2008:166) (Bonsal et al. 2001: 5-6) (Borrow et al., 2004)				
2. Containment Facilities (Tailings)	(Instanes, 2005: 926-927) (Lemmen et al, 2008: 259) (Neale et al.,: 8) ICOLD, 2001 (ICOLD, 2001) (Kyhn and Elberling, 2001:131, 137-141) (Zhang et al., 2000) (Bjelkevick, 2005) (Romano et al., 2003) (Yamaguchi, 2005) (Lemly, 1994: 230,235) (Bonsal et al. 2001: 5-6) (Borrow et al., 2004)	Warmer average temperatures leading to Acid mine drainage altered freeze-thaw cycles exposing previously frozen tailings evaporation of water covers on tailing pond exposing raw tailings High intensity precipitation causing saturation of tailings impoundment, overtopping, and erosion leading to risk of failure Wind and wave action of extreme weather events causing re-suspension of tailings and formation of ice dams		Research and development of new cover materials (Auld et al., 2006:5)	(See 1.a) Reduce quantity and size of tailing ponds exposed to climatic conditions by: Re-circulating waste water for reuse in mine operations return mine waste underground through backfilling (Lemly, 1994:235-236)
3. Buildings	(Auld et al., 2006:4,6) (Fernandez, 2002) (The Northern Review, 2001: 69) (Alessa, 2008: 266) (Yamaguchi, 2005) (IPCC, 2007c:2,15) (Borrow et al., 2004)	Permafrost thaw jeopardizing structural integrity via ground instability (partial or entire collapse, sinking, etc.)		Climate relevant building codes and standards Build according to the Diversified Lifetimes Strategy (Fernandez, 2003)	(See 1.a) Structural forensic disaster investigations to inform future building development

4. Energy				General adaptation/mitigation measures applicable to most mining operations as offered by IPCC, 2007 and Auld, 2006b: backup power sources, decrease energy requirements, disaster resistant energy service systems (renewable energy), self sufficient technology	
a) Communications	(Lemmen et al, 2008: 313) (Neale et al.:7)	Extreme weather events isolating mine operations from people, goods and services			
b) Powered facilities/equipment (buildings, machinery, etc.)	(Auld et al., 2006:7)	Extreme weather events causing power failures therefore altering activity timing			
5. Mine Site Drainage	(Neale et al.:11) (Bjelkevick, 2005: 33-34) (Zhang et al., 2000) (Borrow et al., 2004)	Greater precipitation frequency and intensity may cause flooding and/or dilution of effluent. Altered freeze-thaw cycles forming ice dams		Alter drainage system design	
Operations					
1. Processing	(Lemmen et al, 2008: 308, 259) (Brown et al., 2006:42) (IPCC, 2007c:10)	Water scarcity limiting production rates, dust suppression, tailing pond covering options, and jeopardizing drainage effluents etc.		Reduce water intake Recycle process water Move water from tailing ponds/pits/quarries to underground use	
Mine Site Geography (condition of property)					

1. Environment	<p>(Instanes, 2005; 927) (NRCan, 2004:138) (Zhang et al., 2000) (Borrow et al., 2004) (Kyhn and Elberling, 2001: 139)</p>	<p>Erosion induced by greater frequency and intensity of precipitation and/or permafrost thaw of slopes, berms, and mine pit walls. Rising average temperatures and extreme weather events (wind storms) damage Northern snow fences protecting tailing ponds from oxidation and re-suspension</p>			
----------------	---	---	--	--	--

ANNEXE B PRINCIPAUX IMPACTS ET RISQUES ASSOCIÉS AUX OPÉRATIONS MINIÈRES FACE AUX CC (BUSSIÈRE ET AL., 2017)

*Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois
PU-2014-06-913 – Rapport final*

Tableau 19 : Principaux impacts et risques associés aux opérations minières dans un contexte de changements climatiques

Évènement climatique	Cibles	Principaux Impacts	Risques
Augmentation progressive des précipitations moyennes à l'échelle du Québec jusqu'en 2100	<ul style="list-style-type: none"> Ouvrages de rétention Productivité/Opérations minières 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité de capacité insuffisante des bassins d'accumulation des eaux minières; Augmentation des volumes d'eau à gérer et à traiter. 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des risques liés aux relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement; Augmentation des coûts reliés à la gestion et au traitement de volumes d'eau supérieurs.
Augmentation progressive des températures moyennes à l'échelle du Québec jusqu'en 2100 (i.e., augmentation de l'évaporation potentielle, du nombre de jours sans gel).	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructures / Ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> Fonte du pergélisol et zone de pergélisol non continu plus importante; 	<ul style="list-style-type: none"> Risques pour l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages; Problèmes pour trouver des endroits propices aux constructions; Augmentation des coûts d'entretien des infrastructures routières; Risques de fermeture de routes ou chemins de fer (affaissements et tassements de terrain) et isolement des sites;
	<ul style="list-style-type: none"> Productivité / Opérations minières Transport / Logistique 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'évapotranspiration en été; Changements au bilan hydrique; Augmentation des températures dans les différentes haldes, dont la halde à minerai; 	<ul style="list-style-type: none"> Problèmes liés à la recirculation de l'eau en raison d'une augmentation de la charge en contaminants dans l'eau; Problèmes liés à la diminution de la dilution des effluents finaux; Problèmes pour la réduction des poussières; Modification de la chimie de surface du minerai, avec des conséquences fréquentes au procédé de traitement subséquent;
Augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des évènements de précipitation ou de sécheresse extrêmes.	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructures / Ouvrages de rétention 	<ul style="list-style-type: none"> Risques de capacité insuffisante des déversoirs et des évacuateurs de crue; Augmentation soudaine des volumes d'eau à gérer dans les infrastructures minières; 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des risques liés au débordement et au relâchement d'eaux contaminées dans l'environnement; Coût élevé de modification de ces ouvrages; Risques pour l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de rétention; Risque d'instabilité des ouvertures minières et des pentes des fosses; Danger lié à la santé et à la sécurité des travailleurs ainsi qu'à l'intégrité des infrastructures de production minière;
	<ul style="list-style-type: none"> Transport / Logistique 	<ul style="list-style-type: none"> Problématique d'accès lors d'épisodes extrêmes (transport, communication, approvisionnement en énergie). 	<ul style="list-style-type: none"> Risques d'arrêt des opérations, perturbation de la chaîne d'approvisionnement, isolement des sites.

ANNEXE C PRINCIPAUX RÉCENTS RAPPORTS TRAITANT DE L'IMPACT DES CC SUR LA RESTAURATION MINIÈRE

Référence bibliographique	Lieux étudiés	Points-clés abordés
Nordstrom, 2009	USA	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation de l'impact des CC sur les eaux de surface captant du drainage minier acide pour 3 sites miniers aux Etats-Unis: Iron Mountain, CA; Contrary Creek, VA; Questa, NM; - Des augmentations progressives des concentrations en acidité et en métaux se produisent pendant de longues périodes de sécheresse et des augmentations soudaines sont observées lors du premier « rinçage » après les périodes de sécheresse.
Bussière et Hayley, 2010	Arctique	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation de l'effet des CC sur les ouvrages de rétention des résidus dans l'Arctique - La stabilité du pergélisol est menacée par le dégel dans toutes les régions arctiques; - Les ouvrages de rétention initialement conçus avec les normales climatiques canadiennes devraient être réévalués en utilisant des modèles climatiques plus adaptés comme les MCG; - Les mines générant des résidus miniers sulfureux associés à des conditions de pergélisol sensibles aux variations thermiques sont vulnérables aux effets néfastes à long terme sur l'environnement; - Des stratégies de restauration associant un plan de recherche ciblé, des essais de terrain et une expérience approfondie de l'ingénierie arctique devraient être mises en place.
MEND, 2011	Canada	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation de l'impact des CC sur le DMA et la lixiviation des métaux dans les mines canadiennes; - Options d'adaptation plus efficaces disponibles et moins coûteuses si développées dès la phase de planification et de conception; - Les risques les plus marqués pour les parcs à résidus et les méthodes de restauration sont associées aux variations des précipitations, aux phénomènes extrêmes et aux conditions de sécheresse; - Risque pour l'intégrité des structures de confinements des rejets lié aux précipitations; - Impact des sécheresses sur le niveau phréatique et l'efficacité des méthodes de restauration.
Journeaux Assoc., 2012	Nunavut	<ul style="list-style-type: none"> • Problématiques des installations de gestion des résidus miniers face aux CC au Nunavut; • L'empilement à sec combiné au remblayage souterrain et/ou des fosses à ciel ouvert sont recommandés comme techniques de restauration; • Le remblayage est relativement insensible aux problèmes liés aux CC;

Référence bibliographique	Lieux étudiés	Points-clés abordés
Journeaux Assoc., 2012 (suite)		<ul style="list-style-type: none"> • Les catastrophes environnementales causées par des parcs à résidus contaminés sont évitables. Des investissements relativement faibles aujourd'hui peuvent prévenir les responsabilités futures et les pertes environnementales; L'application de facteurs de sécurité plus élevés dans la conception des recouvrements et des ouvrages de rétention est fortement recommandée, en particulier au regard des incertitudes des CC. La recherche au niveau du design des recouvrements doit continuer; • Davantage de travaux de terrain sur l'empilement à sec permettraient de déterminer l'épaisseur d'une couche de déchets pouvant être gelée lors d'une période froide et la profondeur de dégel correspondante pendant la période chaude; • La création et l'utilisation de résidus inertes devrait être l'objectif final de tout site de stockage de résidus miniers; Si des méthodes respectueuses à long terme de l'environnement ne sont pas applicables pour des projets miniers, les ressources non renouvelables ne devraient tout simplement pas être exploitées.
Nunavut Regional Adaptation Collaborative, 2012	Nunavut	<ul style="list-style-type: none"> • Les ouvrages de rétention des résidus dans le Nord sont actuellement conçus pour tirer parti des facteurs liés au climat, tels que le pergélisol et les précipitations, et peuvent être affectés par les changements climatiques tels que l'action du gel, l'eau, le vent et les phénomènes météorologiques extrêmes; • Mesures de contrôle du gel proposées: couvert végétal pour minimiser l'érosion, systèmes de refroidissement pour maintenir le sol gelé, minimiser la formation de glace dans les résidus en les filtrant avant le dépôt; • Mesures de gestions des eaux proposées: canaux de dérivation, couverture en eau suffisante pour maintenir le niveau durant les sécheresse, pentes moins raides et couvertures végétales pour protéger de l'érosion, déversoir plus grand; • Mesures de contrôle de l'érosion éolienne proposées: couvertures végétales, couches de roches, de graviers et/ou de sols et matériaux granulaires; • Des programmes de surveillance devraient être mis en œuvre pour s'assurer que les activités de fermeture de la mine et tout impact environnemental potentiel sont atténués et que les objectifs de fermeture de la mine sont atteints.
Rooney et al., 2015	Alberta	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation de la fermeture et plans de restauration des sites miniers de sables bitumineux en Alberta face aux CC;

Référence bibliographique	Lieux étudiés	Points-clés abordés
Rooney et al., 2015 (suite)		<ul style="list-style-type: none"> • Les vastes étendues spatiotemporelles des exploitations de sables bitumineux en Alberta créent une incertitude quant à savoir si les conditions hydro-climatiques requises seront remplies pour une restauration réussie; • Le cadre proposé pour améliorer le succès de la restauration de ces mégaprojets combine deux concepts: l'état de référence appliqué au niveau local et au niveau du paysage, et l'enveloppe du bioclimat;Le design des plans de fermeture et de restauration doit intégrer les projections climatiques futures en appliquant des modèles d'enveloppes bioclimatiques, i.e. des associations entre le climat, l'hydrologie, les occurrences d'espèces et l'efficience hydrique.
Alam et al., 2017, 2018	Alberta	<ul style="list-style-type: none"> • Etude des incertitudes des changements prévus au niveau évapotranspiration réelle et percolation nette d'une couverture de restauration des sables bitumineux en Alberta; • L'évapotranspiration réelle et la percolation nette des deux sites témoins vont augmenter pour quasi tous les scénarios MCG et RCP testés;
Bussière et al., 2017	Québec	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse qualitative des risques et vulnérabilités liés aux CC pour la restauration des sites miniers québécois; • Principaux impacts pour les différentes méthodes de restauration (systèmes alternatifs et conventionnels pour limiter l'infiltration d'eau; recouvrement en eau, avec nappe surélevée, CEBC et recouvrement isolant pour limiter l'infiltration de l'oxygène); • La performance à long terme des méthodes de restauration et l'intégrité des ouvrages de rétention constituent la plus grande vulnérabilité du secteur minier au Québec; • Pistes de solution proposées: identifier les conditions météorologiques extrêmes, adopter des méthodes de restauration plus robustes, mieux intégrer les CC dans les cadres réglementaires.
Ahmad, 2018	Ontario	<ul style="list-style-type: none"> • Impact des CC sur un recouvrement de résidus désulfurés • Modélisations numériques du climat historique et futur • Les couvertures faites de résidus fins sont plus performantes que celles avec des résidus grossiers, mais leur performance est impactée par l'évolution de leur propriétés hydrauliques avec le temps
Ethier et al., 2018	Québec	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluation de la performance à long terme d'un système de restauration de type nappe phréatique surélevée et recouvrement monocouche avec scénarios de CC simplifiés; • Modélisations numériques utilisée comme outil d'évaluation; • Cibles environnementales atteintes moins fréquemment avec des simulations de périodes de sécheresses et des CC simplifiés

ANNEXE D RÉSULTATS DES SIMULATION CLIMATIQUES DE LA RÉGION ABITIBI SUR LA PÉRIODE 1980-2100 (ROY, 2015)

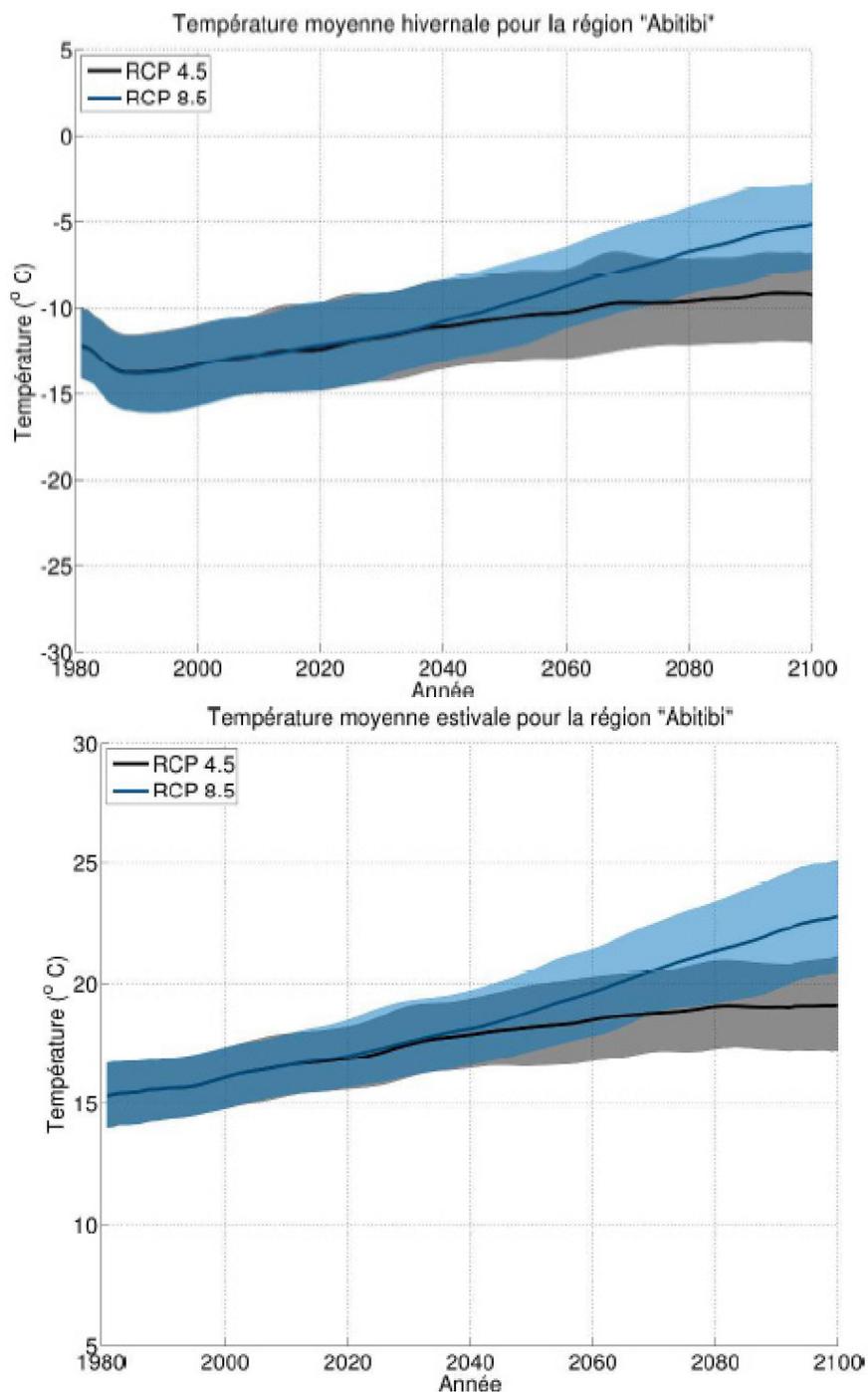


Figure 3.11 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

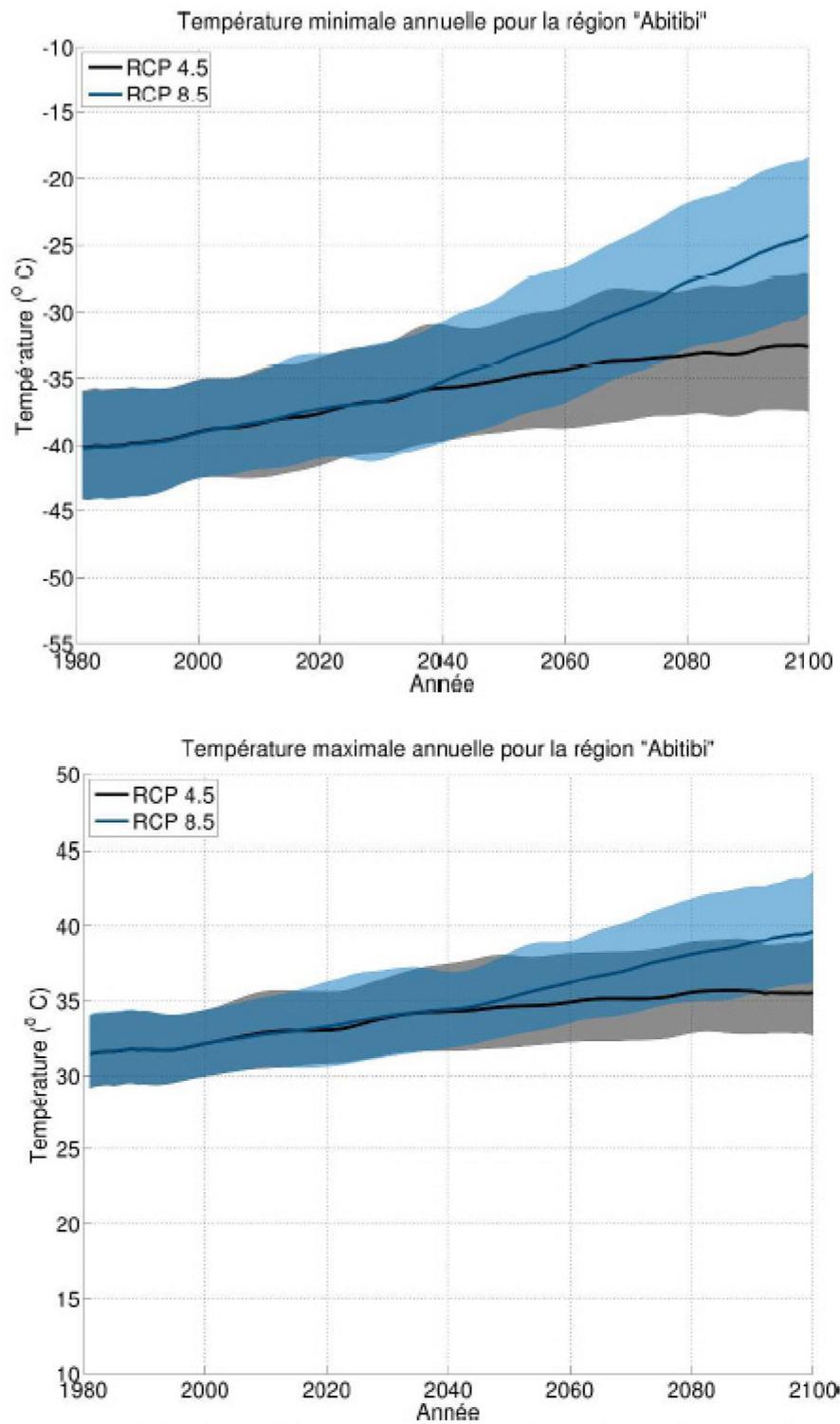


Figure 3.13 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

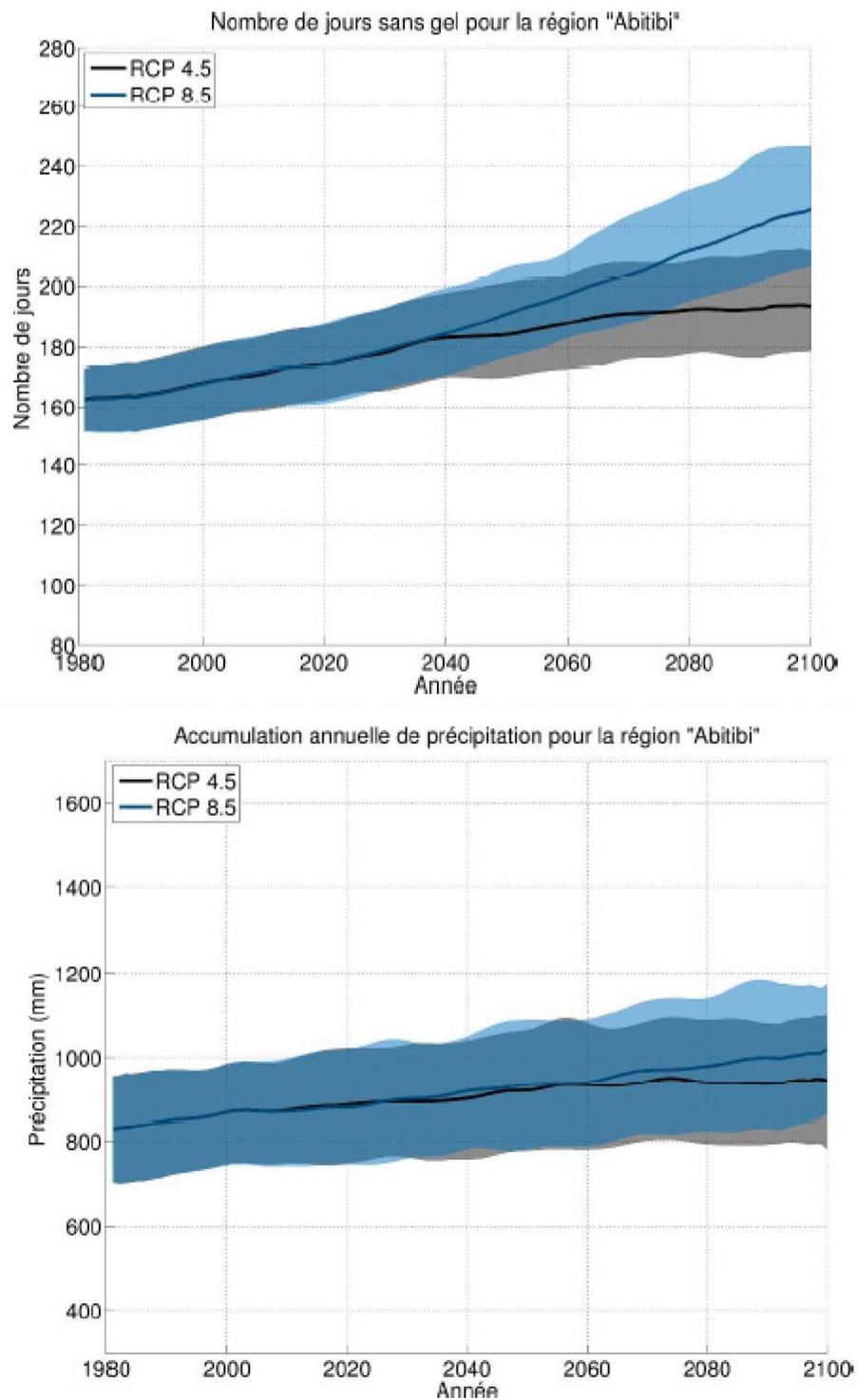


Figure 3.15 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

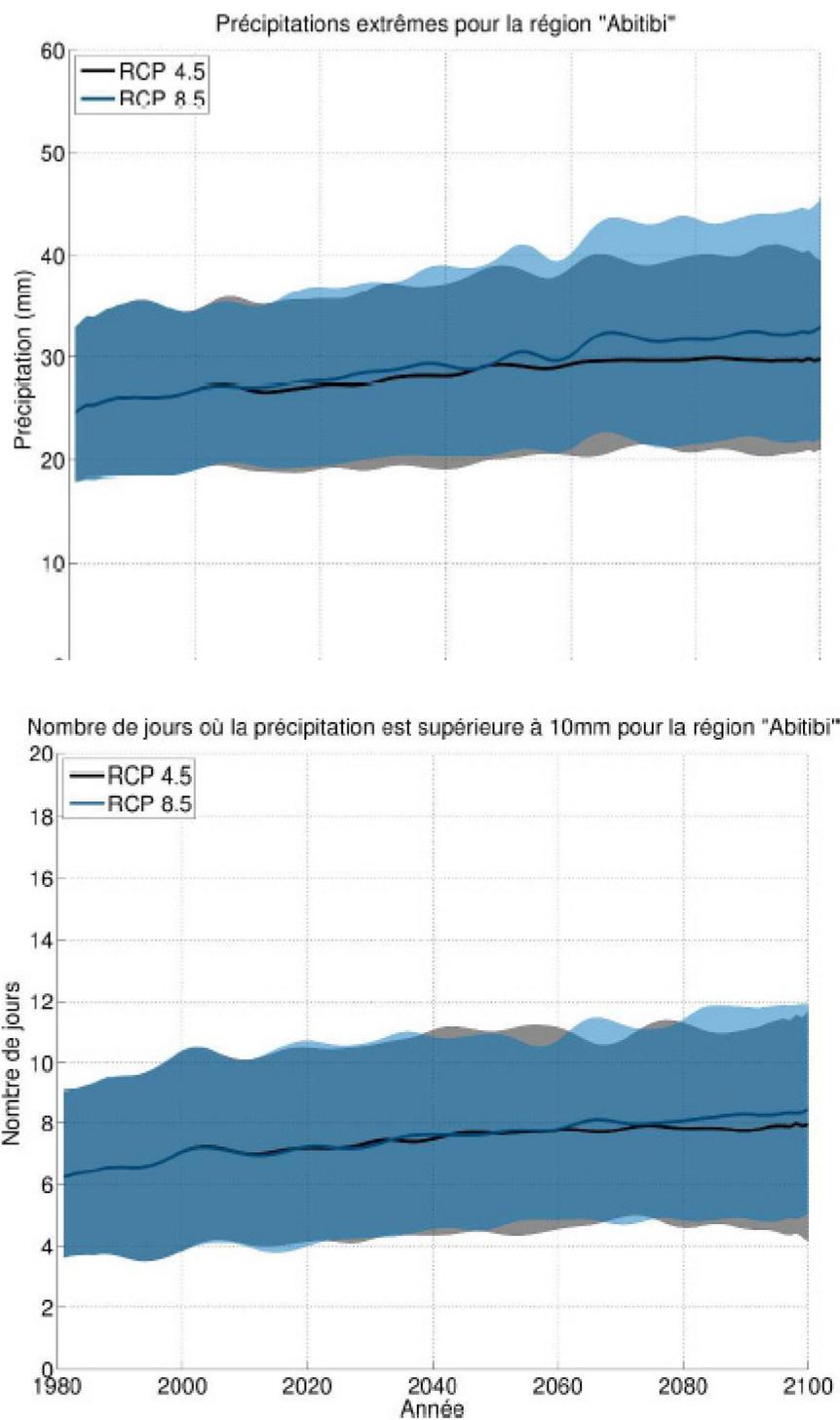


Figure 3.17 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

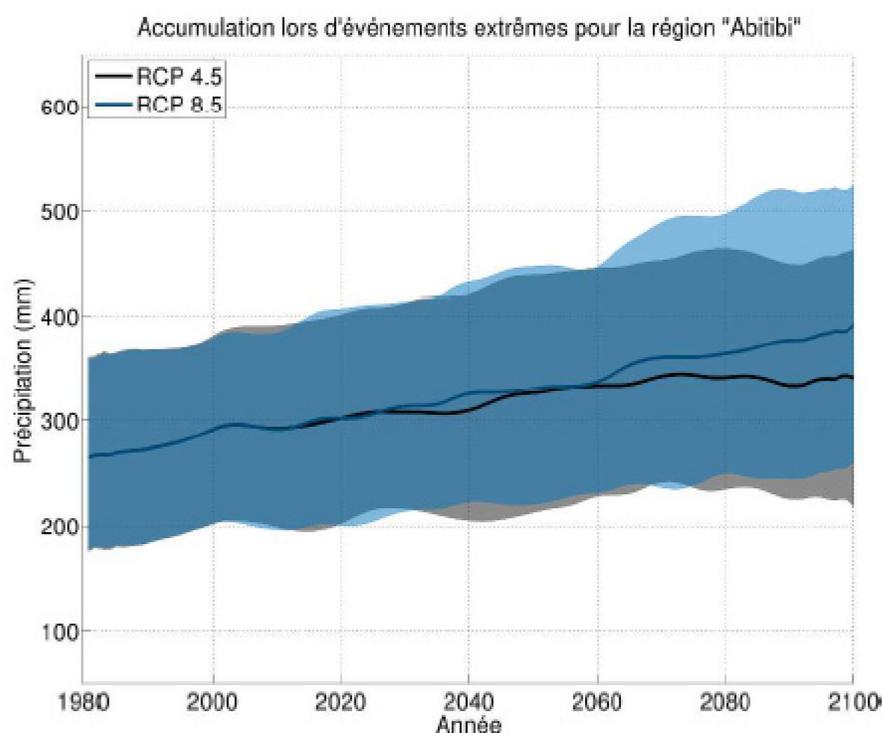


Figure 3.18 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

Tableau 3.1 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de l'Abitibi.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.34	2.5	3.15
RCP 8.5	1.47	3.44	5.92

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.62	3.13	4.04
RCP 8.5	1.66	4.27	7.25

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.41	4.75	6.33
RCP 8.5	2.48	6.85	12.53

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.51	2.75	3.45
RCP 8.5	1.61	3.71	6.51

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	10.98	20.42	26.36
RCP 8.5	11.1	28.36	49.85

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.03	8.29	10.7
RCP 8.5	4.26	10.18	16.13

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.79	11.49	13.52
RCP 8.5	8.29	16.13	22.2

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	7.73	17.12	21.48
RCP 8.5	9.32	20.35	32.37

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.46	0.95	1.09
RCP 8.5	0.48	1.06	1.4

ANNEXE E MOYENNES ANNUELLES DES MESURES DE SUCCION MATRICIELLE, DE TENEUR EN EAU VOLUMIQUE ET DE DEGRÉ DE SATURATION ASSOCIÉ DANS LA COUCHE DE RÉTENTION D'EAU (NIVEAU 2-1) DE LA CEBC DE LORRAINE

	Paramètres	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	C1	C2	C3
1999	Ψ (kPa)	2,43	4,86	1,14	0,57	1,86	0,83	8,00	2,17	2,00	4,60	0,67	6,20	7,83	3,67	5,33	5,83	4,67	1,17	1,17	2,20
	θ (-)	0,34	0,39	0,38	0,37	0,36	0,31	0,31	0,37	0,38	0,38	0,32	0,34	0,32	0,33	0,28	0,28	0,35	0,37	0,38	0,28
	S _r (%)	90,0	101,8	98,9	97,9	95,5	81,3	82,1	97,9	100,9	100,6	83,7	88,4	84,6	85,8	82,8	82,4	92,1	96,9	100,4	82,4
2000	Ψ (kPa)	-	1,4	0,2	0,4	2,8	0,2	-	1,2	0	0,4	2,8	0	2	4,4	3,6	5,2	0	0	0	0,4
	θ (-)	0,35	0,4	0,37	0,36	0,36	0,32	0,33	0,37	0,38	0,38	0,32	0,35	0,34	0,34	0,28	0,28	0,36	0,37	0,38	0,29
	S _r (%)	-	-	-	95,4	95,8	83,4	87,1	96,2	99,2	100,1	85,4	92,0	89,6	89,9	82,3	82,4	95,2	98,1	101,0	85,3
2001	Ψ (kPa)	-	1,6	0,2	0,2	2,2	0,2	-	1,2	0,2	3,2	0,4	1,2	3,8	0,6	4,8	0	5	0	0	0,2
	θ (-)	0,34	-	0,37	0,36	0,36	0,32	0,32	0,36	0,38	0,38	0,33	0,35	0,35	0,35	0,28	0,28	0,36	0,37	0,38	0,29
	S _r (%)	88,5	-	98,4	95,0	95,7	84,5	83,0	95,2	98,9	99,7	86,5	92,9	91,1	91,9	83,7	82,4	94,7	97,8	99,6	84,0
2002	Ψ (kPa)	-	3,4	0,6	0	2,2	5	-	2,2	2,2	9,4	0,4	3	5,4	9,6	13,8	18,8	12	0,2	0	0,6
	θ (-)	0,34	-	0,37	0,36	0,37	0,34	0,34	0,36	0,38	0,38	0,33	0,35	0,35	0,35	0,27	0,27	0,37	0,39	0,38	0,28
	S _r (%)	88,5	-	98,5	95,7	96,7	89,3	89,5	94,4	99,7	98,7	87,9	91,8	92,8	91,7	79,2	-	97,4	101,8	99,9	81,3
2003	Ψ (kPa)	-	4	0	0	0,25	0,25	172	1,25	3,5	6,25	0,5	2,5	8	21,5	8,75	17,75	7	0	0	0
	θ (-)	0,35	-	0,39	0,36	0,37	0,33	0,35	0,37	0,39		0,34	0,35	0,35	0,36	0,31	0,31	0,37	-	0,38	0,31
	S _r (%)	90,9	-	101,8	95,8	97,6	87,7	90,9	96,8	101,6	-	88,3	92,9	93,4	93,9	91,0	91,2	97,4	-	100,0	92,4
2004	Ψ (kPa)	-	0,75	0	-	0,25	0,5	-	0,5	-	-	0,75	1,75	43	12	12,75	4	0	0	0	-
	θ (-)	0,35	-	-	-	0,37	-	0,35	0,37	-	0,38	0,33	0,36	-	0,36	-	-	0,37	0,43	0,39	-
	S _r (%)	92,4	-	-	-	98,0	-	92,2	98,1	-	98,7	87,0	93,4	-	94,6	-	-	97,4	113,6	102,5	-
2005	Ψ (kPa)	-	-	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	68,3	-	2	-	-	-	-	-	-
	θ (-)	-	-	-	-	-	-	0,35	-	-	-	-	0,36	-	0,36	-	-	-	-	-	-
	S _r (%)	-	-	-	-	-	-	92,1	-	-	-	-	86,8	-	93,9	-	-	-	-	-	-
2006	Ψ (kPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	θ (-)	-	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-	-	0,35	-	0,35	-	-	-	-	-	-
	S _r (%)	-	-	-	-	-	-	89,5	-	-	-	-	92,4	-	92,9	-	-	-	-	-	-

	Paramètres	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	C1	C2	C3
2007	Ψ (kPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	θ (-)	-	-	-	-	-	-	0,36	-	-	-	-	0,37	-	0,37	-	-	-	-	-	-
	S _r (%)	-	-	-	-	-	-	94,7	-	-	-	-	97,4	-	97,4	-	-	-	-	-	-
2008	Ψ (kPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	θ (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S _r (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	Ψ (kPa)	-	0,0	66,3	-	16,0	-	172,0	13,3	2,0	0,0	144,5	0,3	3,0	5,3	37,0	-	-	53,0	0,0	24,5
	θ (-)	0,38	0,44	0,56	0,38	-	0,37	0,36	-	-	0,38	0,37	0,36	-	0,36	-	-	0,368	-	-	-
	S _r (%)	99,6	115,2	147,0	100,0	-	96,1	94,5	-	-	100,0	96,2	93,9	-	95,8	-	-	96,8	-	-	-
2010	Ψ (kPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	θ (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S _r (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	Ψ (kPa)	-	0,0	-	-	20,0	-	-	11,5	5,0	-	-	55,9	7,5	5,5	-	-	-	141,0	0,0	0,0
	θ (-)	0,38	-	-	0,38	-	0,37	0,37	-	-	0,38	0,37	0,36	-	0,36	-	-	0,37	-	-	-
	S _r (%)	100,0	-	-	100,0	-	97,9	96,6	-	-	100,0	96,8	95,0	-	94,5	-	-	97,9	-	-	-

	2009			2010			2011		
	Ψ (kPa)	θ (-)	S _r (%)	Ψ (kPa)	θ (-)	S _r (%)	Ψ (kPa)	θ (-)	S _r (%)
D1	0,7	0,38	100,0	-	-	-	11,0	-	-
D2	3,9	0,28	82,4	1,4	0,25	73,5	-	0,17	50,0
D3	5,6	-	-		8,1	0,31	91,2	6,0	0,3
D4	117,0	0,34	89,5	-	-	-	7,5	0,38	100,0
D5	18,8	-	-	-	0,15	44,1	32,0	0,13	38,2

ANNEXE F ÉVOLUTION DES DONNÉES CLIMATIQUES UTILISÉES DAS LES MODÉLISATION NUMÉRIQUES ENTRE 2001 ET 2003 POUR LE SCÉNARIO DE CLIMAT HISTORIQUE ET ENTRE 2098 ET 2100 POUR LE SCÉNARIO DE CHANGEMENTS CLIMATIQUE

