



**APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR
INTÉGRER DES SCÉNARIOS DE VÉGÉTATION
FORESTIÈRE TENANT COMPTE DES
CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA
PRÉDICTION DE LA PERFORMANCE DES
MÉTHODES DE RESTAURATION MINIÈRE SOUS
CLIMAT HUMIDE AU QUÉBEC**

*Projet : Restauration des parcs à résidus miniers et changements climatiques :
développement et application d'outils d'aide à l'adaptation*

**Scénarios de végétation à long terme tenant compte des changements
climatiques pour prédire la performance des méthodes de restauration**

ISBN 978-2-924231-28-9

Mars 2021



TERRENET



CRÉDITS

Auteurs du rapport

Yves-Dady Botula (UQAT)

Marie Guittonny (UQAT)

Émilie Bresson (UQAT, Polytechnique Montréal, Ouranos)

Bruno Bussière (UQAT)

Citation

Botula, Y.-D., Guittonny, M., Bresson, É., Bussière, B., 2021. Approche méthodologique pour intégrer des scénarios de végétation forestière tenant compte des changements climatiques dans la prédiction de la performance des méthodes de restauration minière sous climat humide au Québec. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. 26 p., ISBN 978-2-924231-28-9

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1. Introduction	1
2. Synthèse des connaissances en lien avec les effets des CC sur la distribution des essences clés de la forêt feuillue et boréale au Québec	3
2.1 Évolution des régimes de distribution de la température et des précipitations dans un contexte de CC à l’horizon 2100 (cfr revue de la littérature)	3
2.2 Distribution actuelle des essences clés de la forêt feuillue et boréale (cfr revue de la littérature)	3
2.3 Migration vers le Nord des essences clés de la forêt feuillue et boréale sous CC à l’horizon 2100	4
3. Synthèse des connaissances en lien avec l’influence de la végétation forestière sur la performance actuelle et future des barrières à l’oxygène au Québec	5
3.1 Les barrières à l’oxygène pour contrôler le drainage minier acide sous climat humide	5
3.1.1 La monocouche avec nappe phréatique surélevée (MNPS)	5
3.1.2 La couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC)	6
3.2 Caractéristiques (paramètres) clés de la végétation susceptibles d’influencer la performance des barrières à l’oxygène et plages de valeur associées.....	7
3.2.1 Les caractéristiques de la végétation utilisées comme paramètres d’entrée dans les modèles numériques de calcul du bilan hydrique des recouvrements	7
3.2.2 Sélection des valeurs pour les paramètres de la végétation à entrer dans les modèles numériques	9
3.3 Scénarios de végétation à l’horizon 2100	10
4. Analyse qualitative de l’influence des CC sur les paramètres de la végétation utilisés pour évaluer la performance des barrières à l’oxygène : application à deux sites miniers du Québec	12
4.1 Colonisation naturelle des arbres sur un site minier restauré avec une MNPS sous CC : cas du site Westwood	12
4.1.1 Domaine bioclimatique incluant le site Westwood	12
4.1.2 Relevés de végétation sur le site Westwood	12
4.1.3 Scénarios de végétation à l’horizon 2100 pour le site Westwood ..	13
4.1.4 Changements attendus des gammes de valeurs de LAI, $R_{t_{max}}$ et RLD sur le site Westwood	13

4.2	Colonisation naturelle des arbres sur un site minier restauré avec une CEBC sous CC : cas du site Lorraine.....	17
4.2.1	Domaine bioclimatique incluant le site Lorraine	17
4.2.2	Relevés de végétation sur le site Lorraine	17
4.2.3	Scénarios de végétation à l'horizon 2100 pour le site Lorraine	17
4.2.4	Changements attendus des gammes de valeurs de LAI, Rt_{max} et RLD sur le site Lorraine.....	18
5.	Conclusion.....	19
6.	Références	20

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 – Méthode de restauration de la nappe surélevée (à faible profondeur et avec monocouche) (Source: Bussière et al., 2017 adaptée d’Aubertin et al., 1999). 6
- Figure 2 – Les différentes couches d’une couverture avec effets de barrière capillaire (Source : Aubertin et al., 1995).....7

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 – Scénarios de végétation pour 2100 sous changements climatiques pour les sites Westwood et Lorraine.15
- Tableau 2 – Changements attendus des gammes de valeurs de LAI et Rtmax sur les sites Westwood et Lorraine.....16

1. INTRODUCTION

La restauration des parcs à résidus générateurs de drainage minier acide (DMA) constitue un défi environnemental important pour l'industrie minière. Au Québec, différentes techniques de contrôle du DMA provenant de parcs à résidus sont utilisées pour empêcher la contamination de l'environnement, parmi lesquelles on retrouve les recouvrements d'ingénierie appelés barrières à l'oxygène (Bussière *et al.*, 2003; Aubertin *et al.*, 2016; Bussière et Guittonny, 2020).

Dans le contexte de restauration de sites miniers, l'objectif est de mettre en place un recouvrement permettant de contrôler la contamination et pouvant supporter une végétation pérenne qui s'intègre bien à l'environnement du site (MEND, 2014). Cependant, la végétation peut affecter le bilan hydrique, les propriétés des matériaux des barrières à l'oxygène et, par le fait même, leur performance (MEND, 2014; Guittonny *et al.*, 2018).

À ce jour, les caractéristiques à long terme de la végétation forestière qui s'installera sur les parcs à résidus restaurés sont encore mal connues et nécessitent de prendre en compte l'influence des changements climatiques (CC) sur l'évolution des écosystèmes.

En effet, les CC conduisent à une redistribution généralisée des espèces à l'échelle planétaire (IPCC, 2014; Bonebrake *et al.*, 2018). Un changement des conditions climatiques pourrait entraîner un changement dans la distribution des espèces d'arbres et dans la composition des forêts. Les conditions climatiques ont déjà changé et affectent déjà la distribution de certaines espèces d'arbres au Canada (Williamson *et al.*, 2009; Price *et al.*, 2013; Berteaux *et al.*, 2014; Ressources naturelles Canada, 2017). Le climat existant dans une région où une espèce vit et se reproduit se trouvera vraisemblablement ailleurs dans l'avenir (McKenney *et al.*, 2007; Berteaux *et al.*, 2014; Sittaro *et al.*, 2017).

Le présent rapport vise à proposer une approche méthodologique pour la prise en compte de l'influence de la végétation forestière sur la performance à long terme des barrières à l'oxygène sur base des scénarios de végétation sous CC au Québec.

En amont de ce rapport, une revue de littérature sur les changements d'aire de répartition des essences clés de la forêt feuillue et boréale, en réponse aux CC, a été réalisée (Botula *et al.*, 2019). Celle-ci a permis d'identifier la composition de la végétation qui sera présente de manière plausible d'ici 2100 pour deux sites miniers : l'un en activité, la mine Westwood en Abitibi, et l'autre abandonné, le site Lorraine au Témiscamingue. En se basant sur ces travaux, des scénarios de végétation d'ici 2100 seront proposés dans ce rapport pour les deux sites, ainsi que des gammes de valeurs correspondantes pour les paramètres de végétation à intégrer aux modèles numériques hydrogéologiques utilisés pour la prédiction de la performance des barrières à l'oxygène.

Les résultats présentés ici pourront aider les partenaires miniers à déterminer si l'évolution de la végétation sur leurs sites suite aux CC affectera la performance à long terme des méthodes de

restauration utilisées, et si des mesures de gestion de cette végétation devront être mises en place.

Ce rapport est divisé en trois chapitres et se termine par une conclusion et des suggestions :

- le premier chapitre est une synthèse des connaissances en lien avec les effets des CC sur la distribution des essences clés de la forêt feuillue et boréale au Québec;
- le deuxième chapitre est une synthèse des connaissances en lien avec l'influence de la végétation forestière sur la performance des barrières à l'oxygène au Québec;

le troisième chapitre est une analyse qualitative de l'influence des CC sur les paramètres de la végétation utilisés pour évaluer la performance des barrières à l'oxygène avec application à deux sites miniers : Westwood et Lorraine.

2. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES EN LIEN AVEC LES EFFETS DES CC SUR LA DISTRIBUTION DES ESSENCES CLÉS DE LA FORÊT FEUILLUE ET BORÉALE AU QUÉBEC

Cette section est basée sur la revue de littérature sur l'effet des CC sur les aires de répartition des essences clés de la forêt feuillue et boréale au Québec.

2.1 Évolution des régimes de distribution de la température et des précipitations dans un contexte de CC à l'horizon 2100 (cfr revue de la littérature)

Des projections récentes sur les CC indiquent que les températures moyennes annuelles pourraient augmenter de 4 à 5°C d'ici la fin du 21^e siècle le long de la zone boréale du Canada, si aucun effort substantiel n'est fait pour contrôler les émissions globales des gaz à effet de serre (Price *et al.*, 2013; Warren et Lemmen, 2014; Ouranos, 2015).

En ce qui concerne les précipitations totales, les changements projetés par les modèles sont différents en hiver et en été (Logan *et al.*, 2011) :

- En hiver, les modèles projettent un gradient nord-sud sur le Québec avec des hausses de précipitations totales plus importantes sur la portion Nord du territoire (au-dessus de 50°N). Plus précisément, la hausse la plus marquée est aux abords de la Baie d'Hudson;
- En été, les hausses projetées de précipitations totales au Nord sont faibles et les modèles projettent une absence de changement dans les précipitations pour la portion sud du Québec.

2.2 Distribution actuelle des essences clés de la forêt feuillue et boréale (cfr revue de la littérature)

Au Québec, on distingue dix domaines bioclimatiques, dont quatre sont situés dans la zone tempérée nordique (l'érablière à caryer cordiforme, l'érablière à tilleul, l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune), quatre dans la zone boréale (la sapinière à bouleau blanc, la pessière à mousses, la pessière à lichens, la toundra forestière), et deux dans la zone arctique (la toundra arctique arbustive et la toundra arctique herbacée) (ministère des Ressources naturelles, 2003). La région de l'Abitibi-Témiscamingue, à l'ouest du Québec, est traversée par quatre zones bioclimatiques : l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau blanc, la pessière à mousses.

2.3 Migration vers le Nord des essences clés de la forêt feuillue et boréale sous CC à l'horizon 2100 ¹

Périé *et al.* (2014) ont utilisé l'approche des modèles de niche ou « modèle d'habitat » pour évaluer l'effet des CC sur les aires de répartition potentielles des arbres présents au Québec et en périphérie. Des 120 espèces concernées par l'étude de Périé *et al.* (2014), 90 pourraient avoir un habitat favorable au Québec à la fin du 21^e siècle. D'autre part, les projections pour 2100 indiquent que 14 des 49 espèces qui étaient présentes au Québec à la fin du 20^e siècle pourraient connaître des problèmes de mésadaptation face aux nouvelles conditions climatiques sur plus de 50 % de l'aire de répartition qu'elles occupaient auparavant.

Cependant, des mises en garde s'imposent pour bien interpréter la répartition potentielle future d'une espèce sous l'effet des CC (Périé *et al.*, 2014). En premier lieu, les capacités de dispersion de certaines espèces peuvent être trop faibles pour qu'elles puissent coloniser de nouvelles régions au fur et à mesure que l'environnement physique y devient favorable. De même, les interactions biotiques comme la compétition, la prédation ou le mutualisme ne sont pas prises en compte dans la plupart des modèles d'habitats corrélatifs (Buckley et Kingsolver, 2012).

¹ Cfr revue de la littérature

3. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES EN LIEN AVEC L'INFLUENCE DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE SUR LA PERFORMANCE ACTUELLE ET FUTURE DES BARRIÈRES À L'OXYGÈNE AU QUÉBEC

À la suite de la restauration des sites miniers, la végétation herbacée et/ou forestière peut s'installer de façon naturelle sur les recouvrements utilisés comme barrières à l'oxygène pour contrôler le DMA (INAP, 2009; MERN, 2016; Guittonny *et al.*, 2018). Le développement de cette végétation sur ces recouvrements peut modifier les propriétés hydrogéologiques des matériaux qui les constituent et influencer sur les composantes de leur bilan hydrique, ce qui pourrait éventuellement affecter leur performance à long terme (Guittonny *et al.*, 2018).

3.1 Les barrières à l'oxygène pour contrôler le drainage minier acide sous climat humide

Les méthodes de prévention ou de réduction du DMA sont basées sur l'exclusion d'un ou plusieurs des éléments constitutifs des réactions chimiques responsables du DMA (oxydation des résidus sulfureux réactifs). Pour empêcher cette oxydation dans les sites d'entreposage, on a traditionnellement recours à l'utilisation des systèmes de recouvrement (Aubertin et Bussière, 1991; Aubertin *et al.*, 2002). Ces recouvrements appartiennent à un groupe plus large de recouvrements dits d'ingénierie (en anglais : *engineered covers*).

En climat humide, comme au Québec, le contrôle du flux d'oxygène est la voie la plus efficace pour limiter la production de DMA à long terme (SRK, 1989; MEND, 2001). Deux types de systèmes de recouvrement utilisés comme barrière à l'oxygène sont couramment utilisés en restauration minière au Québec : la monocouche avec nappe phréatique surélevée (MNPS) et la couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC).

3.1.1 La monocouche avec nappe phréatique surélevée (MNPS)

Le principe de la MNPS consiste à maintenir les résidus à un degré de saturation élevé par submersion ou par capillarité afin d'empêcher l'oxydation des minéraux sulfureux et de protéger les résidus réactifs par un recouvrement monocouche (*figure 1*). La technique de la MNPS repose sur le faible taux de diffusion de l'oxygène en milieu quasi saturé (MEND, 1996; Aubertin *et al.*, 1999; Ouangrawa *et al.*, 2007; Demers, 2008). L'efficacité de cette technique est basée principalement sur le contrôle de la position de la nappe (Ouangrawa *et al.*, 2006; Dagenais *et al.*, 2006a).

Le recouvrement monocouche utilisé par cette technique peut être constitué de matériau fin ou de matériau grossier. Dans le cas du recouvrement constitué de matériau fin, on vise à favoriser l'accumulation d'eau dans le recouvrement (pour contrôler la diffusion d'oxygène) en plus de protéger le résidu réactif des relations sol-atmosphère. Quant au recouvrement constitué de matériau grossier, on vise à protéger les résidus réactifs de l'évaporation et à favoriser les

infiltrations d'eau. En favorisant l'infiltration, on élève le niveau de la nappe phréatique et on maintient un niveau de saturation plus élevé dans les résidus.

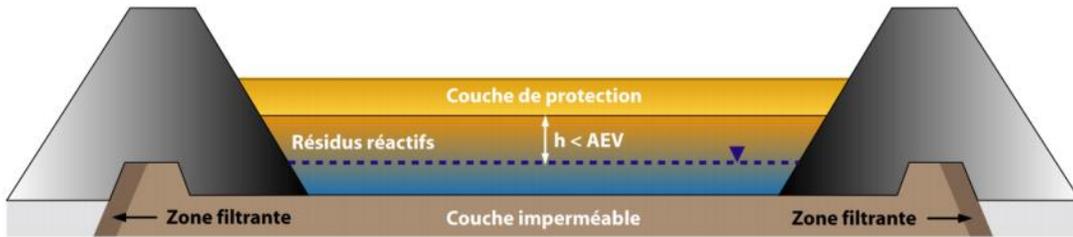


Figure 1 – Méthode de restauration de la nappe surélevée (à faible profondeur et avec monocouche)
(Source: Bussière *et al.*, 2017 adaptée d'Aubertin *et al.*, 1999).

3.1.2 La couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC)

En climat tempéré, les CEBC sont une solution pratique et efficace pour limiter la génération du DMA (Bussière *et al.*, 2006, 2007; Dagenais *et al.*, 2006b). Cette technique consiste à recouvrir le parc à résidus de plusieurs couches de matériaux meubles présentant des propriétés granulométriques et hydriques différentes. Ces recouvrements sont constitués de 2 à 5 couches de matériaux distincts configurées de manière à créer des effets de barrière capillaire (Aubertin *et al.*, 2002), comme illustrés sur la figure 2.

Les effets de barrière capillaire sont créés lorsqu'un matériau fin (en référence à la couche de faible perméabilité ou couche de rétention d'humidité) est placé au-dessus ou en dessous d'un matériau plus grossier (couche de support ou de protection). Le contraste en termes de propriétés hydrogéologiques des matériaux limite la migration de l'eau vers le bas et vers le haut, ce qui favorise un haut degré de saturation de la couche de rétention d'humidité faite de matériau fin et qui permet de limiter les flux d'oxygène de l'atmosphère vers les résidus sulfureux réactifs. On reconnaît habituellement dans la littérature que des degrés de saturation supérieurs à 85-90 % permettent de réduire significativement les flux d'oxygène à travers la CEBC (Yanful, 1993; Aubertin *et al.*, 1999).

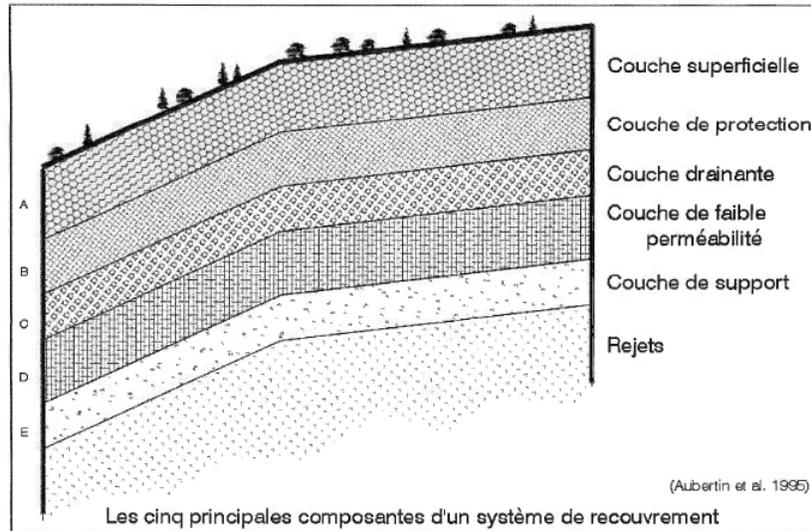


Figure 2 – Les différentes couches d'une couverture avec effets de barrière capillaire
(Source : Aubertin et al., 1995).

3.2 Caractéristiques (paramètres) clés de la végétation susceptibles d'influencer la performance des barrières à l'oxygène et plages de valeur associées

Pour prédire les effets à court, moyen et long termes de la végétation sur la performance des barrières à l'oxygène, on a recours à différents modèles numériques d'écoulement saturé-non saturé de l'eau (VADOSE/W[®], SEEP/W[®], SVFLUX[®] par exemple). Ces modèles de calcul du bilan hydrique peuvent intégrer différents types de paramètres liés à la végétation (MEND, 2014; GEO-SLOPE International Ltd, 2007, 2014, 2017; SoilVision Systems Ltd, 2019).

3.2.1 Les caractéristiques de la végétation utilisées comme paramètres d'entrée dans les modèles numériques de calcul du bilan hydrique des recouvrements

Il existe plusieurs caractéristiques de la végétation qui peuvent affecter dans une mesure variable le bilan hydrique des recouvrements utilisés en restauration minière. Dans cette section, nous allons traiter des principales caractéristiques de la végétation qu'on retrouve dans les modèles numériques les plus utilisés dans l'évaluation de la performance des barrières à l'oxygène.

3.2.1.1 Principales caractéristiques de la végétation utilisées comme paramètres d'entrée des modèles numériques

Les modèles numériques utilisés en restauration minière au Québec intègrent trois principaux paramètres liés à la végétation :

- l'indice de surface foliaire (LAI pour *leaf area index* en anglais), qui a été défini par Watson (1947) comme la surface totale de la face supérieure des feuilles par unité de surface du sol;
- la profondeur maximale d'enracinement ($R_{t_{max}}$ pour *maximal rooting depth* en anglais) qui fait référence à la profondeur maximale atteinte par les racines;
- la densité de longueur racinaire (RLD pour *root length density* en anglais) qui représente la longueur totale des racines par unité de volume du sol.

3.2.1.2 *Les modèles numériques utilisés dans l'évaluation de la performance des barrières à l'oxygène dans un contexte de CC au Québec*

Depuis leur lancement, VADOSE/W[®], SEEP/W[®] et SVFLUX[®] se sont rapidement imposés comme les modèles numériques les plus utilisés dans la conception des systèmes de recouvrement en contexte minier au Québec. Ces modèles à éléments finis simulent le transport de l'eau liquide, de la vapeur d'eau et de la chaleur en deux dimensions. Ils sont parmi les plus prisés en ingénierie minière parce qu'incluant la plupart des processus et des caractéristiques qui sont importants pour évaluer la performance des systèmes de recouvrement. Les aspects techniques des logiciels VADOSE/W[®] et SEEP/W[®] sont documentés par GEO-SLOPE International Ltd (2007; 2014, 2017) et ceux de SVFLUX[®] par SoilVision Systems Ltd (2019).

La version 2018 de SEEP/W[®] (GEO-SLOPE International Ltd, 2017) couple désormais les processus de VADOSE/W[®] 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 » (LCI pour '*land-climate interaction*' en anglais). 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 d'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).

Le logiciel SEEP/W[®] 2018 a été utilisé dans deux études récentes sur les effets des CC sur la performance des barrières à l'oxygène sur deux sites miniers: Westwood et Lorraine dans le cadre du projet Fonds de Recherche du Québec-Nature et Technologies (FRQNT) « CC et la restauration des sites miniers » (Lieber *et al.*, 2018; Lieber, 2019; Hotton *et al.*, 2018; Hotton, 2019; Hotton *et al.*, 2020). Les modélisations ont été faites dans SEEP/W[®] 2018 avec succès, mais l'effet de la végétation n'a pas été pris en compte. Un deuxième projet FRQNT « Influence de la végétation sur la performance de barrières à l'oxygène pour contrôler le DMA » vise à mieux prendre en compte l'effet de la végétation présente sur les parcs à résidus restaurés dans l'évaluation de la performance à long terme des méthodes de restauration utilisées (Guittonny *et al.*, 2018). Dans ce projet, les modélisations ont été aussi réalisées avec le modèle SEEP/W[®] 2018.

3.2.2 Sélection des valeurs pour les paramètres de la végétation à entrer dans les modèles numériques

L'approche utilisée pour la sélection des gammes de valeurs des paramètres de végétation à intégrer aux modèles numériques va dépendre de différents critères notamment les objectifs de la modélisation et le type de modèle numérique utilisé.

3.2.2.1 Selon les objectifs de la modélisation

En restauration minière, les modèles numériques qui intègrent des paramètres de la végétation peuvent être utilisés pour :

- maximiser l'influence (négative) de la végétation sur les composantes du bilan hydrique des barrières à l'oxygène afin d'évaluer le niveau de risques pour l'environnement lié à la perte de capacité du recouvrement à contrôler le DMA. Dans ce cas, il s'agira notamment de sélectionner des valeurs maximales de LAI, $R_{t_{max}}$ et de RLD à entrer dans les modèles numériques pour calculer les pertes maximales d'eau par transpiration dans certaines couches de la MNPS et de la CEBC;
- fournir au(x) modèle(s) numérique(s) des valeurs des paramètres de la végétation qui seront représentatifs des communautés végétales futures sous scénarios de CC d'un site ou d'une région donnée en prenant des valeurs moyennes. Avec les CC, certaines espèces déjà présentes pourront se maintenir, d'autres régresseront ou disparaîtront tandis que d'autres espèces nouvelles apparaîtront dans le paysage forestier. Des facteurs (coefficients) de pondération, calculés sur base de critères tels que les classes de vulnérabilité face aux CC, développées par Périé *et al.* (2014) pour les espèces forestières du Québec ou la dominance spécifique future en 2100, peuvent être utilisés pour obtenir des moyennes pondérées. Par exemple, dans le cas des scénarios de végétation sous CC au Québec, les espèces forestières peuvent être subdivisées en 3 grands groupes : les espèces les plus vulnérables aux CC (groupes A et B); les espèces moyennement vulnérables (groupes C et D) et les espèces les moins vulnérables (groupes E et F). Les espèces les moins vulnérables aux CC auront une pondération élevée, les espèces à vulnérabilité moyenne auront une pondération moyenne tandis que les plus vulnérables auront une pondération faible voire nulle;
- analyser la sensibilité du (des) modèle(s) numérique(s) en utilisant des plages de valeurs. Les modèles mathématiques décrivant les phénomènes réels contiennent 2 types d'incertitude : l'une qui est liée au modèle lui-même dû à la description physico-mathématique inexacte du système et l'autre liée aux paramètres du modèle et due aux erreurs d'estimation et de procédure adoptée dans la collecte des données expérimentales utilisées (Ratto *et al.*, 1996; Félix et Xanthoulis, 2005). Les analyses de sensibilité des modèles numériques pour évaluer la performance des barrières à l'oxygène permettront aux utilisateurs de ces modèles de savoir comment réagissent ces modèles par rapport aux paramètres d'entrée liés à la végétation. Ces analyses de sensibilité peuvent être considérées comme des investigations systématiques de la réaction des modèles numériques vis-à-vis des valeurs extrêmes (i.e. maximales et minimales) des paramètres de la végétation (Kleijnen, 1995).

3.2.2.2 Selon le type de modèle numérique utilisé

Dans la plupart des modèles numériques les plus couramment utilisés en restauration minière, les valeurs des paramètres de végétation sont à déterminer et à entrer par l'utilisateur. Selon le type de paramètre de la végétation, l'utilisateur doit entrer (manuellement) la valeur maximale du paramètre ou plusieurs valeurs du paramètre en fonction du temps traduisant l'évolution de ce paramètre au cours de la période de croissance végétale.

Par exemple, dans les modèles plus anciens comme HELP[®] (*Hydraulic Evaluation of Landfill Performance model*; Schroeder *et al.*, 1994), l'utilisateur doit entrer la valeur du LAI maximal tandis que dans les modèles plus récents comme VADOSE/W[®], SEEP/W[®] et SVFLUX[®], l'utilisateur doit entrer plusieurs valeurs de LAI.

Certains modèles numériques proposent à l'utilisateur une ou des fonctions prédéfinies d'un ou plusieurs paramètres et/ou donnent à l'utilisateur la possibilité d'introduire une fonction prédéfinie (en anglais : *add-in function*).

Par exemple, les dernières versions de VADOSE/W[®] et SVFLUX[®] contiennent une fonction prédéfinie de LAI en fonction du temps tandis que la nouvelle version de VADOSE/W[®] inclus sous la dénomination générale SEEP/W[®] n'offre plus cette possibilité. L'utilisateur doit maintenant entrer plusieurs valeurs de LAI en fonction du temps ou introduire une fonction prédéfinie.

3.3 Scénarios de végétation à l'horizon 2100

D'ici 2100, les variations des régimes de température et des précipitations dues aux CC vont induire un déplacement vers le nord des conditions environnementales sous lesquelles les espèces de plantes peuvent (sur)vivre et croître avec succès.

Pour besoin de simplicité, l'hypothèse suivante sera considérée pour les différents scénarios de végétation proposés : les espèces d'arbres sont capables de suivre le rythme des variations de températures et des précipitations dues aux CC, de migrer vers le nord et de se développer dans leur nouvel environnement à l'échelle du Québec.

Les scénarios de végétation proposés se basent sur des cartes présentant l'effet anticipé des CC sur l'habitat potentiel futur (i.e. d'ici 2100) des espèces arborescentes rencontrées dans l'ouest du Québec, plus précisément dans les zones où sont localisés les sites Westwood et Lorraine. Des cartes pour chaque espèce/scénario de Modèles de Circulation Générale sont disponibles sur le site web de Ressources naturelles Canada (<http://planhardiness.gc.ca/index.pl?m=9b&lang=fr>). Le modèle sélectionné pour générer ces cartes est le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération CanESM2.

Dans ce rapport, les scénarios de végétation proposés varient suivant trois types de projections climatiques : le plus optimiste (scénario faible, RCP 2.6), le modéré (scénario moyen, RCP 4.5) et le plus pessimiste (scénario élevé, RCP 8.5). Un accent est mis sur les espèces d'arbre ayant la

plus grande probabilité de présence dans les régions forestières entourant les sites Westwood et Lorraine.

4. ANALYSE QUALITATIVE DE L'INFLUENCE DES CC SUR LES PARAMÈTRES DE LA VÉGÉTATION UTILISÉS POUR ÉVALUER LA PERFORMANCE DES BARRIÈRES À L'OXYGÈNE : APPLICATION À DEUX SITES MINIERS DU QUÉBEC

Au Québec, il est plus que nécessaire, pour mieux s'adapter aux CC, d'anticiper leur impact potentiel sur l'efficacité à long terme des recouvrements du type barrières à l'oxygène (MNPS et CEBC) construits/mis en place sur différents sites miniers restaurés. Étant donné que certains de ces sites sont colonisés naturellement par des espèces d'arbres provenant de la forêt avoisinante, il importe de déterminer les effets des CC sur les paramètres de la végétation utilisés dans les modèles numériques pour mieux évaluer l'influence de la végétation future sur la performance de ces barrières à l'oxygène d'ici 2100.

4.1 Colonisation naturelle des arbres sur un site minier restauré avec une MNPS sous CC : cas du site Westwood

La mine d'or souterraine Westwood (48°15' N, 78°32' W) appartient à IAMGOLD Corporation® et est en activité depuis 2013. Le site a été utilisé par la mine d'or Doyon jusqu'en 2009, incluant l'opération d'une fosse à ciel ouvert qui a produit des roches stériles acidogènes de type schisteux.

4.1.1 Domaine bioclimatique incluant le site Westwood

Le site Westwood est situé dans la partie sud du domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc et à proximité de la frontière nord de la sapinière à bouleau jaune. Le paysage forestier de la sapinière à bouleau blanc est caractérisé par une dominance de peuplements de sapins (*Abies sp.*) et d'épinettes blanches (*Picea glauca*) mélangés à des bouleaux blancs (*Betula papyrifera*) sur les sites mésiques. Sur les sites moins favorables, l'épinette noire (*Picea mariana*), le pin gris (*Pinus banksiana*) et le mélèze (*Larix sp.*) sont souvent accompagnés de bouleaux blancs ou de peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*). Le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) et l'érable rouge (*Acer rubrum*) ne croissent que dans la partie sud du domaine (ministère des Ressources naturelles, 2003).

4.1.2 Relevés de végétation sur le site Westwood

Cinq inventaires ont été réalisés pour suivre l'évolution de la végétation naturelle sur le site Westwood de 1997 à 2006. Le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), le peuplier (*Populus sp.*), le sapin (*Abies sp.*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et le cerisier (*Prunus sp.*) ont été identifiés sur le site restauré et dans la forêt naturelle avoisinante (Cartier, 2006).

N'ayant pas de précisions sur l'espèce exacte identifiée pour les genres *Populus*, *Abies* et *Prunus*, nous allons nous baser sur les noms d'espèces caractéristiques de la sapinière à bouleau blanc

dans le développement des scénarios de végétation : le peuplier baumier (*Populus balsamifera*), le sapin baumier (*Abies balsamea*) et le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica*).

4.1.3 Scénarios de végétation à l’horizon 2100 pour le site Westwood

Le *tableau 1* présente la dynamique des espèces d’arbres dans la forêt proche du site Westwood sur base de 3 scénarios : le plus optimiste (scénario faible, RCP 2.6), intermédiaire (scénario modéré, RCP 4.5) et le plus pessimiste (scénario élevé, RCP 8.5).

Sur base du scénario le plus pessimiste sur les CC (RCP 8.5), certaines espèces arborescentes identifiées par les relevés de végétation réalisés sur le site Westwood présentent des risques sévères de mésadaptation aux futures conditions climatiques sur la (quasi)-totalité de leurs aires de répartition actuelles d’ici 2100 : bouleau blanc, épinette blanche, mélèze laricin (*Larix laricina*), sapin baumier.

D’autres espèces ayant leur aire de répartition actuelle autour de la mine Westwood risquent également d’être mal adaptées aux futures conditions climatiques : peuplier à grandes dents (*Populus grandidentata*), peuplier faux-tremble, épinette noire, pin gris.

De façon générale, les espèces suivantes seront favorisées par le réchauffement du climat au Québec et coloniseront de nouveaux habitats autour de la mine Westwood : érable à sucre (*Acer saccharum*), érable rouge, ostryer de Virginie (*Ostrya virginiana*) et tilleul d’Amérique (*Tilia americana*).

4.1.4 Changements attendus des gammes de valeurs de LAI, $R_{t_{max}}$ et RLD sur le site Westwood

Les espèces des forêts tempérées et boréales qui colonisent les sites miniers restaurés ont des caractéristiques morphologiques variées qui peuvent affecter la performance des recouvrements d’ingénierie (Guittonny *et al.*, 2018; MEND, 2014). Sous l’influence des CC, l’arrivée d’espèces à feuilles larges provenant des régions bioclimatiques situées dans la zone tempérée avec potentiellement des valeurs de LAI et $R_{t_{max}}$ plus élevées et donc à plus fort potentiel de transpiration que les espèces actuelles pourraient négativement affecter le bilan hydrique de la MNPS sur le site Westwood d’ici 2100.

Le *tableau 2* présente les valeurs de référence de LAI et $R_{t_{max}}$ des espèces forestières identifiées sur le site Westwood sous le climat actuel ainsi que des espèces qui seront présentes de manière plausible d’ici 2100 dans un contexte de CC. Les valeurs de LAI des espèces forestières proviennent d’une base de données du Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Centre (ORNL DAAC) au Tennessee (États-Unis) (Iio et Ito, 2014), et les valeurs de $R_{t_{max}}$ des espèces d’arbres sont obtenues à partir d’une base de données compilées par Fan *et al.* (2017) et/ou d’un document de travail du ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC, 2017).

Les feuillus et les conifères présentent une grande variabilité au niveau des valeurs de LAI. Dans le cas du scénario le plus pessimiste, des valeurs de LAI situées entre 1,2 et 8,1 sont attendues pour le site Westwood sur base des espèces forestières qui seraient présentes dans le paysage forestier d'ici 2100.

Dans les conditions climatiques actuelles, les feuillus qui colonisent le site Westwood ont des profondeurs d'enracinement de type superficiel à profond. Les espèces d'arbres conifères telles que le sapin baumier et l'épinette blanche ont des racines très superficielles alors que le pin gris a des racines profondes. Avec les CC, les arbres décidus avec des profondeurs d'enracinement de type moyen deviendront dominants dans la forêt entourant la mine Westwood où les arbres conifères à enracinement profond seront vraisemblablement moins présents.

Dans le cas du scénario le plus pessimiste, des valeurs de $R_{t_{max}}$ situées entre 0,4 et 2,1 m sont attendues pour le site Westwood sur base des espèces forestières qui seraient présentes d'ici 2100.

À notre connaissance, il n'existe pas de base de données compilées des valeurs de RLD pour différentes espèces forestières, mais il existe des études plus localisées où la RLD a été déterminée pour un certain nombre d'espèces de feuillus et conifères des forêts du Québec et ainsi que d'autres provinces canadiennes sur des sols naturels (Bauhus et Messier, 1999; Plante *et al.*, 2014) et sur des sols miniers (Lazorko, 2008; Guittonny *et al.*, 2018). Une étude, réalisée à l'échelle du globe par Schenk et Jackson (2002), a montré qu'en moyenne 50 % de la biomasse racinaire des arbres est localisé dans les 30 premiers centimètres du sol.

Tableau 1 – Scénarios de végétation pour 2100 sous changements climatiques pour les sites Westwood et Lorraine.

Espèces	Bouleau blanc	Bouleau jaune	Cerisier de Pennsylvanie	Érable à sucre	Érable rouge	Ostryer de Virginie	Peuplier à grandes dents	Peuplier baumier	Peuplier faux-tremble	Tilleul d'Amérique	Épinette blanche	Épinette noire	Mélèze laricin	Pin blanc	Pin gris	Pin rouge	Sapin baumier
Westwood																	
Climat actuel	X		X								X		X				X
Climat futur RCP 2.6	↗	↕	↕	↗	↗	↗	↕		↕		↕	↕	↕		↕		↕
Climat futur RCP 4.5	↕	↕	↕	↗	↗	↗	↕		↕		↕	↕	↕		↕		↕
Climat futur RCP 8.5	↘	↕	↕	↗	↗	↗	↘		↘		↘	↘	↘		↘		↘
Lorraine																	
Climat actuel	X		X					X	X			X	X	X	X	X	X
Climat futur RCP 2.6	↕	↕	↕	↗	↗	↗	↕	↕	↕	↗		↕	↕	↕	↕	↕	↕
Climat futur RCP 4.5	↕	↕	↕	↗	↗	↗	↕	↕	↕	↗		↕	↕	↕	↕	↕	↕
Climat futur RCP 8.5	↘	↕	↕	↕	↗	↗	↘	↕	↘	↕		↘	↘	↘	↘	↘	↘

X = Présence de l'espèce sur le site; ↗ = Augmentation de la présence; ↘ = Diminution de la présence; ↕ = Présence stable

Tableau 2 – Changements attendus des gammes de valeurs de LAI et Rt_{max} sur les sites Westwood et Lorraine.

Espèces	Bouleau blanc	Bouleau jaune	Cerisier de Pennsylvanie	Érable à sucre	Érable rouge	Ostryer de Virginie	Peuplier à grandes dents	Peuplier baumier	Peuplier faux-tremble	Tilleul d'Amérique	Épinette blanche	Épinette noire	Mélèze laricin	Pin blanc	Pin gris	Pin rouge	Sapin baumier
Indice de surface foliaire LAI (-)																	
Min	3,4	1,2	5,4	6,1	4,5	2,4	2,3	0,4	(-)	7,1	5,7	1,1	0,7	2,1	1,2	2,7	2,6
Max	5,9	5,7	6,3	8,1	7,2	4,4	6,0	5,5	(-)	(-)	6,4	9,0	1,8	12,8	5,5	8,7	9,9
Moy	4,4	2,8	5,7	7,1	5,8	3,3	3,8	2,6	(-)	(-)	6,0	4,3	1,3	5,7	2,8	5,3	6,0
Std	1,3	2,5	0,5	0,6	1,1	0,9	2,0	1,0	(-)	(-)	(-)	1,6	0,6	3,0	0,9	2,0	2,0
N	3	3	3	7	8	4	3	53	(-)	1	2	56	3	15	32	12	29
Profondeur maximale d'enracinement Rt_{max} (m)																	
Min	0,25	0,8	0,4	0,6	3,5	0,5	0,4	0,1	0,4	0,8	0,2	0,1	0,3	0,4	0,3	0,5	0,6
Max	1,0	1,5	0,6	1,5	(-)	(-)	1,3	2,9	ND	2,1	1,9	1,2	1,2	2,8	2,9	2,7	3,0
Moy	0,6	1,1	0,5	1,1	(-)	(-)	0,9	1,3	(-)	1,4	0,8	0,5	0,6	1,5	1,4	1,4	1,2
Std	0,3	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,4	0,9	(-)	(-)	0,5	0,3	0,4	0,8	0,7	0,4	0,6
N	5	2	2	2	1	1	3	13	(-)	2	28	28	5	7	11	24	20
Végétation présente actuellement																	
Westwood	X		X								X		X				X
Lorraine	X		X					X	X			X	X	X	X	X	X
Végétation en 2100 avec RCP8.5																	
Westwood		X	X	X	X				X	X							
Lorraine		X	X	X	X	X		X		X							

Min= Valeur minimale, Max=Valeur maximale, Moy=Moyenne, Std = Écart-type; N = nombre d'observations ou de références; ND = Non déterminé; X = Présence de l'espèce sur le site

4.2 Colonisation naturelle des arbres sur un site minier restauré avec une CEBC sous CC : cas du site Lorraine

Le parc à résidus abandonné et générateur d'acide de la mine Lorraine (Cu et Ni) (47°24' N; 79°00' W) a une superficie de 15 ha. Il a été restauré en 1999 par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec avec une CEBC à l'aide de matériaux naturels sableux et silteux. La CEBC du site Lorraine est composée de trois couches : une couche de rétention d'humidité de texture fine recouvrant une couche de bris capillaire de texture grossière et recouverte d'une couche de protection anti-évaporation et anti-bioinvasion (Aubertin *et al.* 1995).

4.2.1 Domaine bioclimatique incluant le site Lorraine

Le site Lorraine est situé dans la sapinière à bouleau jaune qui occupe la partie la plus nordique de la sous-zone de la forêt décidue. Moins diversifiée, sauf sur les meilleurs sites, la flore regroupe de nombreuses espèces boréales, largement répandues au Québec. Sur les sites mésiques, le bouleau jaune est l'une des principales essences compagnes de l'érable à sucre. Le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*), le chêne rouge (*Quercus rubra*) et la pruche du Canada (*Tsuga canadensis*) croissent aussi dans ce domaine, mais ils deviennent très rares au-delà de sa limite septentrionale. Ce domaine marque aussi la fin de l'aire de distribution du tilleul d'Amérique et de l'ostryer de Virginie (ministère des Ressources naturelles, 2003).

4.2.2 Relevés de végétation sur le site Lorraine

Sur la CEBC du site Lorraine, les espèces d'arbres identifiées sur le site sont : le peuplier baumier, le peuplier faux-tremble, le bouleau blanc, le sapin baumier, le pin gris, le pin rouge (*Pinus resinosa*) et l'épinette noire (Smirnova *et al.*, 2011). D'autres espèces, telles que le saule (*Salix* sp.), le cerisier de Pennsylvanie, le mélèze, l'aulne rugueux (*Alnus rugosa*) et le pin blanc (*Pinus strobus*), ont été identifiées en 2015 (Beaulieu, 2015). En 2015, le peuplier baumier, l'épinette noire et le peuplier faux-tremble constituaient les espèces d'arbres les plus abondantes.

4.2.3 Scénarios de végétation à l'horizon 2100 pour le site Lorraine

Le *tableau 1* présente la dynamique des espèces d'arbres dans la forêt environnant le site Lorraine sur base de 3 scénarios : le plus optimiste (scénario faible, RCP 2.6), intermédiaire (scénario modéré, RCP 4.5) et le plus pessimiste (scénario élevé, RCP 8.5).

Suivant le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5), certaines espèces arborescentes identifiées par les relevés de végétation réalisés sur le site Lorraine risqueront d'être mésadaptées aux nouvelles conditions climatiques sur la (quasi)-totalité de leurs aires de répartition actuelles d'ici 2100 : bouleau blanc, peuplier faux-tremble, épinette noire, mélèze laricin, pin gris, pin rouge, sapin baumier. D'autres espèces ayant leur aire de répartition actuelle autour du site Lorraine risquent également d'être mésadaptées aux futures conditions climatiques. Il s'agit par exemple du peuplier à grandes dents.

De façon générale, le bouleau jaune pourra encore se maintenir dans la région, tandis que de nouvelles espèces, favorisées par le réchauffement climatique, telles que l'érable rouge, l'érable à sucre, l'ostryer de Virginie et le tilleul d'Amérique, pourraient migrer plus au Nord et coloniser de nouveaux habitats autour du site Lorraine.

4.2.4 Changements attendus des gammes de valeurs de LAI, Rt_{max} et RLD sur le site Lorraine

Les feuillus et les conifères présentent une grande variabilité au niveau des valeurs de LAI. Dans le cas du scénario le plus pessimiste, on pourrait également s'attendre à des valeurs de LAI situées entre 1.2 et 8.1 pour le site Lorraine, en se basant sur les espèces forestières qui seraient présentes dans la région d'ici 2100 (*tableau 2*).

Dans les conditions climatiques actuelles, les feuillus présents sur le site Lorraine ont des profondeurs d'enracinement de type superficiel à moyen. Les conifères tels que le sapin baumier et l'épinette blanche ont des racines très superficielles alors que les pins (*Pinus sp.*) ont des racines profondes. Avec les CC, les arbres décidus avec des profondeurs d'enracinement de type moyen domineront le paysage forestier entourant le site Lorraine. Les conifères à enracinement profond vont vraisemblablement diminuer, voire disparaître dans la région.

Dans le cas du scénario le plus pessimiste, on pourrait s'attendre à des valeurs de Rt_{max} situées entre 0,4 et 2,9 m pour le site Lorraine sur base des espèces forestières qui seraient présentes d'ici 2100.

Comme dit plus haut, il n'existe pas de base de données publiée qui compile les valeurs de RLD pour différentes espèces forestières, mais il existe des études plus localisées où la RLD a été déterminée pour certaines espèces forestières du Québec ainsi que d'autres provinces canadiennes. En moyenne 50 % de la biomasse racinaire des arbres se retrouve dans les 30 premiers centimètres du sol (Schenk et Jackson, 2002)

5. CONCLUSION

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre d'un projet qui vise à aider l'industrie minière et les gouvernements provinciaux et fédéraux à mieux s'adapter aux CC en prenant en compte l'évolution de la végétation à long terme sur les sites miniers dans la conception des méthodes de restauration de ces sites.

Des scénarios de végétation à long terme sous CC et des plages de valeurs pour les principaux paramètres de la végétation (LAI et $R_{t_{max}}$) ont été proposés pour deux sites restaurés situés en Abitibi-Témiscamingue au Québec : la mine Westwood en Abitibi et le site Lorraine au Témiscamingue.

Avec les CC, les principaux risques de diminution de performance de la MNPS (à Westwood) et de la CEBC (à Lorraine) pourraient être associés à la colonisation des espèces forestières qui du sud vers le nord du Québec d'ici 2100.

Globalement, des valeurs moyennes de LAI et de $R_{t_{max}}$ attendues pour les sites Westwood et Lorraine ont été déterminées sur base de données collectées sur quelques espèces forestières qui seraient présentes ou non sur ces deux sites d'ici 2100 (RCP8.5). Des valeurs moyennes de LAI situées entre 2,6 et 7,1 et de $R_{t_{max}}$ situées entre 0,5 m et 1,4 m sont prévues sur les sites Westwood et Lorraine en 2100 (RCP8.5).

Il ressort de cette étude qu'il y a un manque criant de données sur la RLD des feuillus et des conifères particulièrement pour des espèces forestières qui s'établissent sur des recouvrements constitués de matériaux miniers recyclés.

Des efforts doivent être faits pour commencer à incorporer l'influence de la végétation et des CC dans la conception des recouvrements du type barrière à l'oxygène au Québec. Cette performance pourrait diminuer sensiblement notamment à cause de la modification des propriétés des matériaux ou du bilan hydrique par les espèces forestières qui colonisent les recouvrements. La dynamique de ces espèces et des processus écologiques associés sont eux-mêmes dépendants des conditions climatiques actuelles et futures..

6. RÉFÉRENCES

- Aubertin, M., Bussière, B., 1991. Étude préliminaire - Évaluation des barrières sèches construites à partir de résidus miniers alcalins. Rapport soumis au Centre de recherches minérales. Projet C.D.T. P1610, École Polytechnique de Montréal.
- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanes, A.-M., Gagnon, D., Barbera, J.-M., Aachib, M., Bedard, C., Chapuis, R.P., 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 rejets miniers. [CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechnique, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec.
- 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', in D Zekkos, A Farid, A De, KR Reddy & N Yesiller (eds), Proceedings of Geo-Chicago, American Society of Civil Engineers, Reston, pp. 343–358.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F., Tremblay, L., 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. École Polytechnique de Montréal, NEDEM/MEND Projet 2.22.2a.
- Bauhus, J., Messier, C., 1999. Soil exploitation strategies of fine roots in different tree species of the southern boreal forest of eastern Canada. *Can J For Res* 29:260-273.
- Beaulieu, A., 2015. Étude du recouvrement végétal sur la couverture à effet de barrière capillaire (CEBC) du site minier restauré Lorraine suite à l'entretien de la végétation. Rapport de stage effectué à l'IRME-UQAT sous la supervision de Marie Guittonny. Département de Biologie, Université du Québec à Montréal.
- Berteaux, D., Casajus, N., de Blois, S., 2014. Changements climatiques et biodiversité du Québec. Vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec, Québec, Québec, Canada.
- Bonebrake, T.C., Brown, C.J., Bell, J.D., Blanchard, J.L., Chauvenet, A., Champion, Chen, I.C., Clark, T.D., Colwell, R.K., Danielsen, F., Dell, A.I., Donelson, J.M., Evengård, B., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R.A., Griffis, R.B., Hobday, A.J., Jarzyna, M.A., Lee, E., Lenoir, J., Linnetved, H., Martin, V.Y., McCormack, P.C., McDonald, J., McDonald-Madden, E., Mitchell, N., Mustonen, T., Pandolfi, J.M., Pettorelli, N., Possingham, H., Pulsifer, P., Reynolds, M., Scheffers, B.R., Sorte, C.J.B., Strugnell, J.M., Tuanmu, M.-N., Twiname, S., Vergés, A., Vilanueva, C., Wapstra, E., Wernberg, T., Pecl, G.T., 2018. Managing consequences of

climate-driven species redistribution requires integration of ecology, conservation and social science. *Biological Reviews* 93:284-305.

Botula, Y.-D., Guittonny, M., Bresson, É., Bussière, B., 2019. Revue de littérature sur l'effet des changements climatiques sur les aires de répartition des essences clés de la forêt feuillue et boréale au Québec. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Buckley, L.B., Kingsolver, J.G., 2012. Functional and phylogenetic approaches to forecasting species' responses to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 43:205-226.

Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R.P., 2003. The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal* 40:512-535.

Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J.W., Chapuis, R.P., 2007. Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal* 44:245-265.

Bussière, B., Guittonny, M. (Eds), 2020. *Hard Rock Mine Reclamation. From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. CRC Press. Boca Raton. 408 Pages.

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.

Bussière, B., Maqsood, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., Julien, M.R., 2006. Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Québec. *CIM Bulletin* 99.

Cartier, P., 2006. Suivi du protocole expérimental: Utilisation de la végétation comme indicateur environnemental de perturbation. Rapport remis à Anne Blier, coordonnatrice à la protection de l'environnement, Doyon-Westwood.

Dagenais, A., Aubertin, M., Bussière, B., Cyr, J., 2006b. Performance of the Lorraine mine site cover to limit oxygen migration. *Transactions-society for mining metallurgy and exploration incorporated* 318, 190.

Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B., 2006a. Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. Paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis, MO, USA.

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, Québec, Canada.

- Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Otero-Casal, C., 2017, Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, no. 40, pp. 10572–10577.
- Félix, R., Xanthoulis, D., 2005. Analyse de sensibilité du modèle mathématique “Erosion Productivity Impact Calculator” (EPIC) par l’approche One-Factor-AtA-Time (OAT). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 9, 179–190.
- GEO-SLOPE International Ltd., 2007. *Vadose zone modeling with VADOSE/W 2007©: An engineering methodology*. 2nd Edition. Calgary, Alberta, Canada.
- GEO-SLOPE International Ltd., 2014. *Vadose zone modeling with VADOSE/W 2014©: An engineering methodology*. April 2014 Edition. Calgary, Alberta, Canada.
- GEO-SLOPE International Ltd., 2017. *Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018*. First Published August 2017. 2nd Edition. Calgary, Alberta, Canada.
- Guittonny, M., Bussière, B., Maqsoud, A., Proteau, A., Ben Khouya, T., Botula, Y.-D., 2018. Colonisation racinaire dans les recouvrements miniers et impact sur leur fonctionnement. *Proceedings of Symposium of Mines and the Environment 2018*, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.
- Lieber, E., 2019. Influence des facteurs climatiques sur la performance de la nappe phréatique surélevée combinée à un recouvrement monocouche. *Mémoire de maîtrise*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada.
- Lieber, E., 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 septembre 2018, Edmonton, Canada.
- Hotton, G., 2019. Influence des changements climatiques sur la performance de couverture à effets de barrière capillaire: étude du cas Lorraine. *Mémoire de maîtrise*, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada.
- Hotton, G., Bresson, É., Bussière, B., Pabst, T., Demers, I., Roy, P., 2018. Assessment of CCBE performance with climate change: case study of the Lorraine mine site. *Tailings and Mine Waste 2018*. 30 Septembre–2 Octobre 2018, Keystone, USA.
- Hotton, G., Bussière, B., Pabst, T., Bresson, É., Roy, P., 2020. Influence of climate change on the ability of a cover with capillary barrier effects to control acid generation. *Hydrogeology Journal* 28: 763-779.
- Iio, A., Ito, A., 2014. A Global Database of Field-observed Leaf Area Index in Woody Plant Species, 1932-2011, data set, Oak Ridge National Laboratory Distributed

Active Archive Center, Oak Ridge, USA, viewed 1 March 2019:
<http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1231>

INAP (International Network for Acid Prevention), 2009. Global acid rock drainage guide (GARD guide). Retrieved from <http://www.gardguide.com/>

IPCC, 2014. 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. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Kleijnen, J.P.C., 1995. Sensitivity analysis and related analyses: a survey of statistical techniques. Netherlands School of Management and Economics, Tilburg University, 24 p.

Lazorko, H.M., 2008. Root distribution, activity, and development for boreal species on reclaimed oil sand minesoils in Alberta, Canada. MSc Dissertation. Université de Saskatchewan, Canada.

Logan, T., Charron, I., Chaumont, D., Houle D., 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et ministère des Ressources naturelles et la Faune du Québec. 55p +annexes.

McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Lawrence, K., Campbell, K., Hutchinson, M.F., 2007. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience* 57:939-948.

MDDELCC (Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques), 2017. Arbres et arbustes à utiliser pour la végétalisation des terrains réhabilités par analyse de risque. MDDELCC. 34 pages. Site web : [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/index\(...\).pdf](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/index(...).pdf) [consulté en septembre 2019]

MEND, 1996. Review of use of an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings. MEND Report 2.17.1.

MEND, 2001. MEND Manual, Volume 4- Prevention and Control. MEND Report 5.4.2d.

MEND, 2014. Modelling the critical interactions between cover systems and vegetation. MEND Report 2.21.6.

MERN, 2016. Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. Gouvernement du Canada.

Ministère des Ressources naturelles, 2003. Zones de végétation et domaines bio-climatiques du Québec. Ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, Québec. Site web:

<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/zone-f.pdf>
[consulté en septembre 2019]

- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G.J., Bussière, B., 2006. The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: A laboratory and numerical modeling study. CD-ROM, 7th International Conference on Acid Rock Drainage, March 26-30, 2006.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., Zagury, G.J., 2007. Predicting the performance of an elevated water table for preventing acid mine drainage. GeoOttawa 2007 – 60th Canadian Geotechnical Conference. 21–25 octobre 2018, Ottawa, Canada.
- Ouranos, 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2014. Montréal, Québec : Ouranos, 79 p.
- Périé, C., De Blois, S., Lambert, M.-C., Casajus, N., 2014. Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces ligneuses au Québec. Mémoire de recherche forestière n. 173. Government of Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Québec, Québec, Canada.
- Plante, P.M., Rivest, D., Vézina, A., Vanasse, A., 2014. Root distribution of different mature tree species growing on contrasting textured soils in temperate windbreaks. *Plant Soil* 380:429-439.
- Price, D.T., Alfaro, R.I., Brown, K.J., Flannigan, M.D., Fleming, R.A., Hogg, E.H., Girardin, M.P., Lakusta, T., Johnson, M., McKenney, D.M., Pedlar, J.H., Stratton, T., Sturrock, R.N., Thompson, I.D., Trofymow, J.A., Venier, L.A., 2013. Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews* 21:322-365.
- Ratto, M., Lodi, G., Costa, P., 1996. Sensivity analysis of a fixed bed gas-solid TSA: the problem of design with uncertain models. *Sep. Technol.* 6, p. 235-245.
- Ressources Naturelles Canada, 2017. Distribution des espèces d'arbres. Distribution des espèces d'arbres. Site web:
<https://www.rncan.gc.ca/forets/changements-climatiques/changements-foresiers/17779>
[consulté en septembre 2019]
- Schenk, H.J., Jackson R.B., 2002. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs* 72:311-328.
- Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M., Zappi, P.A., 1994. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model. User's Guide for Version 3. EPA/600/R-94/168a. US EPA Risk Reduction Engineering Laboratory. Cincinnati, Ohio.

- Sittaro, F., Paquette, A., Messier, C., Nock, C.A., 2017. Tree range expansion in eastern North America fails to keep pace with climate warming at northern range limits. *Global Change Biology* 23:3292-3301.
- Smirnova, E., Bussière, B., Tremblay, F., Bergeron, Y., 2011. Vegetation succession and impacts of bioinvasion on covers used to limit acid mine drainage. *Journal of Environmental Quality* 40:133-143.
- SRK, 1989. Draft acid rock drainage technical guide, vol. I., Vancouver.
- SoilVision Systems, Ltd, 2019. SVFLUX™ 1D/2D/3D Saturated/Unsaturated Finite Element Groundwater Seepage Modeling. Theory Manual. SoilVision Systems, Ltd. Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Warren, F.J., et Lemmen, D.S., 2014. Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatifs aux impacts et à l'adaptation, [En ligne], Ottawa (On) : gouvernement du Canada, 286p.
- Site web: <https://www.rncan.gc.ca/environnement/ressources/publications/impacts-adaptation/rapports/evaluations/2014/16310> [consulté en septembre 2019]
- Watson, D.J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany* 11:41-76.
- Williamson, T.B., Colombo, S.J., Duinker, P.N., Gray, P.A., Hennessey, R.J., Houle, D., Johnston, M.H., Ogden, A.E., Spittlehouse, D.L., 2009. Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation. Réseau de gestion durable des forêts et Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). 112 p.
- Yanful, E.K., 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering* 119:1207-1228



ISBN 978-2-924231-28-9

