

Rapport
PU-2020-11-1348

***Guide de bonnes pratiques
en restauration minière
dans un contexte de
changements climatiques***

Pour :

**Direction générale de l'évaluation environnementale et stratégique
Ministère de l'Environnement et de la
Lutte contre les changements climatiques
675, boul. René-Lévesque Est, 6^e Étage, boîte 83
Québec (Québec) G1R 5V7**

Par :

**Bruno Bussière, Ph. D.
Thomas Pabst, Ph. D.
Émilie Bresson, Ph. D.
Marie Guittonny, Ph. D.
Isabelle Demers, Ph. D.
Gwendoline Hotton, M. Sc. A**



Unité de recherche et de service en technologie minérale
445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819-762-0971, poste 2558 | Télécopieur : 819-797-4727

FÉVRIER 2022

Table des matières

Page

Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des abréviations et des sigles.....	v
Avant-propos	1
1. Introduction.....	2
1.1 Mise en contexte	2
1.2 Objectifs et contenu du guide	3
2. Changements climatiques	5
2.1 Définitions et terminologie	5
2.1.1 Climat.....	5
2.1.2 Variabilité naturelle	5
2.1.3 Changement climatique	5
2.1.4 Gaz à effet de serre	5
2.1.5 Projections et modèles climatiques	6
2.1.6 Conditions typiques et extrêmes.....	7
2.1.6.1 Conditions typiques	7
2.1.6.2 Conditions extrêmes.....	7
2.2 Changements climatiques projetés au Québec	8
2.3 Évolution de la distribution des essences forestières liée aux changements climatiques ...	8
3. Impact des changements climatiques sur la performance de la restauration et approche d'adaptation	11
3.1 Barrières à l'oxygène	11
3.1.1 Recouvrement en eau	11
3.1.2 Nappe phréatique surélevée avec recouvrement monocouche.....	13
3.1.3 Couvertures avec effets de barrière capillaire	15
3.2 Barrières à infiltration d'eau	18
3.2.1 Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée.....	18
3.2.2 Recouvrement de type stockage-relargage	19
3.3 Recouvrement isolant	20
3.4 Recouvrements végétalisés.....	22
3.4.1 Effets de la végétation sur le bilan hydrique des recouvrements	22
3.4.2 Inclusion de l'effet de la végétation dans la prédiction numérique de la performance des recouvrements.....	23
3.4.3 Effet des changements climatiques sur les communautés de plantes et la prédiction de la performance à long terme des recouvrements végétalisés.....	23
3.5 Autres considérations.....	24

4. Intégration des changements climatiques dans l'approche de conception	26
4.1 Approche de conception générale des ouvrages de restauration et changements climatiques.....	26
4.1.1 Approche de conception générale des ouvrages de restauration	26
4.1.2 Intégration des changements climatiques dans l'approche générale des ouvrages de restauration.....	27
4.1.3 Approche d'évaluation du risque	28
4.2 Approche pour identifier les conditions climatiques typiques et extrêmes.....	30
4.2.1 Barrières à l'oxygène	31
4.2.2.1 Recouvrement en eau.....	31
4.2.2.2 Couvertures avec effets de barrière capillaire et nappe phréatique surélevée avec recouvrement monocouche.....	33
4.2.2 Barrières à l'eau.....	35
4.2.3 Recouvrement isolant	36
4.2.4 Autres considérations.....	37
5. Disponibilité et accessibilité aux données.....	40
5.1 Obtention de données climatiques : sources et approches.....	40
5.1.1 Sources d'informations climatiques.....	40
5.1.2 Climat passé.....	40
5.1.3 Climat futur.....	41
5.1.3.1 Projections climatiques.....	41
5.1.3.1.1 Scénarios climatiques	41
5.1.3.1.2 Deltas	44
5.1.3.2 Analogues climatiques	44
5.1.3.3 Scénarios synthétiques (What if).....	44
5.2 Disponibilité et accessibilité aux données sur la distribution des essences forestières....	45
6. Conclusion	46
7. Références.....	48
Annexe A Liste des intervenants et comptes rendus des rencontres avec les compagnies minières, les consultants en restauration minière et les chercheurs travaillant dans le domaine	60
Annexe B Sources d'incertitudes dans les projections climatiques.....	61
Annexe C Effets des changements climatiques sur les paramètres climatiques d'intérêt, les impacts potentiels et les bonnes pratiques d'adaptation pour chaque méthode de restauration.....	63
Annexe D Récapitulatif de l'approche de conception générale en fonction des phases de développement d'un projet minier.....	66
Annexe E Grille de validation pour intégrer les changements climatiques au plan de restauration.....	69

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'évolution de la répartition de l'habitat d'une essence forestière, le pin gris (<i>Pinus banksiana Lamb.</i>) : a) répartition observée 1961-1990; b) modélisation de l'habitat favorable à la présence de l'espèce en 2080.....	10
Figure 2 : Exemples de deux sites en Abitibi-Témiscamingue (Québec) où un recouvrement en eau est utilisé a) Mine Louvicourt : construction de digues étanches et b) Site Don Rouyn : utilisation d'une carrière.....	12
Figure 3 : Processus affectant la performance des recouvrements en eau avec les principaux paramètres climatiques d'influence encadrés en rouge	12
Figure 4 : Technique de la NPS avec recouvrement monocouche mise en place sur le parc à résidus #2 du site Manitou (Abitibi-Témiscamingue, Québec)	14
Figure 5 : Bilan hydrique d'un parc à résidus restauré par la technique de la NPS avec recouvrement monocouche; les principaux paramètres climatiques d'influence sont encadrés en rouge	14
Figure 6 : Principales composantes du bilan hydrique et principaux paramètres climatiques (encadrés en rouge) d'une CEBC typique mise en place sur un parc à résidus.....	16
Figure 7: Tranchée creusée dans la CEBC du site Lorraine (Abitibi-Témiscamingue, Québec) ...	17
Figure 8 : Configuration typique de recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée avec comme couches de faible perméabilité a) un géocomposite bentonitique (GCB) et une géomembrane; b) une argile compactée et une géomembrane. Les principales composantes du bilan hydrique et principaux paramètres climatiques pouvant affectés la performance du système (encadrés en rouge) sont présentés en b)	18
Figure 9 : Exemple de recouvrement isolant sur le site minier Meadowbank (Nunavut): a) Cellules de terrain sur le parc à résidus; b) Représentation schématique et instrumentation ...	20
Figure 10 : Profil typique des températures associé aux recouvrements isolants et principaux paramètres climatiques d'influence encadrés en rouge	21
Figure 11 : Approche généralisée de conception des modes de restauration des sites miniers.	26
Figure 12 : Exemple de représentation de l'analyse du risque vs la vulnérabilité des ouvrages face aux CC et évaluation du niveau de détails des projections climatiques requis (vert, jaune ou rouge).....	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Techniques de restauration des aires d'accumulation de rejets miniers réactifs présentées dans ce guide	3
Tableau 2 : Liste d'organismes reconnus et pouvant être consultés pour obtenir de l'information climatique	40
Tableau 3 : Liste des bases de données climatiques historiques	41
Tableau 4 : Données climatiques disponibles sous forme de séries temporelles ou de moyennes provenant de scénarios climatiques	42
Tableau 5 : Liste des portails et documents permettant de récupérer de l'information climatique	43

Liste des abréviations et des sigles

AR6 :	6 ^e rapport d'évaluation du GIEC (pour <i>6th assessment report</i>)
CC :	Changements climatiques
CCNUCC :	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEBC :	Couverture avec effets de barrière capillaire
CMIP5 :	Projet d'intercomparaison des modèles couplés (pour <i>coupled model intercomparison project</i>)
CMP :	Crue maximale probable
D019 :	Directive 019 sur l'industrie minière
DMA :	Drainage minier acide
DMC :	Drainage minier contaminé
DNC :	Drainage neutre contaminé
EMP :	Enneigement maximal probable
GCB :	Géocomposite bentonitique
GES :	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GM :	Géomembrane
I _{at} :	Indice de dégel
I _m :	Index d'humidité annuel
IRME :	Institut de recherche en mines et en environnement
LAI :	Indice de surface foliaire (pour <i>leaf area index</i>)
MCG :	Modèles climatiques globaux
MCR :	Modèles climatiques régionaux
MELCC :	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN :	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MFFP :	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
NPS :	Nappe phréatique surélevée
PMP :	Précipitation maximale probable
RCP :	Scénarios de trajectoire du forçage radiatif (pour <i>representative concentrations pathways</i>)
RLD :	Densité de longueur de racines (pour <i>roots length density</i>)
RNCan :	Ressources Naturelles Canada
Rt _{max} :	Profondeur maximale d'enracinement (pour <i>maximal rooting depth</i>)
SMC :	Service météorologique du Canada
s.o. :	Sans objet
S _r :	Degré de saturation
SR :	Recouvrement de type stockage-relargage
SSP :	Trajectoires socioéconomiques partagées (pour <i>shared socioeconomic pathways</i>)
TRH :	Temps de résidence hydraulique
UQAT :	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
URSTM :	Unité de recherche et de service en technologie minière

Avant-propos

Ce guide a été rédigé par une équipe composée de professeurs de l'Institut de recherche en mines et en environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et Polytechnique Montréal, d'une spécialiste en science du climat et services climatiques du consortium Ouranos et d'une agente de recherche de l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) à la demande du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

Le guide a comme objectif d'identifier les enjeux liés à la restauration minière dans un contexte de changements climatiques. De manière plus spécifique, il vise à identifier les éléments susceptibles d'être influencés par les changements climatiques et qui doivent être considérés lors du choix de la méthode de restauration afin de s'assurer de maintenir un niveau de performance acceptable à long terme.

Le contenu ainsi que les recommandations et conclusions du guide représentent uniquement l'avis des auteurs et n'engagent en rien le MELCC.

L'avis des auteurs s'appuie sur une revue de la littérature ainsi que sur la consultation d'une douzaine d'experts du domaine de la restauration des sites miniers. Collectivement, ce groupe d'experts possède une large connaissance de la restauration et de ses enjeux. Les experts consultés proviennent majoritairement du secteur privé et l'équipe de rédaction provient des secteurs public et académique.

Ce guide permet donc d'outiller le gouvernement et les concepteurs de plan de restauration et de réaménagement afin de mieux intégrer les changements climatiques à l'étape du choix des techniques de restauration et de la conception des ouvrages.

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Le *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec* (MERN, 2017) indique que « le requérant doit choisir la technique de restauration et concevoir les ouvrages qui resteront sur place après la fermeture de l'exploitation minière en tenant compte des changements climatiques ». Il présente notamment les exigences minimales relatives aux changements climatiques (CC) dont les requérants doivent tenir compte lors de l'élaboration de leur plan de réaménagement et de restauration. Cependant, peu d'outils sont disponibles pour répondre adéquatement à ces exigences. C'est dans ce contexte que le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) a mandaté l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) en collaboration avec les professeurs de l'Institut de recherche en mines et en environnement (IRME) de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et Polytechnique Montréal, afin de rédiger le présent rapport qui vise à outiller davantage les requérants dans cette prise en compte, en mettant l'emphase sur les bonnes pratiques de restauration à appliquer dans un contexte de CC. Afin de mieux définir les outils et les données disponibles, des rencontres ont été organisées avec des experts en sciences du climat et en végétation ainsi qu'avec des professionnels ayant des expertises en lien avec le domaine de la restauration des sites miniers. À la suite d'une de ces rencontres, il a été convenu d'ajouter une chercheuse du consortium Ouranos à l'équipe de rédaction. Il est à noter que ce guide a été produit en 2022 et fait référence aux ressources publiquement disponibles au moment de sa publication.

Les techniques de restauration considérées dans le présent guide sont celles utilisées pour limiter l'oxydation et la lixiviation des métaux présents dans les stériles et les résidus miniers réactifs, ci-après nommés « rejets miniers réactifs ». Ces techniques ainsi que le récapitulatif de leur fonctionnement et de leurs objectifs sont présentés au *Tableau 1*. Le terme « drainage minier contaminé » (DMC) est utilisé dans ce guide, ce qui permet d'intégrer autant les notions de drainage minier acide (DMA) que de drainage neutre contaminé (DNC).

Dans ce guide, la mise en végétation ou végétalisation est traitée comme une composante de certains systèmes de recouvrement qui peut influencer leur performance à long terme. De plus, comme les CC devraient changer la répartition des espèces végétales sur le territoire ainsi que la fréquence des feux et des épidémies d'insectes, il est essentiel d'intégrer cet aspect dans l'analyse de l'influence des CC sur la performance des systèmes de recouvrement.

Tableau 1 : Techniques de restauration des aires d'accumulation de rejets miniers réactifs présentées dans ce guide

Catégorie	Technique		Objectifs
Barrière à l'oxygène	Ennoieiment		Maintenir une couverture d'eau directement au-dessus des rejets miniers, afin de limiter la migration de l'oxygène et empêcher leur oxydation.
	Recouvrement monocouche avec nappe phréatique surélevée (NPS)	Végétalisation	Rehausser le niveau naturel de la nappe phréatique afin de maintenir les rejets miniers saturés, afin de limiter la migration de l'oxygène et empêcher leur oxydation.
	Couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC)		Système multicouche visant à contrôler la diffusion de l'oxygène et à réduire les infiltrations d'eau jusqu'aux rejets miniers réactifs.
Barrière à infiltration d'eau	Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée		Système multicouche habituellement constitué d'un ou de plusieurs types de matériaux peu perméables (sols ou matériaux géosynthétiques) visant à limiter l'infiltration d'eau.
	Recouvrement de type stockage-relargage (SR)*		Contrôler les infiltrations d'eau en climats sec. Stocker l'eau durant les périodes humides et la libérer par évaporation ou évapotranspiration durant les périodes sèches.
Recouvrement isolant			Intégrer les rejets miniers au pergélisol continu en climat arctique afin de contrôler leur oxydation et limiter la propagation des contaminants par le gel de l'eau.

* Cette technique étant peu applicable dans un contexte de climat tempéré, elle n'est présentée que brièvement dans le guide.

1.2 Objectifs et contenu du guide

Le principal objectif du guide est d'identifier les enjeux liés à la restauration minière dans un contexte de CC. De manière plus spécifique, il vise à identifier les éléments susceptibles d'évoluer en raison des CC qui doivent être considérés lors du choix de la méthode de restauration afin de s'assurer de maintenir un niveau de performance acceptable à long terme. Il vise enfin à présenter des bonnes pratiques afin que les concepteurs de plans de restauration et de réaménagement puissent mieux intégrer les CC à l'étape du choix des techniques de restauration et de la conception des ouvrages.

De manière plus détaillée, ce guide présente au Chapitre 2 des notions de base concernant les CC ainsi qu'un résumé des CC projetés au Québec. Les projections en termes d'évolution de la distribution des espèces forestières en raison des CC y sont également présentées. Le Chapitre 3 présente les principales méthodes de restauration pour contrôler la génération de DMC ainsi que les impacts potentiels que pourraient avoir les CC sur leur performance à long terme. Les principales considérations qui doivent être étudiées afin de limiter les impacts et risques associés aux CC sont présentées en fonction des différentes infrastructures qui demeureront au-delà de la phase d'exploitation de la mine (ouvrages de restauration, infrastructures de gestion des eaux, etc.) ainsi que de l'évolution de la végétation installée sur les sites restaurés. Le Chapitre 4 présente d'abord une approche de conception générale des ouvrages de restauration des sites miniers. L'emphase est ensuite mise sur l'intégration des CC dans cette approche de conception

et l'identification de bonnes pratiques. Une méthode d'appréciation du risque est également fournie afin de guider les requérants vers une priorisation des mesures d'adaptation à mettre en place. Enfin, le Chapitre 5 présente une liste d'organismes qui peuvent être consultés pour trouver des données au sujet du climat présent et futur ou des changements anticipés en raison des CC dans la distribution des essences forestières.

Des annexes viennent compléter les informations contenues dans ce guide. L'*annexe A* présente les comptes rendus des rencontres tenues avec des représentants des compagnies minières et des consultants spécialisés en restauration minière. La première rencontre a été organisée au démarrage de la rédaction du guide pour cibler les enjeux rencontrés lors de la préparation du plan de restauration. La deuxième rencontre a quant à elle été organisée avant la finalisation du guide et a permis d'évaluer si son contenu répondait correctement aux enjeux soulevés. L'*annexe B* identifie les sources d'incertitudes dans les projections climatiques. Les annexes C et D synthétisent les informations du guide sous forme de tableau afin d'outiller les requérants dans la prise en compte des CC. L'*annexe E* fournit une grille de validation permettant d'évaluer si la démarche choisie pour intégrer les CC dans la conception des ouvrages de restauration est complète.

2. Changements climatiques

2.1 Définitions et terminologie

Ce chapitre présente la définition de certains termes importants en lien avec le climat utilisés dans ce guide.

2.1.1 Climat

Le climat correspond à une « moyenne à long terme qui décrit le genre de temps ou les conditions météorologiques caractéristiques d'une zone, d'une région, d'une province ou d'un pays. [Le climat est une] synthèse des conditions météorologiques quotidiennes d'une zone donnée, le climat est représenté par un ensemble de statistiques rassemblées pendant une certaine période, souvent de 30 ans ou plus » (ECCC, 2018).

2.1.2 Variabilité naturelle

La variabilité naturelle est la « variabilité décrivant les changements à court terme qui se produisent au fil des mois, des saisons et des années. Elle est due aux variations naturelles des forces externes telles que les modifications du rayonnement solaire ou des volcans, ainsi que des variations de processus internes, tels que ceux liés aux interactions des océans et de l'atmosphère, qui se produisent par exemple dans l'océan Pacifique lors d'un événement El Niño » (Données climatiques Canada, 2021).

2.1.3 Changement climatique

Le changement climatique correspond à une « variation de l'état du climat, qu'il est possible de déceler (ex. : au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les CC peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les CC comme des « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ». La CCNUCC établit ainsi une distinction entre les CC attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat imputable à des causes naturelles » (IPCC, 2014).

2.1.4 Gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre (GES) sont les « composantes gazeuses de l'atmosphère, tant naturelles qu'anthropiques, qui absorbent et émettent des radiations à des longueurs d'onde particulières et qui causent l'effet de serre. Ces gaz absorbent et émettent de l'énergie thermique infrarouge (chaleur). Les principaux GES sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃). Sans aucun GES dans l'atmosphère, la température de la Terre serait trop froide pour soutenir la vie actuelle. Cependant, une

concentration trop élevée de GES dans l'atmosphère pourrait causer un niveau de réchauffement planétaire dangereux » (Données climatiques Canada, 2022).

2.1.5 Projections et modèles climatiques

Une projection climatique est « la partie future des simulations de modèles climatiques qui prend en compte un scénario d'émission de GES. De ce fait, elle est basée sur des hypothèses portant notamment sur les développements socioéconomiques et technologiques futurs qui peuvent ou non se produire » (Données climatiques Canada, 2022).

Les modèles climatiques sont une « représentation numérique du système climatique, basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes, leurs interactions et leurs processus de rétroaction, et qui représentent la plupart de ses propriétés connues » (Données climatiques Canada, 2022). Il existe des modèles climatiques globaux (MCG), dont le domaine couvre l'ensemble de la planète, et des modèles climatiques régionaux (MCR), qui sont appliqués sur une région spécifique et qui prennent comme conditions aux frontières des résultats produits par des simulations de MCG.

Un scénario d'émission de GES est une « représentation plausible du développement futur des émissions de substances à effet radiatif potentiel dans l'atmosphère, comme les GES et les aérosols. Ces scénarios sont basés sur des hypothèses quant aux forces sous-jacentes, comme le développement socioéconomique et démographique ou le changement technologique. » (Données climatiques Canada, 2022). Il existe différents scénarios d'émissions. Dans le *5^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (AR5; IPCC, 2013)*, ces scénarios sont appelés « *representative concentration pathways* » (RCP) et représentent le forçage radiatif futur découlant de diverses hypothèses socio-économiques et politiques plausibles. Les RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sont respectivement appelés scénarios d'émissions faibles, modérées et élevées. Dans le *6^e Rapport d'évaluation du GIEC (AR6; IPCC, 2021)*, les scénarios d'émissions prennent en considération à la fois le forçage radiatif futur et les trajectoires socioéconomiques partagées (« *shared socioeconomic pathways* », SSP) représentant différentes évolutions socioéconomiques liées à différentes politiques climatiques. Les principaux scénarios utilisés dans l'AR6 sont SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5, du plus optimiste au plus défavorable.

Les projections climatiques sont soumises à trois sources d'incertitudes : la variabilité naturelle du climat, les incertitudes structurelles du modèle climatique et le scénario d'émissions considéré (voir *annexe B* pour détails). Des méthodes de post-traitement existent et permettent de corriger le biais des projections climatiques en se basant sur un produit de référence (observations ou réanalyses). Ces projections climatiques post-traitées sont appelées scénarios climatiques. Le calcul de statistiques et les probabilités sur des périodes assez longues, soit minimalement 20 et préférentiellement 30 ans, permettent de limiter l'influence de la variabilité naturelle du climat sur les projections climatiques.

Utiliser un ensemble de plusieurs modèles de climat est fortement recommandé pour avoir un ensemble robuste de projections climatiques et compenser l'impact des incertitudes structurelles des différents modèles. Afin de prendre en compte l'incertitude des hypothèses

concernant les émissions futures de GES et leur impact sur le climat, il est aussi recommandé d'utiliser plusieurs scénarios d'émissions.

2.1.6 Conditions typiques et extrêmes

2.1.6.1 Conditions typiques

Dans la suite du guide, le terme « conditions typiques » correspond à des conditions climatiques représentant le climat de la région d'intérêt. Il existe plusieurs méthodes pour définir ces conditions typiques. Pour les conditions typiques historiques, il peut s'agir des observations météorologiques de surface proches du site d'intérêt (Alam *et al.*, 2020; Bashir *et al.*, 2020; Hotton *et al.*, 2020; Lieber *et al.*, 2021). Pour les conditions typiques futures, il peut s'agir, par exemple, de la moyenne d'un ensemble de projections climatiques ou d'une sélection de projections climatiques (Alam *et al.*, 2020; Bashir *et al.*, 2020; Hotton *et al.*, 2020; Lieber *et al.*, 2021). En termes de bonnes pratiques, l'utilisateur se doit de justifier son choix quant à la méthode de sélection des conditions typiques de son site. L'utilisateur peut se baser sur des techniques présentées dans la littérature citée précédemment.

2.1.6.2 Conditions extrêmes

Les conditions extrêmes sont des conditions climatiques qui prennent en compte un événement extrême isolé ou une combinaison d'événements extrêmes menant à des conséquences sur une infrastructure.

Le concept de conditions extrêmes est important lorsque l'on aborde l'influence des CC sur les infrastructures. Ce concept est présenté de façon différente selon que l'on soit un expert du climat ou un concepteur d'infrastructures. L'expert du climat s'attarde davantage à la probabilité qu'une valeur d'un paramètre météorologique (ex. : précipitations sur 24 heures) soit au-dessus ou en-dessous d'une valeur limite (ex. : les précipitations extrêmes sont parfois définies par la valeur annuelle du 99^e centile). Le concepteur d'infrastructures intégrera, quant à lui, la notion de durée de vie de l'ouvrage et de risque acceptable; le risque étant défini par la probabilité d'occurrence d'un événement multipliée par ses conséquences. Ainsi, un événement considéré extrême pour un expert du climat pourrait ne pas être considéré extrême ou à risque par un ingénieur (pour une infrastructure donnée) en raison de la faible probabilité que l'événement se produise durant la durée de vie de l'ouvrage et/ou des faibles conséquences de celui-ci (Bussière et Guittonny, 2021).

De plus, la situation extrême mettant à risque une infrastructure résulte parfois d'une combinaison d'événements et non d'un seul événement extrême (Seneviratne *et al.*, 2012). Par exemple, une infrastructure de retenue d'eau pourrait avoir à gérer des quantités d'eau plus importantes après une forte précipitation, qui coïncide avec la fonte des neiges, plutôt qu'au cours d'un événement de précipitation extrême se produisant de façon isolée. Ces situations extrêmes composées de plusieurs événements successifs, sur une plus ou moins longue période ou de façon simultanée sont présentées dans la littérature sous le terme « événements combinés ». L'étude de ces événements combinés est relativement nouvelle en science du climat et la capacité des modèles climatiques à les reproduire a été très peu explorée au moment de la rédaction de ce guide.

2.2 Changements climatiques projetés au Québec

L'étude de Roy (2015) présente les effets des CC projetés au Québec au travers d'une analyse détaillée des projections climatiques pour six régions minières du Québec ayant des climats différents. D'autres études et rapports présentent les effets des CC projetés au Québec (Ouranos, 2015; Cohen *et al.*, 2019; IPCC, 2021). Dans l'ensemble de ces documents, les projections indiquent les changements suivants :

- Une hausse des températures moyennes annuelles. Ces hausses sont plus importantes en hiver qu'en été, et plus importantes au nord de la province en hiver et au sud en été;
- Une hausse des températures minimales et maximales journalières;
- Une forte augmentation de la durée des vagues de chaleur, ainsi que de la fréquence des nuits chaudes (température minimale > 20 °C; Ouranos, 2015) sur l'ensemble du territoire;
- Un allongement des périodes de sécheresse durant la saison estivale;
- Une forte réduction du nombre de jours de gel par an (température minimale journalière sous les 0°C), et du nombre de nuits et de jours froids, ainsi qu'un raccourcissement des périodes de gel, particulièrement dans le nord de la province, et de la durée des vagues de froid;
- Une augmentation des précipitations moyennes au printemps et en hiver sur l'ensemble du Québec ainsi qu'une faible augmentation au centre et au nord du Québec en été et en automne;
- Une augmentation des cumuls des précipitations maximales, plus marquée dans le sud que dans le nord; une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements intenses de précipitations;
- Une augmentation des débits hivernaux moyens des rivières, une diminution de la neige au sol particulièrement dans le sud du Québec, une diminution de la durée de l'enneigement et des conditions plus sèches du sol.

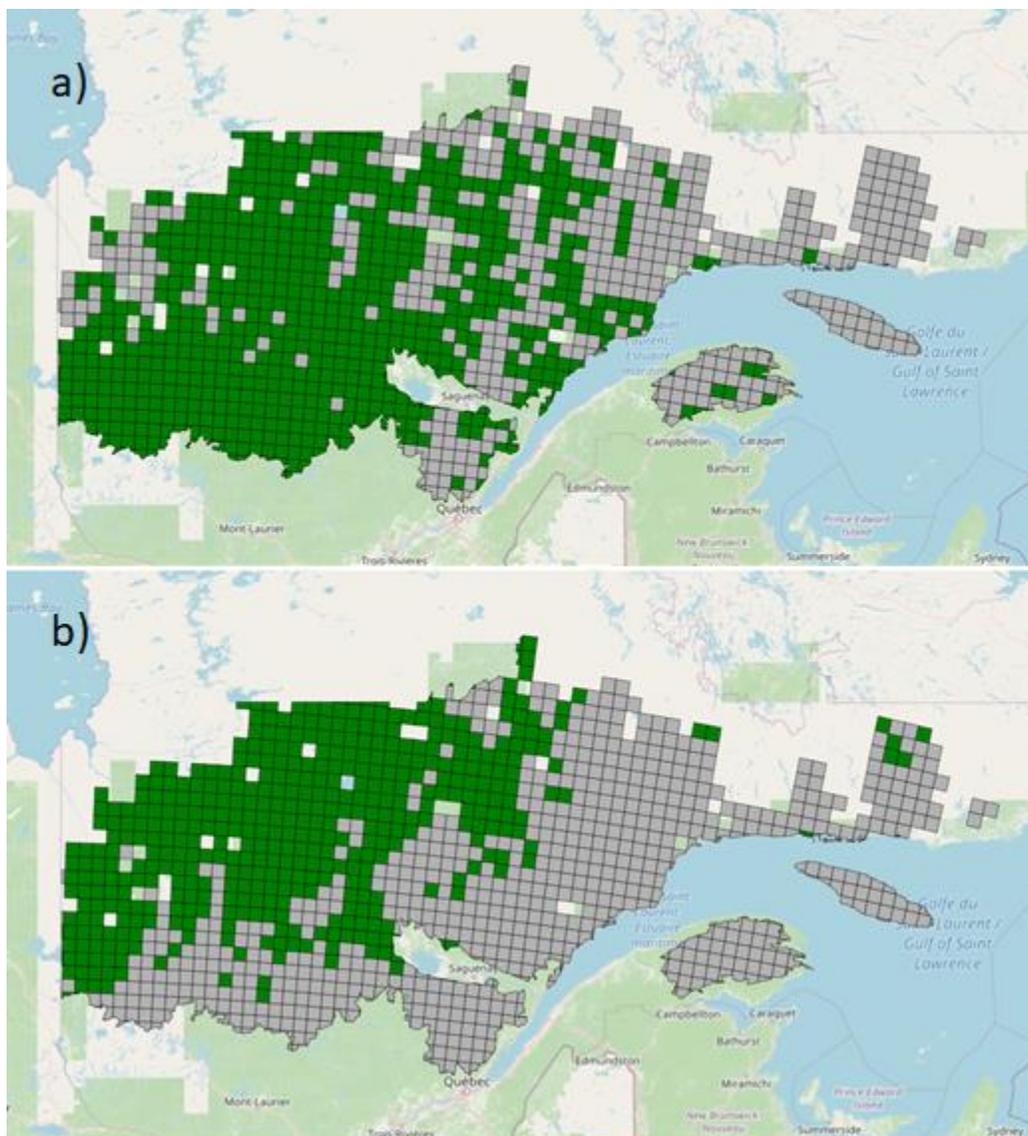
À noter que des données plus précises pour différentes régions minières du Québec, pour différents scénarios climatiques et pour différents horizons de temps, peuvent être consultées dans Roy (2015).

2.3 Évolution de la distribution des essences forestières liée aux changements climatiques

En milieu forestier, la végétation des sites restaurés devrait évoluer à long terme vers un couvert arborescent (concept de succession végétale; Clements, 1916). Puisque les forêts recouvrent plus de la moitié du territoire québécois, il est recommandé de concevoir des méthodes de restauration en intégrant la présence éventuelle d'essences forestières sur les recouvrements. Le choix de la liste d'espèces d'arbres et d'arbustes potentiellement présentes à long terme sur les sites miniers restaurés devrait tenir compte des CC car ceux-ci auront un effet sur la distribution des espèces d'arbres et la composition des forêts.

Trois principaux facteurs influencent la distribution des espèces végétales : le climat, la topographie et le sol (Chapin *et al.*, 2011). Les deux principaux facteurs climatiques sont la température et les précipitations. Ainsi, les CC, en changeant la distribution spatiotemporelle de la température et de l'humidité, vont potentiellement changer la distribution de ces espèces et affecter la structure et le fonctionnement des écosystèmes (McKenney *et al.*, 2007; Price *et al.*, 2013; Boulanger *et al.*, 2017). Des travaux sur le sujet ont permis d'établir des cartes de l'évolution de la distribution des espèces végétales en lien avec les CC (Périé *et al.*, 2009 - présent). Cependant, leur capacité à coloniser les nouvelles zones climatiques qui leur seront favorables reste encore incertaine (Loarie *et al.*, 2009).

Au Canada, une migration de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord des espèces d'arbres présentes actuellement plus au sud est attendue (Berteaux *et al.*, 2014; Boisvert-Marsh *et al.*, 2014; McKenney *et al.*, 2011; Périé *et al.*, 2014; Rogers *et al.*, 2016), avec pour conséquence une diminution de la présence de conifères au profit des feuillus dans plusieurs régions (Price *et al.*, 2013). Par exemple, un déplacement vers le nord de l'habitat du pin gris est prédit pour la zone de végétation boréale au Québec (*Figure 1*). Les effets des CC contribueront aussi à augmenter la fréquence des feux et celle des épidémies d'insectes dans la forêt canadienne, ce qui devrait rajeunir la forêt et favoriser les essences pionnières et adaptées au feu (ex. : peuplier faux-tremble, bouleau blanc, pin gris; Boulanger *et al.*, 2017).



Tirée de Périé et al., 2009-en cours

Figure 1 : Exemple d'évolution de la répartition de l'habitat d'une essence forestière, le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) : a) répartition observée 1961-1990; b) modélisation de l'habitat favorable à la présence de l'espèce en 2080

3. Impact des changements climatiques sur la performance de la restauration et approche d'adaptation

Lorsque les rejets produits par une exploitation minière sont potentiellement générateurs de DMC, il est essentiel de planifier une stratégie qui visera à prévenir la contamination de l'environnement durant les phases d'exploitation et de fermeture. Il existe différentes méthodes pour contrôler le DMC qui peuvent être classifiées en trois groupes : les barrières à l'oxygène, les barrières à l'infiltration d'eau et les recouvrements thermiques aussi appelés recouvrements isolants (*Tableau 1*). Une brève description des principales méthodes de restauration ainsi que des impacts possibles des CC sur leur performance est présentée dans ce qui suit. Un tableau récapitulatif est également disponible à l'*annexe C*.

3.1 Barrières à l'oxygène

En climat humide, où les précipitations annuelles sont importantes et l'évaporation potentielle relativement faible, la réduction du flux d'oxygène est reconnue comme une des approches les plus efficaces pour contrôler le DMC (SRK, 1989; Aubertin *et al.*, 2002; Mbonimpa *et al.*, 2021). Sachant que le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est environ 10 000 fois plus faible que dans l'air, les différents types de barrières à l'oxygène peuvent utiliser l'eau pour contrôler le flux d'oxygène avant qu'il n'atteigne les rejets miniers. Les différents types de barrière à l'oxygène présentés dans ce qui suit peuvent être influencés par les effets des CC, puisque la quantité d'eau disponible pour créer la barrière à l'oxygène varie notamment en fonction des conditions climatiques.

3.1.1 Recouvrement en eau

Le dépôt de rejets miniers sous un recouvrement en eau représente une option efficace pour limiter la formation d'un DMC (Vigneault *et al.*, 2001; Kachhwal *et al.*, 2011; Moncur *et al.*, 2015; Awoh *et al.*, 2021). L'approche consiste à maintenir une couverture d'eau directement au-dessus de rejets miniers réactifs, afin de limiter la migration de l'oxygène et, ainsi, d'empêcher leur oxydation. Deux techniques sont généralement utilisées : la déposition subaquatique, lorsque des rejets frais (non oxydés) sont déposés dans l'eau (*Figure 2a*) et l'entassement des rejets déjà entreposés dans une aire d'accumulation de rejets miniers. Dans la majorité des cas, il est nécessaire de créer un réservoir artificiel à l'aide de digues étanches afin de maintenir la couverture d'eau. Il est également possible d'utiliser les fosses déjà existantes sur les sites miniers pour entreposer les rejets (*Figure 2b*), la construction de digues n'est alors pas nécessaire.



Figure 2 : Exemples de deux sites en Abitibi-Témiscaminque (Québec) où un recouvrement en eau est utilisé a) Mine Louvicourt : construction de digues étanches et b) Site Don Rouyn : utilisation d'une carrière

Un recouvrement en eau est un système dynamique complexe. Différents processus interdépendants peuvent affecter sa performance à long terme ainsi que la qualité de l'eau du recouvrement tels que le mouvement de l'eau, le transport de l'oxygène dissous jusqu'aux rejets miniers réactifs, la remise en suspension des particules et le relargage des métaux dissous (Figure 3; St-Arnaud and Yanful, 1993; Li *et al.*, 1997; Simms *et al.*, 2000; Adu-Wusu *et al.*, 2001; Aubertin *et al.*, 2002; Catalan and Yanful, 2002; Davé *et al.*, 2003; Mian and Yanful, 2003). Dans tous les cas, un bilan hydrique positif entre les apports d'eau (précipitations, ruissellement, recharge souterraine) et les pertes (évaporation, infiltration dans les aquifères) doit être assuré, afin de maintenir en permanence une couverture aqueuse avec une épaisseur suffisante (Atkins *et al.*, 1997; Samad and Yanful, 2005; Mbonimpa *et al.*, 2008) et pour contrôler la génération de DMC, même en cas d'évaporation et de sécheresse.

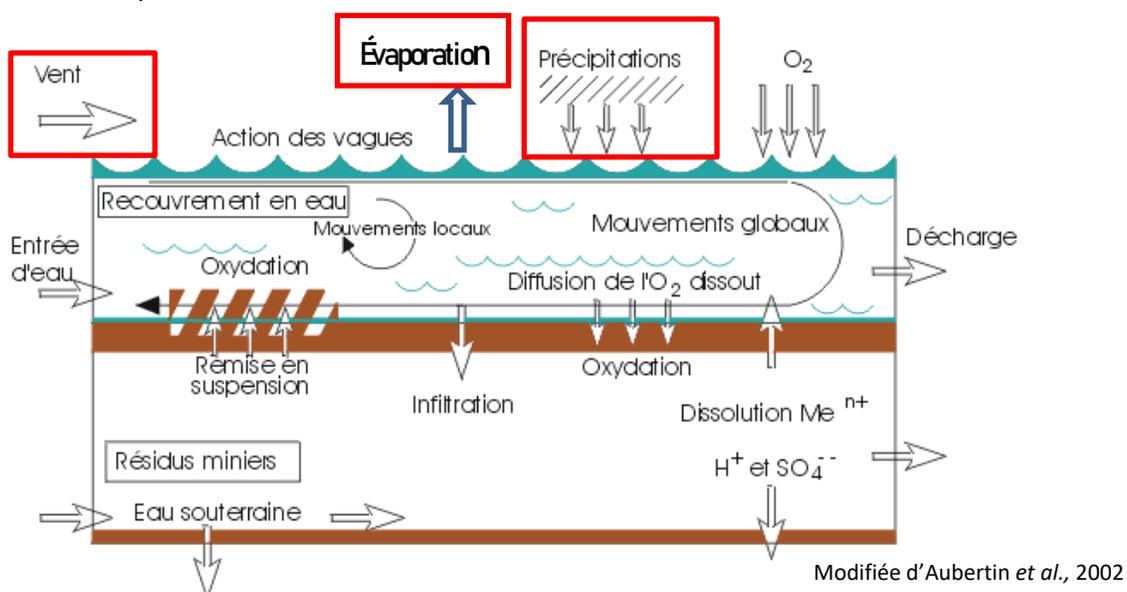


Figure 3 : Processus affectant la performance des recouvrements en eau avec les principaux paramètres climatiques d'influence encadrés en rouge

Impacts possibles des CC :

Dans le cas des recouvrements en eau, les principales sources de risques en lien avec les CC sont les suivantes :

- Un risque plus grand d'instabilité physique des ouvrages de retenue (débordement, érosion, augmentation des pressions interstitielles) en raison d'une augmentation des précipitations moyennes annuelles et des précipitations extrêmes (intensité et fréquence). Il est à noter que, dans le cas de la technique de déposition dans des ouvertures minières, les risques d'instabilités physiques sont négligeables;
- Une diminution temporaire de l'épaisseur de la couche aqueuse en raison d'une augmentation de l'évaporation en périodes sèches;
- Une remise en suspension des particules plus importante en raison d'une augmentation de la vitesse des vents et un changement de leur direction, entraînant une plus grande concentration de contaminants dans l'eau du recouvrement.

Approche d'adaptation face aux CC :

Dans le cas des recouvrements en eau, les principales mesures pour adapter la méthode de restauration face aux CC sont les suivantes :

- Augmenter l'épaisseur du recouvrement en eau en modifiant la structure des ouvrages de rétention;
- Modifier l'orientation du bassin pour diminuer le « *fetch* » dans la direction principale du vent;
- Ajouter une couche de matériaux granulaires à la surface des résidus;
- Planter des arbres autour du bassin.

3.1.2 Nappe phréatique surélevée avec recouvrement monocouche

La méthode de la nappe phréatique suélevée (NPS) est une alternative à celle du recouvrement en eau. Le principe consiste à rehausser le niveau naturel de la nappe phréatique afin de conserver les rejets réactifs dans un état quasi-saturé, ce qui permet de réduire la diffusion de l'oxygène, donc l'oxydation des rejets potentiellement responsables d'un DMC (MEND, 1996; Ouangrawa *et al.*, 2009; Demers *et al.*, 2008; Pabst *et al.*, 2014; Éthier *et al.*, 2018; Pabst, 2021). Le principal défi de cette technique est de maintenir la nappe phréatique élevée afin que les rejets miniers réactifs demeurent à un degré de saturation élevé en tout temps, sans égards aux variations saisonnières (

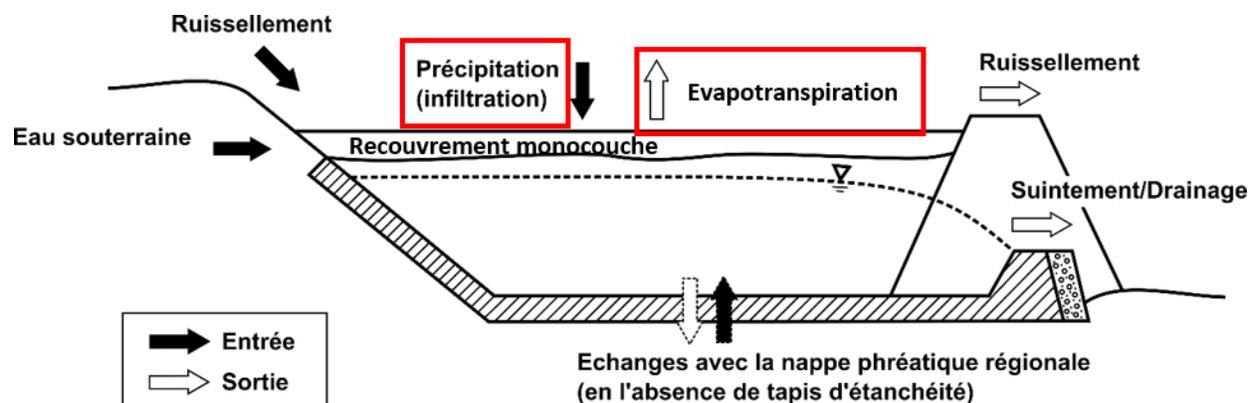
Figure 4). Comme pour tous les systèmes de recouvrements placés sur des rejets miniers réactifs, pour favoriser l'atteinte de ces objectifs à long terme, le recouvrement doit également satisfaire à d'autres exigences, notamment : résister aux phénomènes d'érosion; assurer un ruissellement contrôlé; stabiliser les surfaces; éviter les accumulations d'eau; rétablir l'esthétique du site; faciliter toute utilisation future du terrain (Aubertin *et al.*, 2002, 2016).



Crédit : IRME

Figure 4 : Technique de la NPS avec recouvrement monocouche mise en place sur le parc à résidus #2 du site Manitou (Abitibi-Témiscamingue, Québec)

Dans le but de limiter les pertes d'eau et de favoriser le stockage, il est nécessaire de recouvrir les rejets miniers réactifs avec une couche de protection (sable ou gravier) pour empêcher l'érosion et diminuer les effets de l'évaporation, réduire le ruissellement de surface en maximisant les infiltrations et favoriser l'implantation d'une végétation pérenne (Dagenais *et al.*, 2006; Figure 5). Il est à noter qu'un matériau à granulométrie fine peut aussi, dans certaines conditions, être utilisé comme matériau de recouvrement (Demers *et al.*, 2008; Éthier *et al.*, 2018). Dans cette configuration, le couche de matériau fin doit être d'épaisseur suffisante et présenter une bonne capacité de stockage pour maintenir en permanence (notamment par capillarité et sans une alimentation régulière d'eau) un haut degré de saturation ($S_r > 85\%$).



Modifiée de Pabst, 2020

Figure 5 : Bilan hydrique d'un parc à résidus restauré par la technique de la NPS avec recouvrement monocouche; les principaux paramètres climatiques d'influence sont encadrés en rouge

Impacts possibles des CC :

Dans le cas des systèmes de recouvrement avec NPS, les principales sources de risques en lien avec les CC sont les suivantes :

- Une baisse du niveau de la nappe phréatique en-dessous de la valeur minimale acceptable lors d'une période de sécheresse prolongée qui pourrait entraîner l'oxydation des rejets miniers réactifs;
- Une augmentation des précipitations et de la fréquence des événements extrêmes qui pourrait affecter la stabilité des ouvrages de rétention en raison de pressions interstitielles potentiellement plus élevées et réduire l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes.

Approche d'adaptation face aux CC :

Dans le cas de la technique de la NPS avec recouvrement monocouche, les principales mesures pour adapter la méthode de restauration face aux CC sont les suivantes :

- Augmenter la performance du recouvrement monocouche pour contrer l'effet de l'évaporation :
 - Choisir un matériau plus grossier;
 - Augmenter l'épaisseur du recouvrement;
- Favoriser l'infiltration au détriment du ruissellement et de l'évapotranspiration :
 - Modifier les paramètres liés à la géométrie du recouvrement;
 - Modifier les propriétés des matériaux;
- Ajuster les pentes et les exutoires;
- Renforcer le système de drainage;
- Couvrir les pentes de végétation;
- Augmenter l'épaisseur du recouvrement pour contrôler la présence de racines en profondeur et éviter la désaturation de la monocouche (si constituée de matériaux fins);
- Favoriser l'implantation d'espèces à racines peu profondes et au taux de transpiration faible.

3.1.3 Couvertures avec effets de barrière capillaire

Le principe de base de ce système de recouvrement, appelé CEBC (*Figure 6*), repose sur les propriétés non saturées des différents matériaux utilisés. Ces recouvrements permettent de contrôler la diffusion de l'oxygène et de réduire les infiltrations d'eau jusqu'aux rejets réactifs. La CEBC doit également résister aux phénomènes d'érosion, assurer un ruissellement contrôlé, stabiliser les surfaces, éviter les accumulations d'eau, rétablir l'esthétique du site et faciliter toute utilisation future du terrain (Aubertin *et al.*, 2002, 2016).

Une CEBC est habituellement composée de trois à cinq couches de matériaux (*Figure 6*). La partie centrale de la CEBC – la couche de rétention d'eau – est constituée d'un matériau à granulométrie fine (typiquement un matériau silteux) placé entre deux couches de matériaux grossiers (typiquement un sable ou gravier) (*Figure 7*; Aubertin *et al.*, 1995; Demers et Pabst, 2021). Pour être efficace, cette couche de matériaux fins doit posséder une épaisseur suffisante et une bonne

capacité de rétention d'eau, afin de maintenir en permanence un haut degré de saturation ($S_r > 85\%$). Ainsi, la couche de rétention, dont les pores sont remplis d'eau, limite le passage de l'oxygène, réduisant ainsi les risques d'oxyder les minéraux sulfureux contenus dans les rejets sous-jacents et, par conséquent, la formation d'un DMC (Collin and Rasmuson, 1988, 1990; Nicholson *et al.*, 1989; Yanful, 1993; Aubertin *et al.*, 1995, 1999; Bussière, 1999; Bussière *et al.*, 2003, 2007). Afin d'atteindre les objectifs de saturation, le principe des effets de barrière capillaire est utilisé (Mbonimpa *et al.*, 2021). Ces effets sont produits lorsque des matériaux présentant un contraste important de granulométrie sont superposés. En effet, le matériau grossier placé en-dessous de la couche de rétention d'eau (la couche de support/bris) et celui placé au-dessus (la couche de drainage) se drainent rapidement, ce qui réduit significativement leur conductivité hydraulique non saturée. Comme le matériau fin (la couche de rétention d'eau) se trouve entre deux matériaux ayant une faible conductivité hydraulique non saturée, il aura tendance à retenir l'eau et, ainsi, à limiter les flux d'oxygène.

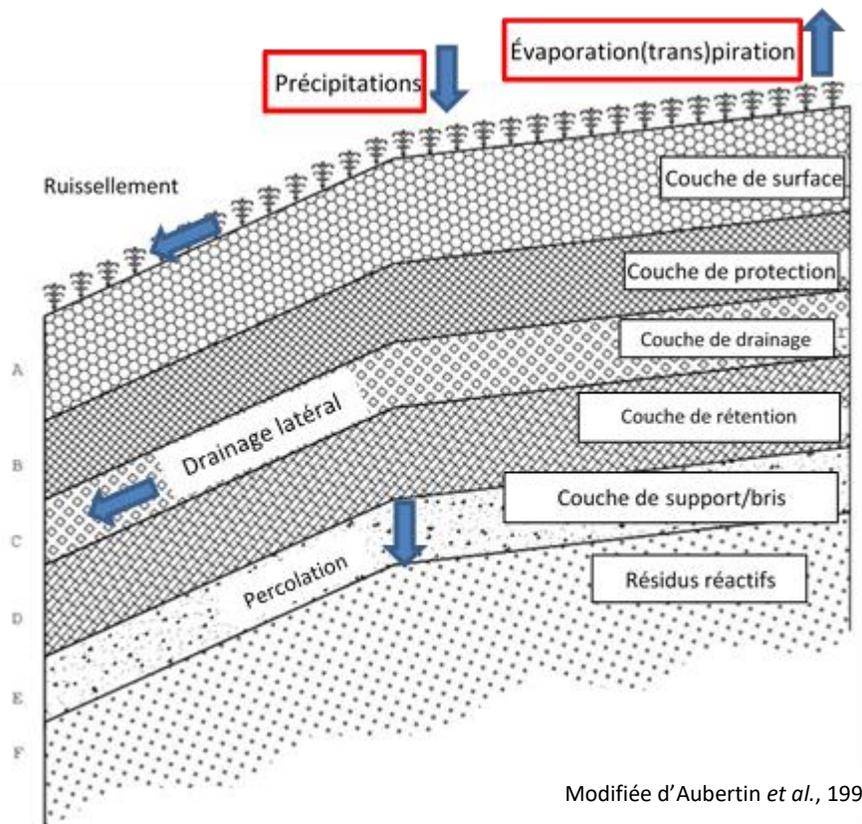
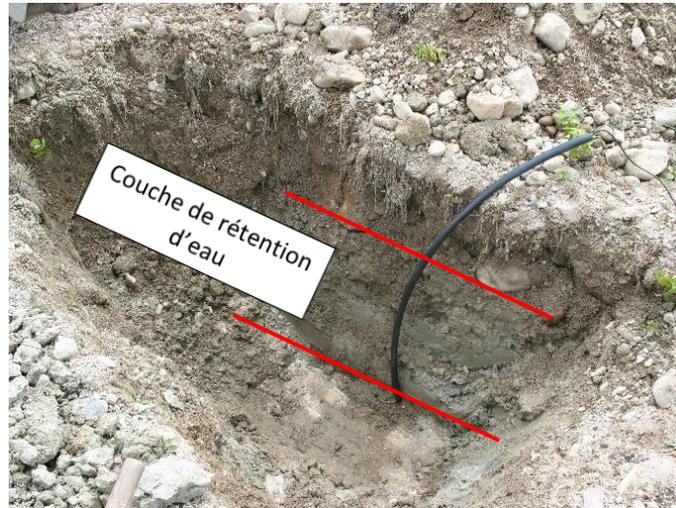


Figure 6 : Principales composantes du bilan hydrique et principaux paramètres climatiques (encadrés en rouge) d'une CEBC typique mise en place sur un parc à résidus



Crédit : B. Bussière

Figure 7: Tranchée creusée dans la CEBC du site Lorraine (Abitibi-Témiscamingue, Québec)

Impacts possibles des CC :

Dans le cas des CEBC, les principales sources de risques en lien avec les CC sont les suivantes :

- Une augmentation des températures en périodes sèches (taux d'évaporation plus élevé) couplée à une diminution des précipitations risque de diminuer temporairement le degré de saturation de la couche de rétention d'eau et, ainsi, affecter l'efficacité du recouvrement à contrôler la production de DMC;
- Une augmentation des précipitations et de la fréquence des événements extrêmes pourrait affecter l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes;
- Une augmentation des précipitations et de la fréquence des événements extrêmes pourrait avoir un effet négatif sur la stabilité physique des zones inclinées.

Approche d'adaptation face aux CC :

Dans le cas des CEBC, les principales mesures pour adapter la méthode de restauration face aux CC sont les suivantes :

- Modifier la configuration du recouvrement (épaisseur des couches);
- Modifier les propriétés des matériaux (améliorer les propriétés de la couche de rétention d'eau et des couches de bris capillaire);
- Favoriser l'utilisation de matériaux résistants aux cycles climatiques (gel-dégel et mouillage-séchage);
- Augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les couches inférieures et éviter la désaturation de la couche de rétention d'eau;
- Favoriser l'implantation d'espèces à racines peu profondes et au taux de transpiration faible.

3.2 Barrières à infiltration d'eau

Le contrôle de DMC par réduction des infiltrations d'eau est réalisé à partir de systèmes de recouvrement (Aubertin *et al.*, 1995; MEND, 2001; INAP, 2009; Maqsood *et al.*, 2021). Il existe deux principaux types de systèmes de recouvrement pour contrôler les infiltrations : les systèmes à faible conductivité hydraulique saturée et les systèmes de type stockage-relargage, aussi connus sous l'appellation anglaise « *store-and-release (SR) covers* ».

3.2.1 Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée

Le recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée consiste en la mise en place d'un système multicouche constitué d'un ou de plusieurs types de sols ou de matériaux géosynthétiques (Aubertin *et al.*, 1995). La configuration d'un tel recouvrement est souvent similaire à celle utilisée pour limiter la migration de l'oxygène. La principale différence avec les CEBC est le choix du ou des matériaux de la couche de faible conductivité hydraulique saturée. Afin de concevoir des systèmes de recouvrement efficaces à long terme, il est préférable d'utiliser une double protection, soit la superposition de deux matériaux à faible conductivité hydraulique saturée (Maqsood *et al.*, 2021; *Figure 8*). Tout comme pour les CEBC, pour que ces systèmes de recouvrement soient efficaces à long terme, ils doivent : résister aux phénomènes d'érosion, assurer un ruissellement contrôlé, stabiliser les surfaces, éviter les accumulations d'eau, rétablir l'esthétique du site et faciliter toute utilisation future du terrain (Aubertin *et al.*, 2002).

Dans le contexte de la restauration minière, les principaux matériaux utilisés pour constituer la barrière à infiltration d'eau sont les argiles compactées, les géomembranes, les géocomposites bentonitiques ou une combinaison de ceux-ci. Plus de détails sur les avantages et les inconvénients de chaque type de matériau peuvent être trouvés dans les travaux de Maqsood *et al.* (2021).

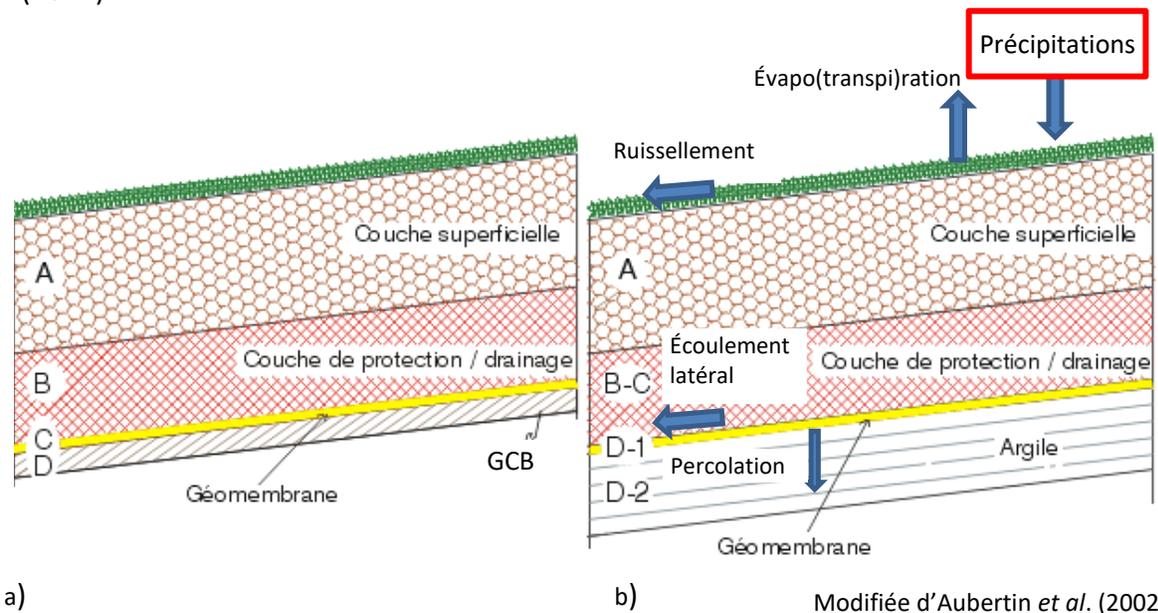


Figure 8 : Configuration typique de recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée avec comme couches de faible perméabilité a) un géocomposite bentonitique (GCB) et une géomembrane; b) une argile compactée et une géomembrane. Les principales composantes du bilan hydrique et principaux paramètres climatiques pouvant affectés la performance du système (encadrés en rouge) sont présentés en b)

Impacts possibles des CC :

Dans le cas des recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée, les principales sources de risques en lien avec les CC sont les suivantes:

- Une augmentation des précipitations moyennes annuelles et de la fréquence des événements extrêmes pourraient diminuer la capacité des recouvrements à dévier l'eau et à contrôler la percolation; elle pourrait ainsi affecter l'efficacité du recouvrement à contrôler la production de DMC;
- Une augmentation des précipitations moyennes annuelles et de la fréquence des événements extrêmes pourrait également affecter la capacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes;
- Une augmentation des précipitations et de la fréquence des événements extrêmes pourrait également avoir un effet négatif sur la stabilité physique des zones inclinées.

Approche d'adaptation face aux CC :

Dans le cas des recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée, les principales mesures pour adapter la méthode de restauration face aux CC sont les suivantes :

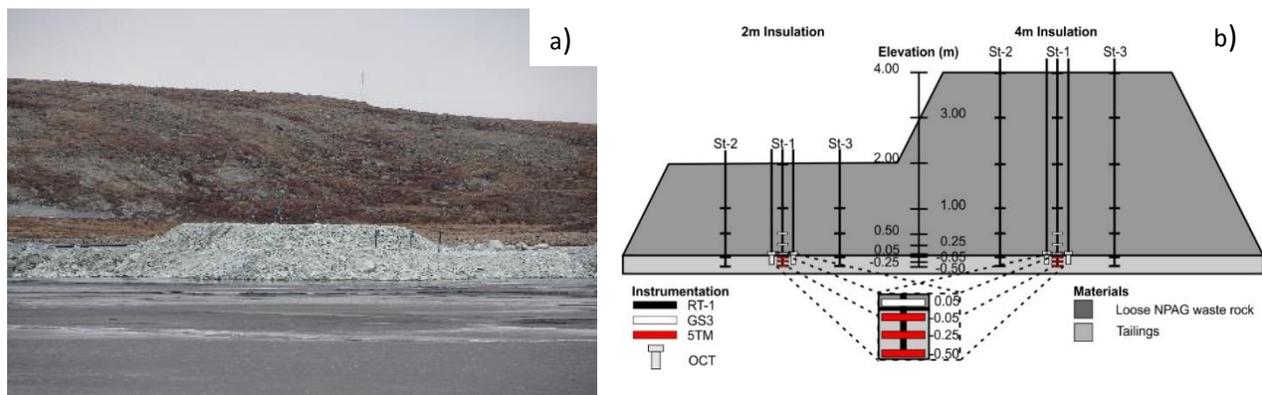
- Modifier les propriétés des couches drainantes pour favoriser l'écoulement rapide de l'eau sur la couche de matériaux à faible conductivité hydraulique saturée;
- Adapter l'hydrologie du site pour favoriser le ruissellement et minimiser l'érosion;
- Ajouter de la végétation pour minimiser l'érosion et diminuer la percolation grâce au prélèvement d'eau pour la transpiration;
- Augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les matériaux à faible conductivité hydraulique saturée;
- Favoriser l'implantation d'espèces végétales à racines peu profondes et au taux de transpiration élevé.

3.2.2 Recouvrement de type stockage-relargage

Des recouvrements de type SR peuvent être utilisés pour contrôler les infiltrations d'eau. Le concept consiste à stocker l'eau dans la couche fine située près de la surface durant les périodes humides et à la libérer par évaporation ou évapotranspiration durant les périodes sèches. Cette technique s'appliquant principalement en climats secs et non au Québec, la description détaillée n'est pas présentée dans ce guide. Plus d'informations sur le principe des recouvrements SR peuvent être trouvées dans Bussière et Wilson (2021) et Bussière *et al.* (2021).

3.3 Recouvrement isolant

En climat arctique, où les températures moyennes annuelles sont négatives et où le pergélisol est continu, les recouvrements isolants (Figure 9) sont considérés comme une option efficace pour contrôler la formation d'un DMC (MEND, 2004b, 2009). Le principe consiste à intégrer les rejets miniers réactifs au pergélisol (MEND, 1993b, 2004b, 2009, 2012; Dawson and Morin, 1996; Elberling, 2001, 2005; Kyhn and Elberling, 2001; Meldrum *et al.*, 2001; Coulombe, 2012; Aubertin *et al.*, 2015; Boulanger-Martel *et al.*, 2021a, 2021b). En maintenant les rejets à faible température (Figure 910 – $T_{\text{cible}} < -5$ à 0°C), la cinétique d'oxydation des sulfures est ralentie et les écoulements d'eau sont limités, ce qui permet de contrôler les risques de contamination.

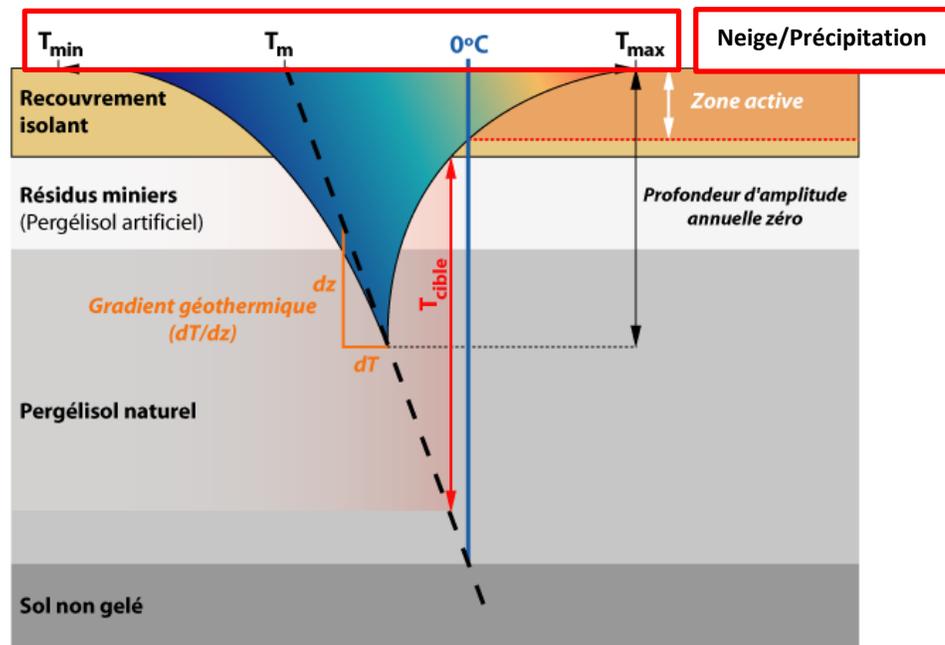


Crédit : V. Boulanger-Martel

Tirée de Boulanger-Martel *et al.*, 2021c

Figure 9 : Exemple de recouvrement isolant sur le site minier Meadowbank (Nunavut): a) Cellules de terrain sur le parc à résidus; b) Représentation schématique et instrumentation

La performance des recouvrements isolants dépend principalement des conditions climatiques et du maintien de la zone active (zone qui gèle et dégèle chaque année) dans le recouvrement (Figure 10). Les paramètres liés au climat qui influencent le régime thermique sont notamment la température de l'air, les précipitations sous forme neige (épaisseur, date des premières précipitations à l'automne) et les précipitations sous forme de pluie. L'épaisseur du recouvrement constitué d'un matériau ayant des propriétés thermiques données doit être suffisante pour empêcher le dégel des rejets miniers réactifs durant le réchauffement saisonnier (Figure 10). Pour une meilleure isolation, le recouvrement peut également contenir une couche de matériau à granulométrie fine, qui retiendra une certaine quantité d'eau et ralentira les transferts de chaleur (Boulanger-Martel *et al.*, 2021a).



Modifiée d'Andersland and Ladanyi (2004)

Figure 10 : Profil typique des températures associé aux recouvrements isolants et principaux paramètres climatiques d'influence encadrés en rouge

Impacts possibles des CC :

Dans le cas des recouvrements isolants, les principales sources de risque en lien avec les CC sont listées ci-dessous :

- Une augmentation des températures de l'air et une augmentation des précipitations liquides peuvent favoriser un approfondissement de la zone active qui pourrait exposer les rejets miniers réactifs à des températures plus élevées, favorables à l'oxydation des minéraux sulfureux et, par conséquent, à la formation d'un DMC;
- Une augmentation des précipitations sous forme de neige pourrait isoler davantage du froid les rejets miniers situés sous le recouvrement, ce qui risque d'augmenter la température du sol et la réactivité des rejets;
- Une augmentation des températures de l'air et une augmentation des précipitations pourraient affecter la stabilité physique des ouvrages de restauration (tassements, consolidation, fissuration, soulèvement), ce qui pourrait réduire l'efficacité à contrôler la contamination des eaux.

Approche d'adaptation face aux CC :

Dans le cas des recouvrements isolants, les principales mesures pour adapter la méthode de restauration face aux CC sont les suivantes :

- Augmenter l'épaisseur du recouvrement isolant;
- Intégrer une couche de matériau à forte teneur en eau pour augmenter le potentiel isolant et réduire les flux d'oxygène;

- Prendre en compte l'influence possible du développement d'une végétation significative à long terme (déplacement des espèces du sud vers le nord) sur l'épaisseur de la couche de neige et sur les propriétés (due à la présence de racines) des couches inférieures.

3.4 Recouvrements végétalisés

La présence de végétation sur les systèmes de recouvrements, qu'elle provienne de la recolonisation naturelle des espèces de l'écosystème environnant ou d'une végétalisation assistée pour respecter les exigences réglementaires, peut affecter le bilan hydrique des systèmes de recouvrements et donc leur performance (Bussière et Guittonny, 2021). Plusieurs modèles numériques d'hydrogéologie non saturée peuvent intégrer l'effet de la végétation et permettre de prédire la performance de recouvrements végétalisés. D'ailleurs, il est aujourd'hui de bonne pratique d'inclure des paramètres de végétation dans les modèles qui tiennent compte de la présence de plantes, en particulier d'arbres, et de l'effet des CC sur leur distribution (voir [section 4.2.4](#)) pour prédire la performance des recouvrements végétalisés à long terme.

3.4.1 Effets de la végétation sur le bilan hydrique des recouvrements

Les plantes absorbent de l'eau dans le sol par leurs racines fines (diamètre < 2 mm) pour alimenter le processus de transpiration qui se déroule au niveau des feuilles (Lambers *et al.*, 2008). Ce processus engendre des variations du stockage en eau dans les matériaux colonisés par les racines des plantes, ce qui peut affecter positivement ou négativement la performance des recouvrements en sols utilisés pour la restauration minière.

Dans le cas des recouvrements de type barrières à l'infiltration d'eau, les plantes peuvent aider à diminuer les volumes d'eau stockés dans les matériaux qui pourraient alimenter la percolation, notamment dans les recouvrements de type SR (Shurniak et Barbour, 2002; Madalinski *et al.*, 2003; Zornberg *et al.*, 2003; Scanlon *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2006; Barnswell et Dwyer, 2011). Cette diminution du stockage passe généralement par une augmentation de l'évapotranspiration (Wels *et al.*, 2002; Madalinski *et al.*, 2003), qui peut être de l'ordre de 30% sur des sols plantés de saules âgés de 2 ans recouvrant des roches stériles en région boréale (Guittonny *et al.*, 2019).

Dans les cas de recouvrements de type barrières à l'oxygène, les plantes pourraient désaturer les matériaux qui jouent le rôle de barrière et impacter négativement la performance. Par exemple, le degré de saturation peut diminuer de manière concomitante à l'augmentation de la longueur de racines par volume de sol dans la portion superficielle de la couche de rétention d'eau d'une CEBC colonisée par les racines, (Guittonny *et al.*, 2018; Proteau *et al.*, 2020).

La végétation présente sur les recouvrements peut aussi intercepter les précipitations, diminuer la quantité, l'intensité et la vitesse du ruissellement de même que modifier les propriétés des matériaux du recouvrement, influençant l'infiltration (Bussière et Guittonny, 2021).

3.4.2 Inclusion de l'effet de la végétation dans la prédiction numérique de la performance des recouvrements

Les modèles numériques d'hydrogéologie non saturée, utilisée pour la conception des systèmes de recouvrement, incluent des paramètres de végétation qui influencent le calcul du stockage en eau du sol et de l'évapotranspiration. Pour cela, les principaux paramètres d'entrée associés à la végétation sont la durée de la saison de croissance, l'indice de surface foliaire (LAI), la profondeur maximale d'enracinement et la distribution sur le profil de sol de la longueur de racines par volume de sol (densité de longueur de racines ou RLD) (Botula *et al.*, 2019; Bussière et Guittonny, 2021). La durée de la saison de croissance permet d'inclure l'effet de la végétation lors de sa phase active (excluant les périodes de dormance, ou de vie ralentie; ex. : pendant l'hiver). Le LAI correspond à la surface cumulée du feuillage des plantes (une face) rapportée à la surface du sol couverte par le feuillage. Il permet de calculer la transpiration potentielle associée à la présence de végétation. La profondeur maximale des racines permet de savoir jusqu'à quelle profondeur l'influence des racines sur le prélèvement d'eau va se produire dans le sol. Et finalement, la distribution du RLD sur le profil de sol permet de répartir l'intensité de prélèvement d'eau sur le profil selon l'intensité de la colonisation racinaire.

Les gammes de valeurs des paramètres de végétation à entrer dans les modèles peuvent être obtenues par des mesures directes sur les sites miniers restaurés et végétalisés. Pour des prédictions à long terme, il est recommandé d'établir la liste d'espèces d'arbres et d'arbustes potentiellement présentes sur le recouvrement (voir [section 2.3](#)) puis d'aller chercher des valeurs représentatives des paramètres requis pour la modélisation dans la littérature.

Une attention particulière devrait être accordée aux espèces d'arbres et d'arbustes. En effet, plus la taille des plantes est élevée, plus la quantité d'eau qu'elles prélèvent est importante. Les arbres présentent aussi un enracinement généralement plus profond que les autres types de plantes (Jackson *et al.*, 1996, Freschet *et al.*, 2017). En particulier, les arbres feuillus sont connus pour avoir un enracinement plus profond que les conifères (Fan *et al.*, 2017, Fourie et Tibbett 2007). Finalement, les arbres feuillus sont associés à des taux d'évapotranspiration annuels plus élevés (550 mm par an) que les conifères ou les prairies (200-300 mm par an) (Liu *et al.*, 2003).

3.4.3 Effet des changements climatiques sur les communautés de plantes et la prédiction de la performance à long terme des recouvrements végétalisés

En se basant sur ce qui a été mentionné précédemment, les principaux effets des CC sur les communautés de plantes et, par le fait même, sur la performance à long terme des recouvrements, sont de deux ordres :

- Influence directe sur la durée de la saison de croissance pour les plantes, ce qui aura pour effet de modifier le bilan hydrique des recouvrements.
- Influence indirecte sur la composition des essences forestières et, donc, les valeurs de paramètres de végétation (LAI, profondeur maximale d'enracinement et profil de RLD) à entrer dans les modèles numériques utilisés pour prédire la performance à long terme des recouvrements végétalisés. Par exemple, pour un site actuellement dans la zone de végétation tempérée nordique au Québec d'ici 2100, les gammes de valeurs de LAI évolueraient de 0,4-9,9 à 0,4-8,1 et la profondeur maximale d'enracinement de 0,1-

3,0 à 0,1-3,5 m (voir Botula *et al.*, 2019). De manière générale, il est attendu qu'une augmentation de LAI dans le modèle numérique entraîne une augmentation des pertes d'eau potentielles du système via la transpiration, de même pour une augmentation de la profondeur d'enracinement.

3.5 Autres considérations

D'autres aspects liés à la restauration des sites miniers pouvant être affectés par les CC non abordés dans les sections précédentes sont présentés brièvement ici :

- **Eaux de surface** : les ouvrages de dérivation des eaux de ruissellement, qui sont requis pendant l'exploitation pour minimiser les volumes d'eau à traiter, sont préférablement démantelés après la fin de l'exploitation. Cependant, dans certains cas, des fossés doivent être maintenus en place à la fin de l'exploitation pour limiter l'érosion et assurer la pérennité du couvert végétal en surface des aires d'accumulations. Ces fossés de dérivation et de contrôle de l'érosion sont généralement conçus pour une crue de conception déterminée en fonction des conséquences, advenant un débordement. Ces ouvrages sont généralement conçus en utilisant une précipitation de récurrence variant entre 100 ans et la précipitation maximale probable (PMP), selon les conséquences de l'érosion. Dans un contexte de CC, il est important d'ajuster la conception de ces ouvrages, afin qu'ils puissent maîtriser des conditions extrêmes plus sévères (augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluie extrêmes) afin d'éviter que la stabilité physique des ouvrages soit compromise.
- **Eaux souterraines** : les CC auront un impact direct sur le bilan hydrique à l'échelle régionale (c'est-à-dire au-delà du seul site minier étudié) et donc sur les niveaux phréatiques et les gradients régionaux. La position de la nappe phréatique et les écoulements souterrains peuvent affecter la stabilité des infrastructures minières (digues, routes, bâtiments) et la performance de plusieurs techniques de restauration (notamment la méthode de la NPS avec recouvrement monocouche), en particulier pour les anciens sites où un tapis d'étanchéité n'est pas nécessairement présent sous les aires d'accumulation. L'impact des CC sur l'eau souterraine sera également particulièrement critique pour le remblayage, l'ennoiement (vitesse de remontée de la nappe) et surtout la restauration des fosses (lacs de fosses de type piège hydraulique, source ou écoulement souterrain naturel « *flow through* »). Dans tous ces cas, l'effet des CC sur l'eau souterraine devrait être évalué.
- **Stabilité des digues** : à l'étape de restauration et de post-fermeture, il est primordial de s'assurer de la stabilité physique à long terme des ouvrages de rétention de résidus miniers. Un facteur important pouvant affecter la stabilité des ouvrages est la pression interstitielle dans les digues de retenue servant à délimiter les aires d'entreposage de résidus miniers. Dans un contexte de CC, où les précipitations moyennes annuelles seront plus importantes et où des événements de précipitations extrêmes sont plus susceptibles de se produire, cela pourrait avoir pour effet d'augmenter ces pressions interstitielles. Il est donc nécessaire d'appréhender ces changements afin de réduire les risques de rupture de digues minières.

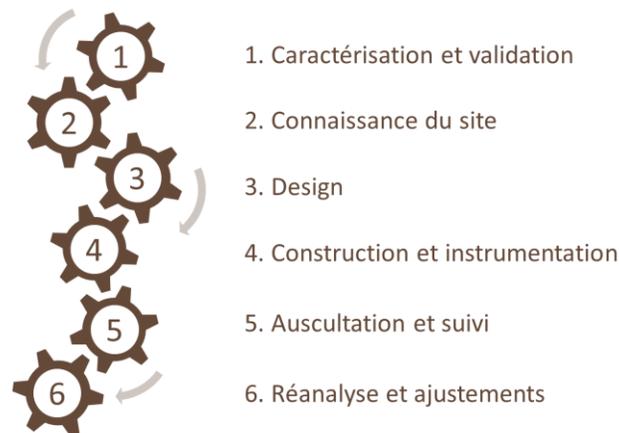
- **Cas des sites non-générateurs de contaminants** : l'emphase est mise dans ce guide sur les cas de restauration les plus problématiques, soit ceux où les rejets peuvent générer du DMC. Il existe cependant des cas où les rejets sont non problématiques et où il suffit d'implanter de la végétation pour restaurer le site. Dans ces cas, il est important de rappeler que la stabilité physique des ouvrages à long terme (digues ou infrastructures de drainage) est toujours un aspect critique à considérer et que les CC peuvent influencer cette stabilité, principalement en raison de l'augmentation des précipitations moyennes annuelles et de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes.
- **Végétalisation** : le succès de végétalisation des sites, qu'ils soient non-générateurs de contaminants ou restaurés avec des recouvrements pour contrôler la contamination, sera affecté à long terme par les CC. Tout d'abord, le choix des essences plantées devrait tenir compte de l'évolution projetée de la distribution des espèces (voir [section 2.3](#)) pour éviter des taux de mortalité élevés et favoriser la présence d'espèces adaptées aux futures conditions climatiques. Également, les CC devraient affecter la productivité des forêts mais cet effet est difficile à prédire. En forêt boréale, les CC pourraient augmenter ou diminuer la productivité des arbres selon le niveau de disponibilité de l'eau dans le sol du site considéré (drainage, pente, texture), selon l'intensité de l'augmentation de température projetée (relation entre la productivité et la température non linéaire), l'augmentation ou la diminution projetée des précipitations et l'espèce considérée (D'Orangeville *et al.*, 2018).
- **Systèmes de traitement passif** : Lorsque les méthodes de contrôle du DMC ne peuvent empêcher totalement, pour une certaine période de temps, la génération d'effluents contaminés, il peut être nécessaire de construire un système de traitement passif (ex. lorsque l'eau interstitielle des rejets est déjà contaminée par l'oxydation antérieure des rejets réactifs). Ces systèmes visent à traiter à l'aide de mécanismes chimiques et/ou biologiques naturels les contaminants contenus dans le DMC. Ils ne nécessitent pas d'usine de traitement alimentée par une source d'alimentation électrique ni d'ajout de réactifs en continu. Les principaux paramètres qui vont influencer la performance de ces systèmes sont : la qualité du drainage et son volume, les caractéristiques des matériaux utilisés dans le système de traitement, les propriétés hydrauliques du système (porosité, conductivité hydraulique), le temps de résidence hydraulique (TRH) et les conditions environnementales (ex. température, profondeur de gel, hydrogéologie locale) (Neculita *et al.*, 2021). Les CC pourraient avoir une influence sur l'évolution annuelle des débits à traiter (débit de crue plus important), sur le TRH, sur la qualité du drainage et sur l'influence de la température sur le système. Il est important de prévoir ces impacts à l'étape du design, particulièrement lorsque la durée du traitement est prévue pour plusieurs décennies.

4. Intégration des changements climatiques dans l'approche de conception

4.1 Approche de conception générale des ouvrages de restauration et changements climatiques

4.1.1 Approche de conception générale des ouvrages de restauration

Plusieurs approches de conception pour les principaux modes de restauration peuvent être retrouvées dans la littérature (ex. : Yanful *et al.*, 1999; Aubertin *et al.*, 2002; Boulanger-Martel *et al.*, 2021a; Bussière et Wilson, 2021; Bussière et Guittonny, 2021). La plupart de ces approches sont composées de six étapes (Figure 11).



Adaptée de Bussière et al., 2021a

Figure 11 : Approche généralisée de conception des modes de restauration des sites miniers

Les deux premières étapes consistent à caractériser les matériaux et à identifier les principales propriétés du site; ces informations sont essentielles pour effectuer une présélection des méthodes de restauration les plus appropriées et pour identifier les matériaux ayant les propriétés adéquates. Par exemple, si aucun matériau fin approprié n'est disponible à proximité du site, certaines options de couverture pourraient directement être éliminées. De plus, comme les technologies sélectionnées doivent être adaptées au climat du site (ex. : les recouvrements de type SR et les couvertures isolantes sont plus adaptées aux climats arides et arctiques, respectivement), il est essentiel de bien caractériser ce dernier, autant pour des conditions typiques qu'extrêmes. La troisième étape vise à valider les options de scénarios de restauration les plus prometteuses sur la base des résultats des étapes 1 et 2 par l'utilisation de modèles physiques tels que des essais en laboratoire (Aubertin *et al.*, 1995; Bussière *et al.*, 2003; Ouangrawa *et al.*, 2009; Pabst *et al.*, 2014) et/ou des cellules expérimentales sur le terrain (Molson *et al.*, 2008; Boulanger-Martel *et al.*, 2021b; Rey *et al.*, 2020). L'objectif est de simuler physiquement, et de la manière la plus réaliste, une conception préliminaire de la méthode de restauration envisagée et de valider la performance à contrôler la génération de DMC et le potentiel de lixiviation des rejets miniers. Des simulations numériques sont également utilisées à cette étape; les modèles numériques sont alors calibrés et validés sur la base des résultats expérimentaux, puis extrapolés à l'échelle réelle. À ce stade, des cellules expérimentales de

terrain à grande échelle peuvent être utilisées pour optimiser la conception finale. Dans ces modèles numériques, les conditions climatiques les plus représentatives possibles du site ainsi que les paramètres des végétaux dont la présence est la plus probable sont appliqués comme conditions frontières de surface. À l'étape 4, la méthode de restauration est construite sur le site, avec la mise en place d'instruments pour suivre le comportement hydrogéologique, géotechnique et géochimique du système de recouvrement en place. Les résultats du suivi sont ensuite comparés à l'étape 5 à ceux prédits au stade de la conception (en respectant au minimum les exigences de la *Directive 019*). En cas de divergence, il est important de comprendre l'origine de ces différences et d'apporter les corrections nécessaires (étape 6) (Bussière et Guittony, 2021).

4.1.2 Intégration des changements climatiques dans l'approche générale des ouvrages de restauration

Un des principaux défis du concepteur d'ouvrage de restauration des sites miniers consiste à intégrer l'effet du long terme dans sa conception. En effet, la restauration doit demeurer efficace pour toute la durée de vie de l'aire d'entreposage, laquelle se compte en centaines, voire milliers d'années (Aubertin *et al.*, 2015). Un des paramètres importants qui peut affecter la performance à long terme des méthodes de restauration est l'évolution du climat, ainsi que son effet sur l'évolution de la végétation. Afin de concevoir des ouvrages capables de résister aux CC tout en restant performants, il est nécessaire de les intégrer à chaque étape de l'approche généralisée de conception (*Figure 11*).

À l'étape 2, il est important d'obtenir des projections climatiques représentatives du site à l'étude, et ce, pour les principaux paramètres météorologiques d'intérêt. Une fois les projections climatiques obtenues pour des conditions typiques, les conditions extrêmes futures doivent également être déterminées. Les événements extrêmes potentiellement problématiques pourraient être différents selon la technique de restauration utilisée (voir [section 4.2](#)) et selon le risque environnemental associé à une défaillance de l'infrastructure (voir [section 4.1.1](#)). Il est également important de se soucier de la capacité de récupération de la méthode de restauration mis en place. Il ne suffit pas seulement d'évaluer si la méthode mise en place peut répondre aux pires conditions. Il faut également évaluer la durée et l'impact de cette période de non-atteinte du critère de performance sur l'environnement ainsi que la vitesse à laquelle le système peut retrouver son niveau de performance minimal. Le dernier aspect important à cette étape est de déterminer le type de végétation qui s'installera sur le site à court, moyen et long termes, et d'évaluer son évolution avec les CC.

À l'étape 3, les informations climatiques concernant le site, obtenues à l'étape précédente, peuvent être intégrées dans les modèles de laboratoire. Par exemple, si une sécheresse prolongée est prévue à long terme en raison des CC, elle pourrait être appliquée comme conditions frontières de surface aux essais en laboratoire tels que les essais en colonne (Bresson *et al.*, 2018). Ces simulations permettront de valider en partie que les systèmes et scénarios de recouvrement testés sont résilients face aux futures conditions climatiques extrêmes. En ce qui concerne la végétation, il est recommandé de l'intégrer aux essais au laboratoire et sur le terrain afin de pouvoir ensuite calibrer et valider des modèles numériques qui l'incluent.

Les projections climatiques utilisées à l'étape 2 sont également utilisées à l'étape 3 comme conditions frontières de surface pour les simulations numériques. Les conditions typiques et extrêmes futures doivent être simulées pour évaluer la capacité du système à supporter les conditions imposées par les CC à long terme. Si les simulations indiquent que la restauration risque de ne pas être efficace en raison des CC, alors la conception de la méthode de restauration doit être revue. C'est également à ce moment que la capacité de récupération de la méthode de restauration peut être évaluée pour les conditions avec CC. De plus, les paramètres de végétation correspondant aux espèces végétales dominantes probables sur le site, identifiées à l'étape 2, pourraient être utilisés pour des études paramétriques. Ces études permettront d'évaluer si la performance du recouvrement est maintenue avec une végétation qui a évolué sous les CC.

Après la construction et l'instrumentation (étape 4), il est important d'utiliser les résultats du suivi in situ (étape 5) pour valider le modèle numérique initial (étape 6). Si de nouvelles projections climatiques sont disponibles et prennent en compte les avancées des sciences climatiques (ex. : scénarios d'émission de GES et aérosols), les conditions aux limites de surface du modèle numérique peuvent être modifiées. Ces ajustements permettent de réduire l'incertitude liée à la performance à long terme. S'il est estimé que la performance visée ne peut être atteinte à long terme, des modifications devront être apportées au système de recouvrement.

Un tableau récapitulatif de l'approche générale en fonction des phases de développement d'un projet minier est présenté à l'*annexe D* et une grille de validation pour intégrer le CC au plan de restauration est fournie à l'*annexe E*.

4.1.3 Approche d'évaluation du risque

Usuellement, les projets d'ingénierie utilisent une approche de conception par complexité croissante, c'est-à-dire que les critères de design se précisent au fur et à mesure que le projet avance dans le temps et que de nouvelles données deviennent disponibles. Par exemple, la conception d'un ouvrage en phase de préféabilité est souvent basée sur des données préliminaires, des propriétés de matériaux estimées ou prédites et des simulations numériques relativement générales et faisant appel à de nombreuses hypothèses simplificatrices. À cette étape, le concepteur est souvent conservateur, et prend en compte toutes les incertitudes tant pour les données d'entrées que pour les conditions auxquelles l'ouvrage sera exposé. Puis, à mesure que le projet avance et se développe, que de nouvelles données sont obtenues au moyen d'essais et de mesures de terrain et de laboratoire, la conception se précise. Bien qu'une telle approche soit parfaitement valide, elle pose deux problèmes majeurs lorsqu'elle est appliquée à la conception des plans de restauration, et en particulier dans un contexte de CC :

- (1) Une approche trop conservatrice peut entraîner un surdimensionnement des ouvrages, surtout au début des projets, qui peut se traduire par une augmentation significative des coûts estimés, jusqu'à parfois atteindre des montants irréalistes (représentant un frein à la poursuite du projet).
- (2) En vertu du concept de « conception pour la fermeture », la conception des aires d'entreposage doit être adaptée à la méthode de restauration choisie afin de garantir son

efficacité à court et long terme et de réduire les coûts. Une mauvaise prise en compte des conditions climatiques en début de projet (même à l'étape de préféabilité) peut amener les opérations à proposer un plan de gestion et de restauration qui peut être difficile ou coûteux à corriger.

L'obtention de données climatiques précises et fiables suffisamment tôt dans le développement d'un projet minier peut permettre d'apporter des modifications nécessaires au concept de restauration. Il est donc crucial d'identifier les risques dès le départ afin d'adapter le plan de gestion des rejets miniers en conséquence.

Une bonne pratique consiste à évaluer (et ré-évaluer) périodiquement, les risques et vulnérabilités associés à la restauration du site (en maintenant à jour les connaissances et la disponibilité des données climatiques). En fonction du résultat, le niveau de détails nécessaires des projections climatiques pourra être adapté. L'échelle proposée ci-dessous (*Figure 12*) pourrait être ajustée à chaque projet et constitue uniquement un guide pour le choix de l'effort à porter à l'obtention des projections climatiques. Ainsi, cette échelle ne décrit pas les étapes à réaliser pour la conception, mais plutôt une évaluation de l'effort à porter pour obtenir et déterminer les paramètres climatiques, selon une approche similaire à ce qui se fait pour la conception des haldes à stériles par exemple avec le critère *Dump Stability Raing* (DRS; BCMWRPRC, 1991).

La première étape consiste à évaluer les risques et la vulnérabilité de l'ouvrage ou de la méthode de restauration face aux CC pour un site et une région donnée (évaluation locale) sur une échelle de faible à élevée (*Figure 12*). L'évaluation des vulnérabilités pourrait être réalisée avec des données théoriques puisqu'elle vise uniquement à établir la sensibilité du système.

Évaluation du risque :

Le risque peut être défini comme la probabilité d'occurrence de dommage compte tenu des interactions entre facteurs d'endommagement (aléas) et facteurs de vulnérabilité (peuplement, répartition des biens). L'évaluation du risque est fonction des caractéristiques du cas à l'étude. Les principaux paramètres qui peuvent affecter le niveau de risque d'un cas d'étude sont le potentiel de génération de DMC (présence plus ou moins importante de minéraux générateurs d'acidité ou de contaminants et présence de minéraux neutralisants), la taille du site, la sensibilité du milieu naturel, la proximité des populations, etc.

Évaluation de la vulnérabilité aux CC :

La vulnérabilité peut être définie comme la propension ou la prédisposition du système à être affecté de manière négative par les impacts des CC. Pour évaluer la vulnérabilité de la restauration face aux CC, il faut considérer plusieurs concepts : la capacité de la méthode à résister à un événement climatique extrême; la capacité à récupérer un fonctionnement normal à la suite des impacts d'un événement climatique extrême; la capacité à réagir ou à s'adapter aux CC. À noter que dans certains cas, la modification des conditions climatiques pourrait aussi s'avérer positive (ex. : une augmentation du bilan hydrique qui contribuerait à améliorer la performance de la

restauration) auquel cas la vulnérabilité pourrait être classée dans la même catégorie que les vulnérabilités faibles.

Cette double évaluation pourrait se faire de manière globale ou plus spécifique, par paramètre climatique par exemple. L'outil d'évaluation devrait également être appliqué à chaque ouvrage de manière séparée (digues, restauration des parcs à résidus et restauration des haldes à stériles).

Ces évaluations seraient ensuite utilisées pour définir une catégorie du niveau de détails requis pour les projections climatiques (Figure 12) :

- **Vert** : projections climatiques générales, mensuelles, en considérant quelques scénarios climatiques, évaluation simple des événements extrêmes.
- **Jaune** : niveau de détails intermédiaire : projections climatiques spécifiques au site, journalières et qui prennent en compte les événements extrêmes et quelques événements combinés probables.
- **Rouge** : niveaux de détails maximums requis : projections climatiques spécifiques au site, projections horaires, événements extrêmes définis précisément, prise en compte des événements combinés.

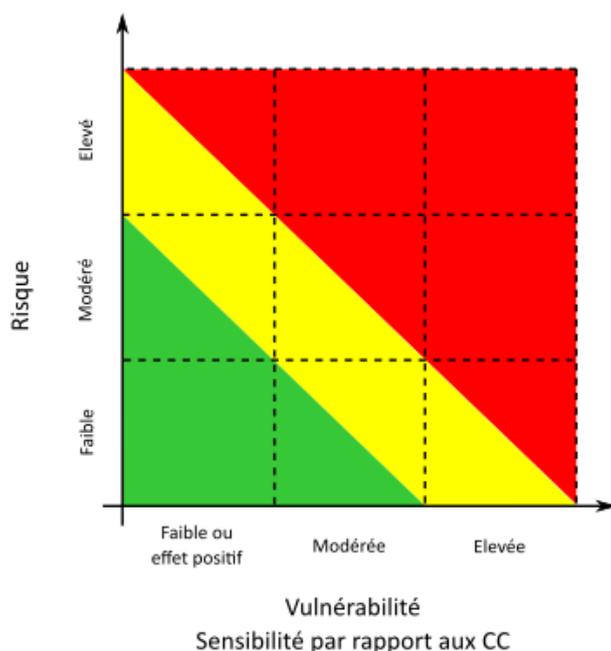


Figure 12 : Exemple de représentation de l'analyse du risque vs la vulnérabilité des ouvrages face aux CC et évaluation du niveau de détails des projections climatiques requis (vert, jaune ou rouge).

4.2 Approche pour identifier les conditions climatiques typiques et extrêmes

Tel que mentionné précédemment, les systèmes de recouvrement doivent être conçus pour résister aux conditions climatiques typiques mais également aux conditions extrêmes pouvant se

produire durant la durée de vie de l'ouvrage. Les conditions extrêmes considérées seront différentes selon le type de système de recouvrement. De plus, les conditions extrêmes peuvent ne pas être liées à un seul paramètre (ex. : température) mais plutôt à une combinaison d'évènements. Les conditions extrêmes (simples ou combinées) les plus pertinentes ainsi qu'une identification des bonnes pratiques à considérer afin d'intégrer les CC à la conception des principales méthodes de restauration sont présentés dans ce qui suit.

4.2.1 Barrières à l'oxygène

4.2.2.1 Recouvrement en eau

Dans le cas des recouvrements en eau dont le réservoir a été créé au moyen de digues, le principal problème associé aux évènements extrêmes est la gestion de l'eau lors de précipitations exceptionnelles. Lors de ces précipitations extrêmes, les déversoirs et évacuateurs de crue doivent être conçus pour résister à la crue maximale probable (CMP). La CMP est considérée comme la crue la plus sévère « raisonnablement possible » à un endroit particulier. La CMP est calculée différemment au printemps et à l'été-automne. Deux scénarios extrêmes au printemps sont habituellement utilisés : la PMP printanière combinée à un couvert de neige d'une période de récurrence de 1:100 ans ou une pluie printanière de récurrence de 1 :100 ans combiné à un enneigement maximal probable (EMP). La PMP été-automne est utilisée pour calculer la CMP d'été-automne. La PMP est définie comme étant la quantité de précipitations la plus élevée pouvant s'accumuler sur une superficie donnée en un temps donné et à une certaine période de l'année (WMO, 2009). La PMP peut être estimée à l'aide de différentes approches, certaines tentant de modéliser les phénomènes météorologiques (ex. : méthode de Clavet-Gaumont *et al.*, 2017) alors que d'autres utilisent des relations statistiques basées sur le climat passé comme celle proposée par Hershfield (1965). Actuellement, ce sont principalement les méthodes statistiques qui sont utilisées pour concevoir les infrastructures minières de gestion des résidus et de restauration.

Les CC vont contribuer à accélérer et intensifier le cycle de l'eau (Huntington, 2006). Les températures plus élevées vont également contribuer à augmenter la quantité d'humidité atmosphérique disponible pour précipiter durant les tempêtes ce qui devrait augmenter l'intensité et la fréquence des évènements de pluie extrêmes (IPCC, 2013; Kunkel *et al.*, 2013). Des travaux récents ont tenté d'évaluer l'influence des CC sur les évènements de précipitations extrêmes à l'aide de simulations climatiques. Malgré les incertitudes reliées à ces projections, certaines tendances peuvent être observées. Kunkel *et al.* (2013) mentionnent qu'une augmentation de la PMP de +20 à +30 % est à prévoir en Amérique du Nord pour l'horizon 2100 avec le scénario RCP 8.5. Labonté-Raymond *et al.* (2020) ont calculé des augmentations relatives de PMP pour le secteur de l'Abitibi en utilisant l'approche de Clavet-Gaumont *et al.* (2017) et de Hershfield (1965) pour la période 2071-2100. Les valeurs obtenues sont respectivement une augmentation de la PMP de +18 à +23 % et de +26 à +30 %. Ouranos (2015) a estimé l'augmentation des PMP de quatre bassins versants du Québec (Matagami, Manic 5, Kenogami et Saguenay-Lac-St-Jean) qui alimentent les barrages d'Hydro-Québec. Les résultats ont montré que la valeur médiane des changements projetés de la PMP à l'horizon 2050 (2041-2070) varie entre +10 et +20 %.

Labonté-Raymond (2020) a identifié des projets miniers récents et indique comment les CC ont été intégrés dans les conceptions d'ouvrages de rétention des rejets miniers. Certains projets assujettis à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts ont présenté une majoration de 10 % des débits de crue de projet (WSP, 2014, 2015). Dans un autre projet, il est mentionné que l'initiateur prévoit majorer de 4 % le design de conception des barrages et des digues (BAPE, 2013), afin de considérer l'impact des CC, sans cependant mentionner de références ni de détails quant au choix de cette valeur. Enfin, un autre projet assujetti à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts indique que l'accroissement de la récurrence de la crue de projet de 100 à 1 000 ans dans la plus récente version de la *Directive 019* couvre en partie l'effet des CC (BAPE, 2018). Aucune mesure additionnelle n'a été proposée dans ce cas pour tenir compte des CC. En se basant sur l'étude de Shadong *et al.* (2018), Ouellet *et al.* (2021) utilisent pour le cas de l'entreposage de rejet dans une fosse à ciel ouvert en Abitibi un facteur de majoration de 12 % pour la conception des infrastructures de gestion de l'eau (période de 2010-2040).

Ces exemples démontrent que la façon d'intégrer les précipitations extrêmes dans la conception des ouvrages miniers de retenues de rejets solides ou liquides varie grandement d'une étude à l'autre et consiste dans la plupart des cas à ajouter un facteur de majoration sur les événements extrêmes (PMP ou CMP). Les facteurs utilisés sont habituellement entre +0 et +10 %, ce qui est inférieur aux simulations climatiques réalisées dans les dernières années. Il serait de bonne pratique d'utiliser des facteurs de majoration des événements de pluies extrêmes provenant d'études récentes pour le Québec et ses régions. Pour les cas où les risques de débordement et d'instabilité des infrastructures sont associés à des infrastructures à risque important (ex. : ouvrages de rétention de résidus générateurs d'acides, avec retenue d'eau), des simulations climatiques spécifiques, à l'aide d'un ensemble multimodèles (cas plus favorables et d'autres plus défavorables), pourrait être générés afin d'identifier des événements extrêmes réalistes qui peuvent ensuite être intégrés dans la conception (Labonté-Raymond *et al.*, 2020).

Un autre paramètre qui peut influencer la performance d'un recouvrement en eau est l'épaisseur du couvert aqueux. En cas d'évaporation importante, si le recouvrement en eau est relativement peu épais et qu'il est peu alimenté de l'extérieur (ex. : eau du bassin versant, eaux souterraines), l'épaisseur de la couverture d'eau pourrait diminuer à un point où sa performance à contrôler les flux d'oxygène serait affectée significativement. Différentes méthodes sont proposées pour estimer l'évaporation d'une surface d'eau, basées soit sur le bilan hydrique ou énergétique (e.g. Delclaux *et al.*, 2007). Celles-ci sont basées sur des hypothèses variées et s'appliquent selon l'échelle temporelle visée (Xiao *et al.*, 2018). En effet, les paramètres climatiques qui influencent l'évaporation de façon journalière à hebdomadaire sont les effets à l'échelle synoptique, dont le délai thermique dû à la forte capacité thermique de l'eau. Sur une base saisonnière, la radiation nette et le gradient de température entre l'air et l'eau sont les principaux paramètres d'influence. De façon annuelle, l'évaporation est principalement affectée par la formation et la fonte de la glace, donc la durée où la surface est non gelée. L'étude de Xiao *et al.* (2018) présente une méthode d'évaluation du niveau d'eau passé, présent et futur d'un lac dans le nord des États-Unis. Cette approche est appropriée si la diminution de l'épaisseur du recouvrement en eau risque d'être un facteur de perte de performance à long terme.

Enfin, un autre paramètre climatique peut influencer la performance du recouvrement en eau à long terme : le vent (vitesse et direction). En effet, si la vitesse des vents augmente de façon significative et que la direction des vents s'aligne davantage avec la direction longitudinale du réservoir, il y a un risque que la remise en suspension des rejets soit accentuée affectant négativement la performance du recouvrement en eau (Awoh *et al.*, 2021). Idéalement, il faudrait prévoir les changements de vitesse et de direction des vents avec les CC et intégrer cette valeur dans les calculs pour définir l'épaisseur minimale du recouvrement et éviter la remise en suspension des particules.

4.2.1.2 Couvertures avec effets de barrière capillaire et nappe phréatique surélevée avec recouvrement monocouche

Dans le cas des techniques CEBC et NPS, la capacité à contrôler le DMC repose sur le maintien d'un degré de saturation élevé en tout temps respectivement dans la couche de rétention d'eau pour la CEBC et dans les résidus miniers générateurs de DMC pour la NPS. Pour les deux approches, le principal problème associé aux événements extrêmes est la désaturation lors de sécheresses extrêmes. Le terme sécheresse est défini comme une période anormalement sèche et suffisamment longue pour causer un grave déséquilibre hydrologique (IPCC, 2014). Lors de ces événements, les faibles précipitations limitent la recharge et les fortes températures augmentent l'évaporation de l'eau, ce qui favorise la désaturation. Si la quantité d'eau dans la couche de rétention d'eau (CEBC) ou les résidus miniers générateurs de DMC (NPS) diminue, les flux d'oxygène augmentent ce qui entraîne davantage d'oxydation des minéraux sulfureux contenus dans les rejets réactifs, donc davantage de génération de DMC. Précédemment dans ce guide il a été mentionné qu'il est prévu pour le futur un allongement des périodes de sécheresse l'été au Québec (voir [section 2.2](#)). Cela engendrerait un risque de perte de performance des barrières à l'oxygène de type CEBC et NPS grandissant avec le temps. Il est donc important d'analyser ce risque à l'étape de la conception.

Récemment, des études ont proposé différentes approches afin de tenir compte des événements de sécheresses extrêmes dans la conception des CEBC, sans ou avec CC. Toutes ces approches utilisent la modélisation numérique d'écoulement de l'eau en milieu non saturé pour évaluer l'influence des conditions climatiques (conditions frontières de surface) sur la performance des systèmes de recouvrement.

Une première approche consiste à appliquer 60 jours sans précipitations durant deux mois en été comme conditions frontières de surface des modélisations numériques (Ricard *et al.*, 1997; Bussière *et al.*, 2003; Broda *et al.*, 2014). Les conditions initiales (avant l'imposition de la sécheresse) correspondent la plupart du temps à un état hydrique qui ressemble aux conditions climatiques normales. Bien que semblant représentative de conditions extrêmes pour le Québec, cette période de deux mois n'est basée sur aucune analyse systématique de données météorologiques et il n'a pas été étudié si cette période devrait être augmentée ou non en raison des CC.

Une approche similaire a été utilisée par Ethier *et al.* (2018) qui a appliqué la période de 60 jours consécutifs sans précipitations pendant 5 années consécutives pour simuler une sécheresse extrême pour un cas de NPS au Québec. Pour intégrer l'effet des CC, la valeur des précipitations

a été augmentée de 20 % durant la période hors sécheresse et la période de sécheresse a été augmentée à 74 jours.

Plus récemment, Hotton *et al.* (2020) ont proposé une méthode pour identifier un épisode de sécheresse extrême pour les conditions actuelles et futures. Cette méthode utilise d'abord les données historiques des 30 dernières années afin d'identifier la plus longue période durant l'été où il n'y a pas eu de précipitations (précipitations < 1 mm). Par la suite, pour les périodes de sécheresse importante, le cumul des précipitations des 30 jours précédant la sécheresse est évalué. La période de sécheresse la plus longue observée est alors combinée avec le plus faible cumul de précipitations de 30 jours. La combinaison des deux événements est considérée comme la condition extrême actuelle de sécheresse la plus défavorable. La durée la plus longue sans précipitations était de 42 jours et le cumul de précipitation de 30 jours avant la sécheresse était de 3 mm. Afin d'intégrer les CC, les résultats des projections climatiques (à partir de trois modèles représentatifs) ont été utilisés et les données réanalysées avec la même approche. En appliquant des CC, les résultats montrent une augmentation de la période de sécheresse de 42 à 51 jours et une augmentation du cumul des précipitations des 30 jours précédant la sécheresse à 6 mm. Ces conditions de sécheresse ont ensuite été intégrées aux conditions climatiques d'une année typique (avec et sans CC) et utilisées dans les modèles numériques comme conditions frontières de surface.

Pour évaluer l'influence des CC sur la performance d'un système NPS mis en place dans le Nord Ontarien, Ahmad (2018) a quant à lui proposé une approche basée sur les résultats de 33 projections climatiques (de précipitation et de température) pour identifier deux années extrêmes de conditions sèches futures. Le premier scénario correspond à celui qui donne la précipitation annuelle cumulative sur 30 ans (2080-2100) la plus faible. Pour le deuxième scénario, l'auteur a utilisé un index d'humidité annuel (I_m) qui intègre l'évaporation potentielle évaluée avec la méthode modifiée de Thornthwaite (1948) et les précipitations. Il a ensuite sélectionné le scénario climatique donnant la valeur de I_m la plus défavorable et a appliqué ces conditions climatiques aux modèles numériques comme conditions frontières de surface. L'étude de Lieber *et al.* (2021) a comparé trois approches pour simuler l'effet des CC sur la performance d'un système NPS : i) une période de deux mois sans précipitation appliquée sur une année normale actuelle; ii) l'utilisation de l'année la plus sèche prédite selon différents scénarios climatiques projetés; iii) l'application du climat projeté sur 80 ans. Ces trois approches ont été utilisées comme conditions frontières de surface d'un modèle numérique représentant le système de recouvrement. Les résultats sont quelque peu différents selon l'approche choisie et il est donc recommandé d'utiliser une approche appropriée pour le niveau de détails souhaité selon l'avancement de la conception du système de restauration.

Lors de la conception d'un recouvrement de type CEBC ou lors de l'utilisation de la technique NPS, il faut s'assurer que le système réussira à atteindre les objectifs de performance autant en conditions typiques qu'extrêmes, et que pour le climat actuel que futur. Les bonnes pratiques voudraient que le climat historique soit d'abord analysé pour déterminer des conditions climatiques typiques historiques et pour identifier des conditions extrêmes de sécheresse. Pour s'assurer que la CEBC ou la technique NPS puissent atteindre les objectifs de performance avec

CC, des conditions typiques et extrêmes futures doivent être identifiées. Pour déterminer les conditions typiques futures, des projections climatiques de différents modèles de climat pour une période d'environ 100 ans doivent être obtenues. Certains de ces scénarios pourraient ensuite être sélectionnés (certains plus favorables et d'autres plus défavorables) et appliqués comme conditions frontières de surface aux modèles numériques permettant de prédire le comportement hydrogéologique non saturé du système de recouvrement. Les travaux de Hotton *et al.* (2020), Lieber *et al.* (2021) et Ahmad (2018) peuvent être utilisés à titre d'exemples. Pour évaluer de façon préliminaire l'effet des sécheresses extrêmes avec CC, un facteur de majoration peut être utilisé sur les sécheresses actuelles basé sur des résultats climatiques récents. Dans un cas où les CC pourraient avoir une influence marquée sur la performance des barrières à l'oxygène de type CEBC ou NPS, des études plus poussées qui impliquent une analyse de résultats obtenus à l'aide des modèles climatiques devraient être entreprises.

4.2.2 Barrières à l'eau

Le recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée consiste à limiter l'infiltration d'eau par la mise en place d'un système multicouche, dont une ou deux couches sont constituées de matériau naturel ou géosynthétique peu perméable (Aubertin *et al.*, 1995). Peu de littérature sur l'influence des CC sur la performance de ce type de recouvrement est actuellement disponible. Cependant, différentes approches existent pour estimer la percolation à travers un tel système de recouvrement.

Pour les systèmes de recouvrements avec matériaux naturels à faible conductivité hydraulique saturée tels que l'argile compactée ou les géocomposites bentonitiques (GCB), l'influence des CC peut être évaluée en modifiant les conditions frontières de surface dans les modèles numériques de l'écoulement de l'eau en milieu non saturé.

Pour l'évaluation de la performance de systèmes de recouvrement constitués de géomembrane (GM), les approches utilisées sont différentes. L'hypothèse émise en premier lieu est que le contrôle de l'infiltration d'eau dépend essentiellement de la GM et que l'eau s'infiltré principalement à travers les défauts comme les petites perforations, trous, ou fentes (non réparés) et plis générés lors de l'installation. Le flux d'eau passant à travers ces imperfections dépendra, en plus de leur taille et forme, de la charge hydraulique s'appliquant sur la GM. Un autre facteur qui influence la percolation à travers la GM est la conductivité hydraulique du matériel sous-jacent et la qualité du contact entre ce matériel et la GM. Plusieurs modèles empiriques ont été développés afin d'estimer le flux de percolation à travers les systèmes de recouvrement avec GM (ex. : Giroud, 1997; Touze-Foltz & Giroud, 2003; Giroud & Touze-Foltz, 2005). Parmi les paramètres de ces équations, celui qui sera le plus influencé par les CC est la charge hydraulique qui s'applique au-dessus de la GM. Si les précipitations augmentent, la charge hydraulique risque d'augmenter et, par le fait même, entraîner une augmentation des flux de percolation. Par exemple, pour des défauts circulaires et avec un bon contact entre la GM et le matériel sous-jacent, en utilisant la formule de Giroud (1997), la relation entre l'augmentation du flux et la charge hydraulique serait linéaire avec une pente d'environ 1 degré. C'est-à-dire qu'une augmentation de charge hydraulique (à cause de la précipitation) de 10 % entraînerait une augmentation du flux d'eau traversant la GM d'environ 10 %.

Dans le cas des recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée, les paramètres climatiques importants sont la quantité annuelle de précipitations sur le site restauré et le taux d'évaporation pouvant transférer l'eau du recouvrement vers l'atmosphère. Il est donc important de déterminer, pour le climat actuel, des années défavorables où le taux de précipitation annuel est élevé et où l'évaporation est faible. Il faut ensuite déterminer des années défavorables futures, qui peuvent être obtenues soit en appliquant un facteur de majoration (approche pour les cas à faible risque) ou encore en interprétant les résultats provenant de modèles climatiques (ex. : Ahmad, 2018; Lieber *et al.*, 2021). Pour les recouvrements avec matériaux naturels (argile compactée ou GCB), les années défavorables peuvent être intégrées comme conditions frontières de surface dans les modèles numériques des systèmes de recouvrement, afin de prédire l'influence des CC sur les taux de percolation. Pour les systèmes de recouvrements avec GM, le défi est d'estimer l'influence des CC sur la charge hydraulique qui s'applique sur celle-ci. Une estimation de la charge peut être réalisée par modélisation numérique non saturée, où l'hypothèse émise est que la membrane est très peu perméable. L'influence de changer les conditions climatiques sur la charge est ensuite évaluée et cette valeur est intégrée dans les équations empiriques permettant d'estimer la percolation. Il serait aussi important d'évaluer l'impact d'un évènement de pluie extrême sur les percolations. Les approches pour déterminer les évènements extrêmes avec et sans CC ont été présentées à la section des recouvrements en eau (voir [section 4.2.2.1](#)) et peuvent être appliquées de la même façon ici.

4.2.3 Recouvrement isolant

Dans le cas des recouvrements isolants, malgré des conditions extrêmes, la température dans les résidus doit demeurer en-dessous de la valeur cible identifiée à l'étape de conception.

Quelques références aux conditions extrêmes à simuler à l'étape de la conception existent dans la littérature. Par exemple, le rapport MEND (2004) suggère d'utiliser l'année la plus chaude sur une période de 100 ans (basée sur des données historiques) pour évaluer l'épaisseur du recouvrement. À partir de cette année la plus chaude, le paramètre appelé indice de dégel (I_{at} , *thawing index* en anglais) est évalué. Cet indice représente la somme sur une année complète de tous les degrés-jours (pour une journée donnée, nombre de degrés Celsius dont la température moyenne s'écarte d'une température de base donnée; ECCC, 2021) dont la température moyenne extérieure est supérieure à 0 °C (Andersland et Ladanyi, 2004). Le paramètre I_{at} de l'année la plus chaude permet ensuite d'estimer l'épaisseur du recouvrement pour résister à cette année extrême. En effet, il est possible d'obtenir une relation entre le paramètre I_{at} et l'épaisseur de la zone active (qui correspond à l'épaisseur minimale du recouvrement isolant) pour un type de matériau et à une teneur en eau donnés en utilisant des essais en cellule expérimentale sur le terrain ou en interprétant des données obtenues dans un environnement semblable.

Une autre approche simplifiée est proposée également dans MEND (2004) soit d'utiliser un facteur de sécurité de 1,15 sur l'épaisseur de recouvrement pour tenir compte des incertitudes diverses, dont les CC. Enfin, certains auteurs ont proposé une autre approche simple qui consiste à prendre une année typique historique et d'appliquer sur les températures quotidiennes une augmentation qui correspond à l'augmentation annuelle moyenne de température prévue par

un ensemble de projections climatiques (ex. : 0,06 °C/an, pour des projections climatiques utilisant le scénario RCP 6.0; Boulanger-Martel *et al.*, 2021b). Les températures modélisées à la surface des rejets miniers peuvent ensuite être comparées à la température cible garantissant la stabilité chimique des rejets. À noter que les deux dernières approches impliquent l'obtention de données climatiques typiques futures et négligent les conditions extrêmes futures.

Les approches mentionnées précédemment dans le cas des recouvrements isolants sont simples et intègrent les CC de façon peu précise. Cela peut être suffisant dans un contexte de faible risque en lien avec les CC. Dans les autres cas, il serait judicieux d'intégrer les CC de façon plus précise.

Dans un premier temps, il est important d'obtenir des projections climatiques de différents modèles climatiques pour une période d'environ 100 ans à l'endroit où le recouvrement doit être construit. Certaines de ces projections peuvent ensuite être sélectionnées (certaines plus favorables et d'autres plus défavorables) et appliquées comme conditions frontières de surface aux modèles numériques simulant le transfert de chaleur dans les matériaux meubles (Boulanger-Martel *et al.*, 2021b). Il est pertinent de valider l'ampleur de l'impact des CC sur le comportement du recouvrement isolant et sur sa capacité à maintenir les résidus sous la valeur de température cible, en conditions typiques futures.

Afin de s'assurer que le recouvrement soit en mesure de résister aux conditions extrêmes, il est important de les identifier. Une façon simple est d'identifier une année chaude prédite par les modèles climatiques (approche similaire à Bashir *et al.*, 2020 pour une année humide).

Il est également pertinent de simuler des événements combinés. Le pire scénario qui peut mener à un dépassement de la température cible est probablement la combinaison d'une température de l'air élevée pendant l'été, suivi d'une arrivée précoce du couvert de neige à l'automne (qui aura pour effet de limiter la profondeur de gel pendant l'hiver), puis d'une fonte des neiges rapide et d'un autre été plus chaud que la normale. Ce genre de combinaison pourrait avoir plus d'impact qu'une année extrême chaude. La récurrence de chacune des composantes des conditions extrêmes serait plus courte (ex. : 30-50 ans) que celle où il y a seulement qu'un paramètre d'impliqué, mais c'est la combinaison des récurrences qui entraînera une faible probabilité d'apparition de ces conditions.

4.2.4 Autres considérations

Il est à noter que l'emphase est mise dans ce guide sur la performance des recouvrements à contrôler la stabilité chimique des rejets miniers réactifs. Cependant, toutes les infrastructures minières doivent également demeurer stables physiquement, et ce, autant dans les conditions de fermeture actuelles que futures. Les CC doivent donc également être intégrés dans l'évaluation de la stabilité physique à long terme. De plus, la capacité des infrastructures de drainage à évacuer les pluies extrêmes présentes et futures doit également être évaluée. Enfin, l'aspect de la végétation doit être intégré dans l'estimation de la performance future avec CC.

- **Infrastructures de drainage** : Selon le *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec* (MERN, 2017), « La durée de vie des ouvrages qui resteront en place après la fermeture et la restauration du site devra être d'au moins 1 000

ans. Celle des sites potentiellement générateurs de DMA ou DNC devrait être encore plus longue ». Les ouvrages de dérivation des eaux de ruissellement qui doivent être maintenus après les opérations doivent être conçus pour une crue de conception déterminée en fonction des conséquences advenant un débordement. Actuellement, ces fossés sont généralement conçus en utilisant une précipitation de récurrence variant entre 100 ans et la PMP, selon les conséquences de l'érosion. Comme au Québec l'intensité et la fréquence des fortes précipitations devraient augmenter à la suite des CC, les débits à gérer seront plus élevés que ceux obtenus au moment de la conception des ouvrages. Ainsi, les propriétaires ou gestionnaires de sites miniers devront s'attendre à devoir augmenter la capacité des fossés ou la robustesse des éléments de protection contre l'érosion, afin de maintenir le niveau de sécurité déterminé pour les ouvrages. Ainsi, il serait de bonne pratique d'utiliser des facteurs de majoration des événements de pluies extrêmes provenant d'études récentes pour le Québec et ses régions pour la conception de ces ouvrages. Pour les cas où les conséquences d'un débordement sont plus importantes, des simulations climatiques spécifiques pourraient être générées, afin d'identifier des événements extrêmes réalistes, qui peuvent ensuite être intégrés dans la conception.

- **Stabilité des digues :** L'impact potentiel des CC sur la stabilité des digues se traduit principalement par (1) une augmentation du niveau phréatique dans les parcs à résidus et (2) une intensification de l'érosion externe des matériaux des digues (ICOLD, 2001; Rico *et al.*, 2008; WISE, 2017). Dans le premier cas, l'augmentation des précipitations annuelles et l'accumulation des événements de précipitations (normales et extrêmes) pourraient entraîner une augmentation du bilan d'eau sur les parcs à résidus et donc une élévation du niveau phréatique. Les opérateurs devraient donc évaluer précisément la succession et l'intensité des précipitations projetées. Il est recommandé d'évaluer les précipitations sur une base horaire, ou, a minima, journalière. En effet, l'intensité des précipitations a un impact direct sur l'infiltration nette sur les parcs à résidus et sur le ruissellement. Les conditions de surface (ex. : végétation, gel ou neige, fissures de dessiccation) ont également un impact direct sur l'infiltration et devraient également être considérées dans la détermination des événements les plus critiques (ex. : une longue période de précipitations de faible intensité en automne pourrait avoir un effet plus critique sur le niveau de la nappe qu'une pluie extrême à la fin de l'hiver). Concernant les risques d'érosion, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes seront plus critiques et devraient donc être évaluées avec davantage de précision. L'approche suggérée est donc similaire à celle proposée pour l'évaluation des conditions extrêmes pour la gestion des eaux de surface (voir paragraphe plus haut).
- **Végétalisation :** En ce qui concerne l'effet de la végétation sur la performance des recouvrements, des analyses paramétriques avec les modèles numériques validés peuvent être utiles pour anticiper les effets de conditions extrêmes futures. Pour les barrières à l'oxygène de type CEBC et NPS, il est recommandé de considérer les valeurs d'indices de surface foliaire et de profondeur maximale d'enracinement les plus élevées parmi les essences futures potentiellement présentes sur le site restauré, pour anticiper les extrêmes de désaturation des matériaux du recouvrement. Finalement, des épisodes de mortalité élevée de la végétation seraient à considérer comme conditions extrêmes associées aux CC

(ex. : attribuables à une sécheresse, une épidémie d'insectes ou à un incendie). Il est recommandé d'envisager leurs conséquences sur la vulnérabilité des recouvrements à l'érosion et sur les propriétés des matériaux.

5. Disponibilité et accessibilité aux données

5.1 Obtention de données climatiques : sources et approches

5.1.1 Sources d'informations climatiques

Il est important d'obtenir des informations climatiques de sources crédibles, c'est-à-dire provenant d'organismes reconnus dans le domaine de la science du climat. Le *Tableau 2* présente une liste d'organismes canadiens reconnus qui peuvent fournir des données climatiques issues de produits d'observations et de simulations sur le territoire. Certaines de ces entités donnent aussi accès à des explications de concepts utiles aux utilisateurs.

Tableau 2 : Liste d'organismes reconnus et pouvant être consultés pour obtenir de l'information climatique

Organismes	Région	Adresse
Internationaux		
Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)	Monde	www.ipcc.ch/
Copernicus Climate Change Service (C3S)	Monde	climate.copernicus.eu/
Nationaux (Gouvernement du Canada)		
Centre canadien des services climatiques (CCSC)	Canada	www.canada.ca/services-climatiques
Environnement et Changement climatique Canada (ECCC)	Canada	www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique.html
Régionaux		
Ouranos	Québec	www.ouranos.ca
Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC)	Québec	www.environnement.gouv.qc.ca
Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC)	Colombie-Britannique	www.pacificclimate.org
ClimateWest	Prairies	www.climatewest.ca
Prairie Climate Center (PCC)	Manitoba	www.prairieclimatecentre.ca

Liste non-exhaustive, mise à jour le 2 février 2022. Liens vérifiés le 2 février 2022.

5.1.2 Climat passé

Les observations et données climatiques issues de produits d'observations permettent d'étudier le climat passé. Le choix de la base de données (*Tableau 3*) est à faire en fonction des besoins de l'étude :

- Observations, si l'étude s'intéresse à un endroit à proximité d'une station d'observation;
- Observations interpolées sur une grille, si l'étude s'intéresse à un endroit éloigné des stations d'observation;
- Données aux stations ajustées et homogénéisées, s'il s'agit d'étudier des tendances passées pour des lieux précis.

Tableau 3 : Liste des bases de données climatiques historiques

Type de données	Exemples de données disponibles	
	Caractéristiques	Lien
Observations	Données aux stations enregistrées par le Service météorologique du Canada (SMC)	www.climat.meteo.gc.ca
	Données climatiques du Québec – carte et données payantes via le service Info-Climat	www.environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp
	Atlas hydroclimatique du Québec méridional – données sur le régime hydrique actuel	www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique
Données historiques interpolées sur une grille	ANUSPLIN : Données observées interpolées sur une grille de 10 km produites sur l'ensemble du Canada par Ressources naturelles Canada.	fennerschool.anu.edu.au/research/products/anusplin
Données aux stations ajustées et homogénéisées	Données climatiques canadiennes ajustées et homogénéisées (DCCAHA)	www.ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/9c4ebc00-3ea4-4fe0-8bf2-66cfe1cddd1d

Liste non-exhaustive, mise à jour le 2 février 2022. Liens vérifiés le 2 février 2022.

5.1.3 Climat futur

Différentes approches peuvent être utilisées pour obtenir de l'information pertinente en lien avec les CC, qui peut ensuite être utilisée par le concepteur d'ouvrage de restauration des sites miniers.

5.1.3.1 Projections climatiques

5.1.3.1.1 Scénarios climatiques

La plupart des scénarios climatiques disponibles au moment de la rédaction de ce guide sont ceux de la température à la surface (température à 2 m) et des précipitations. Ce sont deux variables bien connues, qui font partie des données qui doivent être archivées par les centres de modélisation lorsqu'ils participent à des projets de modélisation internationaux (*Tableau 4*). Les précipitations sont présentées sous forme de moyennes ou de centiles. Les indicateurs climatiques proposés par les centres de services climatiques sont généralement dérivés de ces deux variables. Ils sont construits en utilisant un ou des seuils pertinents pour une application donnée (ex. : nombre de jours où la température maximale dépasse 35 °C durant l'été). Certains sites permettent aussi à l'utilisateur de définir le ou les seuils de certains indicateurs.

Tableau 4 : Données climatiques disponibles sous forme de séries temporelles ou de moyennes sur une période donnée provenant de scénarios climatiques

	Données climatiques canadiennes				Portraits climatiques				PCIC data portal				Atlas climatique du Canada			
	J	M	A	S	J	M	A	S	J	M	A	S	J	M	A	S
Température moyenne (T)		X	X	X			X	X						X	X	X
Température maximale (T_{max})		X	X	X			X	X	X					X	X	X
Température minimale (T_{min})		X	X	X			X	X	X					X	X	X
Précipitation totale		X	X	X			X	X	X					X	X	X
Précipitation totale solide							X	X								
Précipitation totale liquide							X	X								

Les différentes fréquences sont : J = journalier; M = mensuel; A = annuel; S = saisonnier (hiver, printemps, été, automne).

Les détails des bases de données sont fournis dans le *Tableau 5*.

Liste non-exhaustive, mise à jour le 9 février 2022.

Les scénarios climatiques peuvent être présentés sous forme de séries temporelles et/ou de cartes. Une liste non-exhaustive des portails et documents permettant de récupérer de l'information climatique est présentée dans le *Tableau 5*.

Tableau 5 : Liste des portails et documents permettant de récupérer de l'information climatique

	Outils	Organismes	Portée	Lien
Portails internationaux	Atlas interactif du GIEC	GIEC	Internationale	interactive-atlas.ipcc.ch/
	Climate Data Store	Copernicus, ECMWF, commission européenne	Internationale	cds.climate.copernicus.eu/#!/home
Portails nationaux	Données climatiques canadiennes	CCSC, ECCC, Ouranos, PCC, PCIC	Nationale	www.donneesclimatiques.ca
	Atlas climatique du Canada	PCC, CCSC	Nationale	www.atlasclimatique.ca
	PAVICS	Ouranos, CCSC, ECCC	Nationale	pavics.ouranos.ca/
Autres portails	Portraits climatiques	Ouranos	Québec principalement	www.ouranos.ca/portraits-climatiques
	PCIC data portal	PCIC	Nationale et Colombie-Britannique	www.pacificclimate.org/data
	Outil d'extraction de données climatiques	CCSC	Nationale	changements-climatiques.canada.ca/donnees-climatiques/#/
	Visualiseur de données climatiques	CCSC	Nationale	visualiseur-climatique.canada.ca/cartes-climatiques.html#/
	Données climatiques du Québec – carte et données payantes via le service Info-Climat	MELCC	Québec	www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/produits.htm
	Atlas hydroclimatique du Québec méridional – données sur le régime hydrique futur	MELCC	Québec	www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique
Document	Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques - Évaluation des effets des changements climatiques sur les données de conception climatique au Canada	ECCC	Nationale	scenarios-climatiques.canada.ca/?page=buildings-report (Environnement et Changement climatique Canada, 2020)

Liste non-exhaustive, mise à jour le 2 février 2022. Liens vérifiés le 2 février 2022.

CCSC : Centre canadien des services climatiques

ECCC : Environnement et Changement climatique Canada

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MELCC : Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques

PAVICS : Power Analytics and Visualization for Climate Science

PCC : Prairie Climate Center

PCIC : Prairie Climate Center

5.1.3.1.2 Deltas

Les variables de vent, d'humidité relative, de radiation solaire, de neige au sol, de verglas, d'évapotranspiration sont moins accessibles, voire non disponibles, sous forme de scénarios climatiques en date de la rédaction de ce guide. Les informations disponibles pour ces variables sont davantage sous la forme de deltas. Un delta est « la différence entre la valeur future et celle de la période de référence (ou période de base) d'une variable climatique telle que simulée par un modèle climatique » (Données climatiques Canada, 2022). En d'autres termes, un delta représente un changement ou une anomalie par rapport à une climatologie de référence. Les deltas permettent de caractériser la sensibilité du système aux CC. Les deltas pour la radiation, l'évapotranspiration et le verglas ne sont pas disponibles à notre connaissance. Des deltas sont disponibles pour la température, les précipitations, l'humidité relative, la vitesse du vent et la neige au sol et peuvent être obtenues via les références suivantes:

- Le document Environnement et Changement climatique Canada (2020) fournit des deltas de changements projetés pour différents niveaux de réchauffement global (de +0,5 à +3,5 °C). Les variables considérées sont la température, les précipitations, l'humidité relative, le vent, la neige au sol. Les niveaux de confiance sur les différentes projections sont spécifiés. Les valeurs sont disponibles pour de nombreuses municipalités au Canada dans des tableaux Excel accessibles par des liens dans le document.
- Le *Visualiseur de données climatiques* fournit des deltas pour les variables température moyenne, précipitations totales, vitesse du vent et épaisseur de la neige, basées sur un ensemble de projections de MCG (modèles climatiques globaux) issus du projet d'intercomparaison des modèles couplés CMIP5. Les données sont disponibles à des fréquences annuelles et saisonnières.

ATTENTION : il s'agit ici de projections climatiques n'ayant pas été post-traitées. Leur utilisation en tant que delta est fortement encouragée, alors que leur utilisation directe sous forme de série temporelle est à proscrire.

5.1.3.2 Analogues climatiques

Les analogues climatiques correspondent à d'autres régions du monde qui ont présentement un climat similaire à un climat futur projeté d'une région cible. Afin de déterminer les meilleurs analogues climatiques possibles, la similarité est déterminée avec des statistiques qui s'appliquent généralement sur un nombre limité d'indicateurs climatiques (ex. : durée de la saison sèche, degrés-jours de croissance, cumul annuel de précipitations). L'objectif de rechercher des analogues climatiques est d'identifier des lieux où des pratiques en cours peuvent fournir des pistes de solutions d'adaptation pour la région cible. Par exemple, si les étés à Montréal (Québec) connaissaient une augmentation d'environ 6 % des températures et d'environ 17 % des précipitations d'ici la fin du siècle, ils ressembleront aux étés actuels d'Albany (New York).

5.1.3.3 Scénarios synthétiques (What if)

Les scénarios synthétiques sont produits en faisant varier une variable climatique particulière par une quantité réaliste, mais arbitraire, pour obtenir des futurs probables. Ils sont particulièrement

utiles lorsqu'aucune sortie de modèle n'est disponible. Les contraintes sont déterminées par les usagers et il est possible d'explorer la sensibilité d'un système. Il faut néanmoins prendre en considération que les valeurs choisies sont arbitraires et que l'identification des contraintes requiert un bon niveau d'expertise. La période sans précipitation de 60 jours utilisée dans le passé comme conditions extrêmes pour la conception de barrière à l'oxygène en Abitibi est un bon exemple de scénario synthétique (Ricard *et al.*, 1997; Bussière *et al.*, 2003; Broda *et al.*, 2014; Ethier 2018; Lieber *et al.*, 2021).

5.2 Disponibilité et accessibilité aux données sur la distribution des essences forestières

Ressources naturelles Canada (RNC) propose sur son site Internet des cartes de niches (ou enveloppes) climatiques spécifiques à chaque espèce végétale, niches qui sont déterminées par des méthodes statistiques en ciblant les valeurs climatiques minimales et maximales associées aux lieux d'occurrence connus de chaque espèce (RNC, 2021). Pour chaque espèce, des cartes de la localisation actuelle et future potentielle de la niche climatique sont disponibles. Des combinaisons de plusieurs scénarios (RCP 2.6, 4.5 ou 8.5) et modèles (CanESM2, HadGEM2-ES, CESM1[CAM5], MIROC-ESM-CHEM, composite-AR5) climatiques sont proposées pour obtenir la niche climatique future jusqu'en 2100.

Au Québec, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) propose sur son site Internet un atlas interactif basé sur les travaux de Périé *et al.*, (2009 - présent), qui permet de voir l'évolution de l'habitat (perte, gain, amélioration ou détérioration d'habitat) de 50 espèces d'arbres jusqu'en 2050 ou jusqu'en 2080 par rapport à la période de référence 1961-1990. Les habitats sont définis cette fois en se basant sur les niches climatiques des espèces (température annuelle moyenne, précipitations totales annuelles et précipitations utiles), mais aussi sur la topographie (altitude) et la qualité des sols (régime hydrique et type de dépôt de surface) (Périé *et al.*, 2014).

6. Conclusion

L'un des plus grands défis liés aux CC pour l'industrie minière est de maintenir la stabilité chimique et physique des aires d'entreposage des rejets miniers, pendant les opérations et surtout après la fermeture. La durée de vie des infrastructures de restauration étant supérieure à 100 ans, cette étape du cycle minier est la plus susceptible d'être gravement affectée par les CC. La défaillance des ouvrages de restauration pouvant entraîner une contamination de l'environnement, la prise en compte des CC à long terme dès la phase de conception des projets miniers est indispensable pour réduire ces risques.

Toutes les méthodes de restauration seront influencées par les CC, mais à différents degrés en fonction de plusieurs paramètres dont certains sont spécifiques au site. Cela signifie qu'une même technologie utilisée sur deux sites différents exposés à des conditions climatiques similaires peut ne pas présenter la même vulnérabilité en raison des conditions particulières du site. De plus, lors de la conception de systèmes de restauration, une attention particulière doit être portée à l'évolution de la végétation en fonction du temps et des CC. Le défi est particulièrement grand puisque de nombreuses incertitudes demeurent autant d'un point de vue de l'ingénierie (ex. quelle sera l'influence de la végétation sur les propriétés des matériaux et sur le bilan hydrique?) que sur le plan biologique (ex. à quelle vitesse la migration des espèces d'arbres s'effectuera-t-elle?). Malgré ces incertitudes, le concepteur doit intégrer cet aspect dans son travail et justifier les approches préconisées.

Il n'existe donc pas d'approche simple pour intégrer les CC à la conception des ouvrages de restauration. De bonnes pratiques telles que celles présentées dans ce guide ainsi que son jugement professionnel doivent être utilisés pour définir un concept de restauration robuste face aux CC. Par ailleurs, comme les projections climatiques comportent des incertitudes, le travail de conception des ouvrages de restauration devient plus que jamais dynamique et demande des réanalyses constantes qui intègrent les plus récentes connaissances en science du climat et projections climatiques. La performance à long terme des ouvrages de restauration doit être revalidée régulièrement à partir de données climatiques récentes et des résultats de suivi réalisés directement sur le terrain.

Le présent guide constitue un outil pertinent pour les concepteurs de plan de restauration et de réaménagement en donnant tout d'abord des notions de base concernant les CC, un résumé des CC projetés au Québec ainsi que des projections en termes d'évolution de la distribution des essences forestières. Il permet de mieux comprendre les impacts potentiels des CC sur la performance à long terme des principales techniques de restauration considérées dans le guide et fournit également des approches d'adaptation. Le guide propose une approche de conception des ouvrages de restauration intégrant les CC qui intègre la notion de risque afin de guider les requérants vers une priorisation des mesures d'adaptation à mettre en place. Le guide propose également une approche pour identifier les conditions climatiques typiques et extrêmes et ce, pour chaque technique de restauration. Enfin, le guide fournit une liste d'organismes qui peuvent être consultés pour obtenir des données au sujet du climat présent et futur ainsi que sur les changements anticipés dans la distribution des essences forestières. Afin de compléter les informations contenues dans ce guide et d'outiller davantage les requérants, des tableaux

synthétiques sont fournis en annexes ainsi qu'une grille de validation permettant d'évaluer si la démarche choisie pour intégrer les CC dans la conception des ouvrages de restauration est complète.

Le présent guide fait ainsi un état des connaissances actuelles concernant l'influence des CC sur les ouvrages de restauration. Il existe cependant encore beaucoup d'incertitudes et certains aspects devront être étudiés et développés dans le futur, notamment :

- Les événements extrêmes climatiques (simples ou combinés) à considérer lors de la conception des méthodes de restauration doivent être mieux définis et ce, autant pour le climat actuel que futur;
- L'approche basée sur le risque, présentée dans ce guide pour évaluer le niveau de détails nécessaire des données climatiques à utiliser pour mieux intégrer les CC dans la conception des ouvrages de restauration, est vouée à évoluer afin d'augmenter son niveau de précision;
- Les modèles numériques utilisés pour prédire la performance des recouvrements prennent peu en compte certains paramètres liés à l'influence de la végétation sur l'interception ou le ruissellement, et les connaissances sont encore limitées quant à l'effet des racines sur les propriétés des matériaux de recouvrement;
- Comme certaines méthodes de restauration semblent plus vulnérables que d'autres face aux CC, il serait important de quantifier et comparer cette vulnérabilité et d'identifier les conditions qui augmente la vulnérabilité d'une technique donnée;
- Les outils permettant d'avoir accès à des données climatiques sous une forme facilement et rapidement exploitable par le concepteur sont peu nombreux et mériteraient d'être développés.

7. Références

- ADU-WUSU, C., YANFUL, E.K., and MIAN, M.H. (2001). Field evidence of resuspension in a mine tailings pond. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 796–808. doi:10.1139/t01-005
- AHMAD, F. (2018). Effect Of Climate Change on a Monolithic Desulphurized Tailings Cover. Master Thesis, Civil Engineering, York University, Toronto, ON, Canada, 238p.
- ALAM, M. S., BARBOUR, S. L., HUANG, M., and LI, Y. (2020). Using Statistical and Dynamical Downscaling to Assess Climate Change Impacts on Mine Reclamation Cover Water Balances. *Mine Water and the Environment*, 39(4), 699-715.
- ANDERSLAND, O.B. and LADANYI, B. (2004). *Frozen ground engineering* (2 nd ed). John Wiley & Sons.
- ATKINS, R.J., HAY, D., and ROBERTSON, J. (1997). Shallow water cover design methodology and field verification. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Mine Drainage* (pp. 211–228).
- AUBERTIN, M., AACHIB, M., MONZON, M., JOANES, A.M., BUSSIÈRE, B., and CHAPUIS, R. (1999). Étude de laboratoire sur l'efficacité de recouvrements construits à partir de résidus miniers. MEND 2.22.2b.
- AUBERTIN, M., PABST, T., BUSSIÈRE, B., JAMES, M., MBONIMPA, M., BENZAAZOUA, M., and MAQSOUUD, A. (2015). Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. In *Symposium 2015 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., PABST, T., JAMES, M., and MBONIMPA, M. (2016). Review of reclamation techniques for acid generating mine wastes upon closure of disposal sites. In: A. Farid, A. De, K. R. Reddy, N. Yesiller, D. Zekkos (Eds.), *Geo-Chicago 2016: Geotechnics for Sustainable Energy*. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/9780784480137.034
- AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., and BERNIER, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers [CD-ROM]*. Les Presses Internationales Polytechnique, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P., AACHIB, M., BUSSIÈRE, B., RICARD, J.-F., and TREMBLAY, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers (MEND report 2.22.2a). *Mine Environment Neutral Drainage Program*.
- AWOH, S., MBONIMPA, M., and BUSSIÈRE, B. (2021). Water covers. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage* (pp. 135–166). CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-6
- BAPE (2013). *Projet d'ouverture et d'exploitation d'une mine d'apatite à Sept-Îles - Rapport d'enquête et d'audience publique*. Rapport 301.

- BAPE (2018). Projet d'aménagement de nouveaux bassins d'eau de procédé et de sédimentation à la mine de Mont-Wright à Fermont Québec. Rapport 342.
- BARNSWELL, K. D., and DWYER, A.F. (2011). Assessing the performance of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in northwestern Ohio. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 137: 301–305.
- BASHIR, R., AHMAD, F., and BEDDOE, R. (2020). Effect of Climate Change on a Monolithic Desulphurized Tailings Cover. *Water*, 12(9), 2645.
- BERTEAUX, D., CASAJUS, N., and DE BLOIS, S. (2014). Changements climatiques et biodiversité du Québec: Vers un nouveau patrimoine naturel. Les Presses de l'Université du Québec, Québec.
- BOISVERT-MARSH, L., PÉRIÉ, C., and DE BLOIS, S. (2014). Shifting with climate? Evidence for recent changes in tree species distribution at high latitudes. *Ecosphere*, 5(7), 1–33. doi:10.1890/es14-00111.1
- BOTULA, Y.-D., GUITTONNY, M., BUSSIÈRE, B., and BRESSON, E. (2019). Will tree colonisation increase the risks of serious performance loss of engineered covers under climate change in Québec, Canada? In: A. B. Fourie and M. Tibbett (Eds.), *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Mine Closure* (pp. 607–620). Australian Centre for Geomechanics. doi:10.36487/ACG_rep/1915_49_Botula
- BOULANGER, Y., TAYLOR, A., PRICE, D.T., CYR, D., MCGARRIGLE, E., RAMMER, W., SAITEMARIE, G, BEAUDOIN, A., GUINDON, L, and MANSUY, N. (2017). Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone. *Landscape Ecology*, 32, 1415–1431. doi:10.1007/s10980-016-0421-7
- BOULANGER-MARTEL, V., BUSSIÈRE, B., and CÔTÉ, J. (2021a). Insulation covers. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 9, p. 203–224. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-9
- BOULANGER-MARTEL, V., BUSSIÈRE, B., and CÔTÉ, J. (2021b). Insulation covers with capillary barrier effects to control sulfide oxidation in the Arctic. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(4), 583-594.
- BOULANGER-MARTEL, V., BUSSIÈRE, B., and CÔTÉ, J. (2021c). Thermal behaviour and performance of two field experimental insulation covers to control sulfide oxidation at Meadowbank mine, Nunavut. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(3), 427-440.
- BRESSON, E., DEMERS, I., ROY, P., PABST, T., and CHAVAILLAZ, Y. (2018). Efficiency of reclamation methods under climate change: Definition of a drought index. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Tailings and Mine Waste* (pp. 583– 593).

- BRODA, S., AUBERTIN, M., BLESSENT, D., MAQSOU, A., and 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.
- BUSSIÈRE, B. (1999). Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. PhD diss. École Polytechnique de Montréal.
- BUSSIÈRE, B., PABST, T., GUITTONNY, M., and BRESSON, E. (2021). Influence des changements climatiques sur le secteur minier [massive open online course]. UQAT-Polytechnique, offrefc.uqat.ca/Web/MyCatalog/ViewP?id=6UQKYM8kIPLoZRhi9UKQgw%3d%3d&pid=P0xJnLxSS9G0QJ3vD7yArw%3d%3d, vérifié le 9 février 2022.
- BUSSIÈRE, B. and M. GUITTONNY (2021). Long-term evolution of reclamation performance. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 14, p. 351–378. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-14
- BUSSIÈRE, B. and WILSON, G.W. (2021). Store-and-release covers. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 5, p. 115–134. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-5
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., MBONIMPA, M., MOLSON, J. W., and CHAPUIS, R. P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245–265. doi:10.1139/t06-120
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., and CHAPUIS, R. P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 512–535. doi:10.1139/t03-001
- CATALAN, L.J.J., and YANFUL, E.K. (2002). Sediment-trap measurements of suspended mine tailings in shallow water cover. *Journal of Environmental Engineering*, 128: 19–30.
- CHAPIN III, F. S., MATSON, P. A., and VITOUSEK, P. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (Second edition). Springer. doi:10.1007/978-1-4419-9504-9
- 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.
- CLAVET-GAUMONT, J., HUARD, D., FRIGON, A., KOENING, K., SLOTA, P., ROUSSEAU, A., KLEIN, I., THIEMONGEE, N., HOUDRÉ, F., and PERDIKARIS, J. (2017). Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *Journal of Hydrology: Regional*
- CLEMENTS, F. E. (1916). *Plant succession*. Publication N. 242, Carnegie Institute, Washington.
- COHEN, S., BUSH, E., ZHANG, X., GILLET, N., BONSAI, B., DERKSEN, C., FLATO, G., GREENAN, B. and WATSON, E (2019). Synthesis of Findings for Canada's Regions; Chapter 8 in *Canada's*

- Changing Climate Report, (ed.) E. Bush and D.S. Lemmen; Government of Canada, Ottawa, Ontario, p. 424–443.
- COLLIN, M., and RASMUSON, A. (1988). A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science Society America Journal*, 52: 1559-1565
- COLLIN, M., and RASMUSON, A. (1990). Mathematical modelling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of pyritic mine tailings, *Acid Mine Drainage: designing for Closure*. GAC-MAC Annual Meeting 311–333. Ethier, M.P., Bussière, B., Aubertin, M., Maqsood, A., Lacroix, R., 2013
- COULOMBE, V., (2012). Performance de Recouvrements Isolants Partiels pour Contrôler L'oxydation de Résidus Miniers Sulfureux. M.Sc.A. Thesis, Polytechnique de Montréal, Montreal, Canada.
- DAGENAIS, A.-M., AUBERTIN, M., and BUSSIÈRE, B. (2006). Parametric study on the water content profiles and oxidation rates in nearly saturated tailings above the water table. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 405–420). American Society of Mining and Reclamation. DAS, B. M. (2009). *Principles of Geotechnical Engineering*, SI Edition (8th edition). Cengage Learning.
- DAVÉ, N.K., KRISHNAPPAN, B.G., DAVIES, M., and REID, I. (2003). Erosion characteristics of underwater deposited mine tailings. *Mining and the Environment Conference*, May 25–28, Sudbury, Canada, 11p.
- DAWSON, R. F., and MORIN, K. A. (1996). Acid mine drainage in permafrost regions: issues, control strategies and research requirements. CANMET.
- DELCLAUX, F., COUDRAIN, A., and CONDOM, T. (2007). Evaporation estimation on Lake Titicaca : a synthesis review and modelling. *Hydrological Processes*, 21, 1664-1677.
- DEMERS, I and PABST, T. (2021). Covers with capillary barrier effects. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 7, p. 167–186. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-7
- DEMERS, I., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., MBONIMPA, M., and BLIER, A. (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Mineral Engineering*, 21, 317–329. doi:10.1016/j.mineng.2007.11.006 - 24 –
- D'ORANGEVILLE, L., HOULE, D., DUCHESNE, L., PHILLIPS, R.P., BERGERON, Y. and KNEESHAW, D. (2018). Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature communications*, 9(1), 1-10.
- DONNÉES CLIMATIQUES CANADA (2022). Glossaire. donneesclimatiques.ca/glossaire/, vérifié le 9 février 2022.

- ELBERLING, B. (2001). Environmental controls of the seasonal variation in oxygen uptake in sulfidic tailings deposited in a permafrost-affected area. *Water Resources Research* 37, no. 1: 99–107.
- ELBERLING, B. (2005). Temperature and oxygen control on pyrite oxidation in frozen mine tailings. *Cold Regions Science and Technology* 41, no. 2: 121–133.
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CANADA (ECCC) (2020). 2020- Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques- Évaluation des changements climatiques sur les données de conception climatiques au Canada.
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CANADA (ECCC) (2018). Météo à l'œil glossaire de météorologie. www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/meteo-a-oeil/glossaire.html#wsglossaryC, vérifié le 9 février 2022.
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CANADA (ECCC) (2021). Conditions météorologiques et climatiques passées - GlossaireMétéo à l'œil glossaire de météorologie. climat.meteo.gc.ca/glossary_f.html#d, vérifié le 9 février 2022.
- ÉTHIER, M.-P., BUSSIÈRE, B., BRODA, S., and AUBERTIN, M. (2018). Three-dimensional hydrogeological modelling to assess the elevated water table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site. *Hydrogeology Journal*, 26(4), 1201–1219. doi:10.1007/s10040-017-1713-y
- FAN, Y., MIGUEZ-MACHO G., JOBBAGY, E. G., JACKSON, R. B., and OTERO-CASAL, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *PNAS* 114, no. 40: 10572–10577.
- FOURIE, A. B., and TIBBETT, M. (2007). Post-mining landforms—Engineering a biological system. In: A. Fourie, M. Tibbett, & J. Wiertz, *Proceedings of the Second International Conference on Mine Closure* (pp. 3–12). Australian Centre for Geomechanics.
- FRESCHET, G. T., VALVERDE-BARRANTES, O.J., TUCKER, C. M., *et al.* (2017). Climate, soil and plant functional types as drivers of global fine-root trait variation. *Journal of Ecology* 105, no. 5: 1182–1196.
- GIROUD, J. P., and TOUZE-FOLTZ, N. (2005). Equations for calculating the rate of liquid flow through geomembrane defects of uniform width and finite or infinite length. *Geosynthetics International*, 12(4): 191–204.
- GIROUD, J. P. (1997). Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International* 4.3-4 : 335-348.
- GIROUD, J. P., and BONAPARTE, R. (1989). "Leakage through liners constructed with geomembranes—Part II. Composite liners." *Geotextiles and geomembranes* 8.2 : 71-111.
- GUITTONNY, M., BUSSIÈRE, B., MAQSOUUD, A., PROTEAU, A., BEN KHOUYA, T., and BOTULA, Y.D. (2018). Root colonization of mine covers and impact on their functioning. In *Proceedings*

- of the 6th Symposium on Mines and the environment, Rouyn-Noranda, Canada, June 2018.
- GUITTONNY, M., BUSSIÈRE, B., CHEVÉ, N., MANGANE, B., and DUCLOS, M. (2019). Effects of revegetation and its supporting layers on the water budget of waste rocks. In Proceedings of Geo-Environmental Engineering 2019, Concordia University, Montreal, Canada, May 30–31.
- HERSHFIELD, D. M. (1965). Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal-American Water Works Association*, 57(8), 965-972.
- HOTTON, G., BUSSIERE, B., PABST, T., BRESSON, E., and ROY P. (2020). Influence of climate change on the performance of a cover with capillary barrier effect to control acid generation. *Hydrogeology Journal*, 2, 763–779. doi:10.1007/s10040-019-02084-y
- HUNTINGTON, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.
- INAP (2009). Global acid rock drainage guide (GARD guide). www.gardguide.com.
- 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 Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment for the Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc-data.org/guidelines/, vérifié le 9 février 2022.
- 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, 1535 pp.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2014). : *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

- JACKSON, R. B., CANADELL, J., EHLERINGER, J.R., MOONEY, H.A., SALA, O.E., and SCHULZE, E.D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389–411.
- KACHHWAL, L. K., YANFUL, E. K., and LANTEIGNE, L. (2011). Water cover technology for reactive tailings management: a case study of field measurement and model predictions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 214(1), 357-382.
- KUNKEL, K. E., KARL T. R., EASTERLING, D. R., REDMOND, K., YOUNG, J., YIN, X., and HENNON, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408.
- KYHN, C. and ELBERLING, B. (2001). Frozen cover actions limiting AMD from mine waste deposited on land in Arctic Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 32(2), 133– 142. doi:10.1016/s0165-232x(00)00024-0
- LABONTÉ-RAYMOND, P. L. (2020). Impact de la hausse d'intensité des précipitations extrêmes causée par les changements climatiques dans la gestion de l'eau de surface des aires d'entreposage des rejets miniers (Doctoral dissertation, Polytechnique Montréal).
- LABONTÉ-RAYMOND, P-L., PABST, T., BUSSIÈRE, B., and BRESSON, E. (2020). Impact of climate change on extreme rainfall events and surface water management at mine waste storage facilities. *Journal of Contaminant Hydrology*, 590, Article 125383. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125383
- LAMBERS, H., CHAPIN, F. S., and PONS, T. L. (2008). *Plant physiological ecology* (Second edition). Springer. doi:10.1007/978-0-387-78341-3
- LI, M., AUBÉ, B., and ST-ARNAUD, L. (1997). Consideration in the use of shallow water covers for decommissioning reactive tailings. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Mine Drainage* (pp. 115–130).
- LIEBER, E., DEMERS, I., PABST, T., and BRESSON, E. (2021). Simulating the effect of climate change on the performance of a monolayer cover combined with an elevated water table placed on acid generating tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, Just-in 16 juillet 2021, doi: 10.1139/cgj-2020-0622
- LIU, J., CHEN, J.M, and CIHLAR, J. (2003). Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass. *Water Resources Research* 39, no. 7. doi:10.1029/2002WR001680.
- LOARIE, S.R., DUFFY, P.B., HAMILTON, H., ASNER, G.P., FIELD, C.B., and ACKERLY, D.D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052–1055. doi:10.1038/nature08649 - 25 –
- MADALINSKI, K. L., GRATTON, D.N., WEISMAN, R.J. (2003). Evapotranspiration covers: An innovative approach to remediate and close contaminated sites. *Remediation* 14, no. 1: 55–67.

- MAQSOU, A., BUSSIÈRE, B., and MBONIMPA, M. (2021). Low saturated hydraulic conductivity covers. In: B. Bussière and M. Guittony (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 4, p. 93–113. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-4
- MBONIMPA, M., AWOH, A. S., BEAUD, V., BUSSIÈRE, B., and LECLERC, J. (2008). Spatial water quality distribution in the water cover used to limit acid mine drainage generation at the Don Rouyn site QC, Canada. In: *Proceedings of GeoEdmonton 2008: The 61st Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference* (pp. 855–862).
- MBONIMPA, M., BOULANGER-MARTEL, V., BUSSIÈRE, B., and MAQSOU, M. (2021). Water, Gas, and Heat Movement in Cover Materials. In: B. Bussière and M. Guittony (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. B. Bussière et M. Guittony (Eds), Chapter 3, p. 47-91. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-3
- MCKENNEY, D. W., PEDLAR, J. H., LAWRENCE, K., CAMPBELL, K., and HUTCHINSON, M. F. (2007). Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience*, 57(11), 939–948. doi:10.1641/b571106
- MCKENNEY, D. W., HUTCHINSON, M. F., PAPADOPOL, P., LAWRENCE, K., PEDLAR, J., CAMPBELL, K., *et al.* (2011). Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), 1611-1622.
- MELDRUM, J., JAMIESON, H., and DYKE, L. (2001). Oxidation of mine tailings from Rankin Inlet, Nunavut, at subzero temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 957–966. doi:10.1139/t01-028
- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (1993). MEND report 1.32.1: Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective, ed. Kwong, Y.J.T. Published by Canmet, Ottawa, ON, Canada.
- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (1996). MEND report 1.16.3: Determination of Neutralization Potential for Acid Rock Drainage Prediction, ed. Lawrence, R. W. and Wang, Y. Published by Canmet, Ottawa, ON, Canada.
- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (2001). MEND Manual: Volume 4 — prevention and control. MEND report 5.4.2d, CANMET, Ottawa, Canada, 385p.
- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (2004). Mine environment neutral drainage: Design construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. Report 2.21.4.
- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (2009). MEND report 1.20.1: Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials, ed. Price, W.A. Published by Canmet, Ottawa, ON, Canada.

- MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROGRAM (MEND) (2012). Cold Regions Cover System Design Technical Guidance Document, Report 1.61.5c, Mine Environment Neutral Drainage (MEND). Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada.
- 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.
- MIAN, M.H. and YANFUL, E.K. (2003). Tailings erosion and resuspension in two mine tailings ponds due to wind waves. *Advances in Environmental Research*, 7, 745–765. doi:10.1016/s1093-0191(02)00027-8
- MOLSON, J., AUVERTIN, M., BUSSIÈRE, B., and BENZAAZOUA, M. (2008). Geochemical transport modelling of drainage from experimental mine tailings cells covered by capillary barriers. *Applied Geochemistry* 23, no. 1: 1–24.
- MONCUR, M. C., PTACEK, C. J., LINDSAY, M. B., BLOWES, D. W., and JAMBOR, J. L. (2015). Long-term mineralogical and geochemical evolution of sulfide mine tailings under a shallow water cover. *Applied Geochemistry*, 57, 178-193.
- MOSS, R. H., *et al.*, (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. doi:10.1038/nature08823
- MOSS, R., *et al.*, (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- NECULITA, C.M., ZAGURY, G.J., BUSSIÈRE, B. (2021). Passive Treatment of Acid Mine Drainage at the Reclamation Stage. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Chapter 11, p. 271-298. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-11
- NICHOLSON, R. V., GILLHAM R. W., CHERRY, J. A., and REARDON, E. J. (1989). Reduction of acid generation through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 1–8.
- OUANGRAWA, M., MOLSON, J., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., and ZAGURY, G. J. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24, 1312–1323. doi:10.1016/j.apgeochem.2009.04.005
- OUELLET, S., CHAPUIS, S., and OVALE, C. (2021). Le projet de co-déposition dans la fosse Canadian Malartic. In *Symposium 2021 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, QC, Canada.
- OURANOS (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 114 p.

- PABST, T. (2021). Elevated water table with monolayer covers. In: B. Bussière and M. Guittonny (Eds.), *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*, Chapter 8, p. 187–202. CRC Press. doi:10.1201/9781315166698/-8
- PABST, T., AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B. and MOLSON J. (2014). Column tests to characterize the hydrogeochemical response of pre-oxidized acid-generating tailings with a monolayer cover. *Water, Air, and Soil Pollution*, 225, Article 1841. doi:10.1007/s11270-013-1841-5 - 26 –
- PÉRIÉ, C., DE BLOIS, S. et LAMBERT, M-C. (2009 - en cours). Atlas interactif : Changements climatiques et habitats des arbres [base de données]. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec (Canada). mffp.gouv.qc.ca/changements-climatiques/outil/carte.html, vérifié le 9 février 2022.
- PÉRIÉ, C., DE BLOIS, S., LAMBERT, M-C. et CASAJUS, N. (2014). Effets anticipés des changements climatiques sur l’habitat des espèces ligneuses au Québec (Mémoire de recherche forestière n. 173). Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec.
- PRICE, D. T., ALFARA, R.I., BROWN, K.J. *et al.* (2013). Anticipating the consequences of climate change for Canada’s boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews* 21, no. 4: 322–365.
- PROTEAU, A., GUITTONY, M., BUSSIÈRE, B. and MAQSOU, A. (2020). Aboveground and belowground colonization of vegetation on a 17-year-old cover with capillary barrier effect built on a boreal mine tailings storage facility *Minerals* 10(8): 704.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (RNCAN) (2021). Site sur la rusticité des plantes du Canada : planthardiness.gc.ca/index.pl?m=9b&lang=fr, vérifié le 9 février 2022.
- REY, N.J., DEMERS, I., BUSSIÈRE, B. and MBONIMPA, M. (2020). Laboratory and field study of oxygen flux and hydrogeological behaviour of monolayer covers made of low-sulfide tailings combined with an elevated water table placed over acid-generating mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(12), 1998–2009. doi:10.1139/cgj-2018-0875.
- RICARD, J.F., AUBERTIN, M., FIRLOTTE, F.W., KNAPP, R. and 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.
- ROGERS, B.M., JANTZ, P., and GOETZ, S.J. (2016). Vulnerability of eastern US tree species to climate change. *Global Change Biology*, vol. 23, pp. 3302–3320.
- 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. Annexe du rapport de l’URSTM présenté au Ministère de l’Énergie et des Ressources Naturelles, Bussière *et al.*, 2017. Ouranos, Montréal, QC, Canada, pp. 56.

- SAMAD, M.A. and YANFUL, E.K. (2005). A design approach for selecting the optimum water cover depth for subaqueous disposal of sulfide mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 207–228.
- SCANLON, B.R., REEDY, R.C., KEESE, K.E. and DWYER, S.F. (2005). Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the Southwestern USA. *Vadose Zone Journal* 4:55–71.
- SENEVIRATNE, S.I., *et al.*, (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: C. B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 109–230). Cambridge University Press. www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-changeadaptation/
- SHARDONG, A., GAUR, A., SIMONOVIC, S. and SANDINK, D. (2018). Computerized Tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate. Technical Manual v.3, janvier 2018, Rap. no. 103.
- SIMMS, P.H., YANFUL, E.K., ST-ARNAUD, L. and AUBE, B. (2000). A laboratory evaluation of metal release and transport in flooded pre-oxidized mine tailings. *Applied Geochemistry*, 15: 1245–1263.
- ST-ARNAUD, L. C. and YANFUL, E. K. (1993). Water Covers for the Decommissioning of Sulphidic Mine Tailings Impoundments: Mattabi Mine Case Study. In ANNUAL CONFERENCE OF METALLURGISTS-METALLURGICAL SOCIETY OF THE CANADIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY (pp. 275-275). PERGAMON PRESS.
- THORNTHWAITE, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55. doi:10.2307/210739.
- TOUZE-FOLTZ, N. and GIROUD, J. P. (2003). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 10(6), 215-233.
- VIGNEAULT, B., CAMPBELL, P.G.C., TESSIER, A. and DE VITRE, R. (2001). Geochemical changes in sulfidic mine tailings stored under a shallow water cover. *Water Research*, 35: 1066–1076.
- WELS, C., FORTIN, S. and LOUDON, S. (2002). Assessment of store-and-release cover for Questa tailings facility, New Mexico. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tailings and Mine Waste*, Fort Collins, CO, USA, January 27–30, 2002, ed. R. I. Barnhisel, 459–468. Brookfield, VT: A. A. Balkema.
- WILLIAMS, D.J., STOLBERG, D.J. and CURREY, N.A. (2006). Long-term monitoring of Kidston’s “Store/Release” cover system over potentially acid forming waste rock piles. In *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St Louis, MO, USA, March 26–30, 2006, ed. R. I. Barnhisel, 2385–2396.

WMO (2009). Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP) / World Meteorological Organization. Geneva: World Meteorological Organization.

WSP (2014). Projet minier d'Arianne Phosphate au lac à Paul. Caractérisation hydrologique du secteur à l'étude, en conditions actuelles et futures. Révision no 02. : Rapport de WSP Canada Inc. (anciennement GENIVAR Inc.) à Arianne Phosphate Inc.

WSP (2015). Projet Akasaba Ouest, Val-d'Or, Qc. Étude d'impact environnemental et social. Volume 1 – Rapport principal.

XIAO, K., GRIFFIS, T.J., BAKER, J.M., BOLSTAD, P.V., ERICKSON, M.D., LEE, X., WOOD, J.D., HU, C., and NIEBER, J.L. (2018). Evaporation from a temperate closed-basin lake and its impact on present, past, and future water level. *Journal of Hydrology*, 561, 59-75.

YANFUL, E. K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1207–1228. doi:10.1061/(asce)0733-9410(1993)119:8(1207)

YANFUL, E.K., SIMMS, P.H., and PAYANT, S.C. (1999). Soil covers for controlling acid generation in mine tailings: a laboratory evaluation of the physics and geochemistry. *Water, Air, and Soil Pollution*, 114: 347–375.

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L., and CALDWELL, J.A. (2003). Analysis and design of evapotranspirative covers for hazardous waste landfills. *Journal of Geoenvironmental and Geotechnical Engineering* 129, no. 6: 427–438.



Bruno Bussière, ing.
OIQ n° 109059



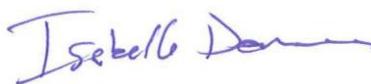
Thomas Pabst, ing.
OIQ n° 5071997



Émilie Bresson



Marie Guittonny, biol.



Isabelle Demers, ing.
OIQ n° 125688



Gwendoline Hotton, géo.
OGQ n° 2452

**Annexe A - Non disponible
Liste des intervenants et comptes
rendus des rencontres avec les
compagnies minières, les
consultants en restauration minière
et les chercheurs travaillant dans le
domaine**

Annexe B

Sources d’incertitudes dans les projections climatiques

Les projections climatiques sont soumises à trois sources d’incertitudes :

- La variabilité naturelle, qui reflète les fluctuations naturelles importantes et imprévisibles du système climatique de la Terre;
- Les incertitudes structurelles des modèles climatiques, qui demeurent des outils imparfaits et qui peuvent réagir légèrement différemment à un même forçage;
- Le scénario d’émissions considéré, qui est basé sur des hypothèses socio-économiques et politiques plausibles.

L’importance relative des sources d’incertitude varie dans le temps et dépend de l’échelle temporelle et géographique considérées, ainsi que de la variable climatique prise en compte (*Tableau B-1*). L’incertitude liée au modèle demeure relativement constante quelle que soit l’échéance considérée. À court terme (< 30 ans), la variabilité naturelle du climat peut masquer le signal de changement climatique, par exemple en s’opposant à la tendance à long terme pendant les décennies considérées. Plus l’échéance est éloignée dans le temps, plus le signal de changement climatique devient fort si le forçage radiatif continue d’augmenter, et ce signal est fortement influencé par le scénario d’émissions retenu. De plus, la variabilité naturelle sera relativement plus importante pour les petites régions et à court terme, ainsi que pour certaines variables (ex. : précipitations) comparativement à d’autres (ex. : températures).

Tableau B-1. Importance relative des incertitudes dans les scénarios climatiques à différentes échelles temporelles.

Échelle temporelle	Importance relative des sources d’incertitude		
	Variabilité naturelle	Scénario d’émissions	Modèle climatique
Court terme (< 30 ans)	+++	+	++
Moyen terme (30-50 ans)	+	++	++
Long terme (> 50 ans)	+	+++	++

D’après Charron, 2016

Pour faire face à ces incertitudes, il est conseillé d’utiliser un ensemble de projections climatiques produites par plusieurs modèles climatiques utilisant différents scénarios d’émission.

Pour des informations complémentaires, consulter Charron (2016), la section Apprendre du site donneesclimatiques.ca ou le site atlasclimatique.ca.

Annexe C

Effets des changements climatiques sur les paramètres climatiques d'intérêt, les impacts potentiels et les bonnes pratiques d'adaptation pour chaque méthode de restauration

Méthode de restauration		Effets des changements climatiques sur les paramètres climatiques susceptibles d'affecter la méthode de restauration	Impacts potentiels pour la méthode de restauration	Bonnes pratiques d'adaptation aux changements climatiques
Type de méthode	Technique			
Barrière à l'oxygène	Recouvrement en eau	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses Augmentation de la température Diminution des précipitations Diminution de l'humidité relative 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'évaporation qui réduit l'épaisseur de recouvrement en eau et qui diminue la performance de la barrière à l'oxygène. Augmentation des flux d'oxygène causée par une diminution de l'épaisseur du recouvrement en eau et provoquant l'oxydation des résidus miniers et l'exfiltration d'un effluent contaminé. 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter l'épaisseur du recouvrement en eau en modifiant la structure des ouvrages de rétention Modifier l'orientation du bassin pour diminuer le « fetch » dans la direction principale du vent Ajouter une couche de matériaux granulaires à la surface des résidus Planter des arbres autour des bassins
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la vitesse des vents Changement de direction des vents 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du risque de remise en suspension des particules qui entraîne un taux d'oxydation des résidus plus important Mouvements de l'eau plus importants qui entraînent une augmentation de la concentration d'oxygène dans l'eau du recouvrement 	
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations annuelles et extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du risque d'instabilité physique des ouvrages de rétention <ul style="list-style-type: none"> Débordement Érosion (interne et externe) Augmentation des pressions interstitielles Dommages aux exutoires, fossés collecteurs et autres ouvrages de contrôle de l'eau de surface Modification de la dynamique hydraulique dans les fosses (mélanges de l'eau et augmentation de la concentration d'oxygène dans le recouvrement). 	
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des cycles de gel dégel, augmentation du nombre de jours sans gel 	<ul style="list-style-type: none"> Impact sur la débâcle et le déplacement des blocs de glace 	
	Nappe phréatique surélevée (NPS) avec recouvrement monocouche	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses Augmentation de la température Diminution des précipitations Diminution de l'humidité relative 	<ul style="list-style-type: none"> Baisse du niveau de la nappe phréatique en raison de l'augmentation de l'évaporation durant les périodes sèches qui entraîne une plus grande oxydation des résidus réactifs Désaturation et perte d'efficacité de la couverture monocouche comme barrière à l'oxygène (si constituée de matériaux fins) 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter la performance de la couche de protection pour contrer l'effet de l'évaporation : <ul style="list-style-type: none"> Choisir un matériau plus grossier Augmenter l'épaisseur du recouvrement monocouche Favoriser l'infiltration au détriment du ruissellement et de l'évapotranspiration : <ul style="list-style-type: none"> Modifier les paramètres liés à la géométrie du recouvrement Modifier les propriétés des matériaux Ajuster les pentes et les exutoires Renforcer le système de drainage Couvrir les pentes de végétation Augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les couches inférieures et éviter la désaturation de la monocouche (si constituée de matériaux fins) Favoriser l'implantation d'espèces à racines peu profondes et à taux de transpiration faible
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations annuelles et extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> Dommages aux réseaux de drainage qui peuvent entraîner des débordements non contrôlés Instabilité physique des zones inclinées causée par l'érosion de surface et par des pressions interstitielles plus importantes 	
		<ul style="list-style-type: none"> Diminution des périodes de gel 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des périodes durant lesquelles la diffusion de l'oxygène est non négligeable 	
		<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution spatiotemporelle de la température et de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution des espèces de plantes et impact sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes 	
	Couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC)	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses Augmentation de la température Diminution des précipitations Diminution de l'humidité relative 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution du degré de saturation et perte d'efficacité de la couche de rétention d'eau comme barrière à l'oxygène Augmentation du risque de dessiccation de la couche de rétention d'eau causée par une plus grande évaporation 	<ul style="list-style-type: none"> Modifier la configuration du recouvrement (épaisseur des couches) Modifier les propriétés des matériaux (améliorer les propriétés de la couche de rétention d'eau et des couches de bris capillaire) Favoriser l'utilisation de matériaux résistants aux cycles de mouillage-séchage Augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les couches inférieures et éviter la désaturation de la couche de rétention d'eau Favoriser l'implantation d'espèces à racines peu profondes et à taux de transpiration faible
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations annuelles et extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> Dommages aux réseaux de drainage qui peuvent entraîner des débordements non contrôlés Instabilité physique des zones inclinées causée par l'érosion de surface et par des pressions interstitielles plus importantes 	
		<ul style="list-style-type: none"> Diminution des périodes de gel 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des périodes durant lesquelles la diffusion de l'oxygène est non négligeable 	
		<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution spatiotemporelle de la température et de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution des espèces de plantes et impact sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes 	

Méthode de restauration		Effet des changements climatiques sur les paramètres climatiques susceptibles d'affecter la méthode de restauration	Impacts potentiels pour la méthode de restauration	Bonnes pratiques d'adaptation aux changements climatiques
Type de méthode	Technique			
Barrière à l'eau	Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations annuelles et extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> Impact sur la capacité des recouvrements à dévier l'eau, contrôler la percolation et augmentation potentielle des volumes de DMC Dommages aux réseaux de drainage qui peuvent entraîner des débordements non contrôlés Instabilité physique des zones inclinées causée par l'érosion de surface et par des pressions interstitielles plus importantes 	<ul style="list-style-type: none"> Modifier les propriétés des couches drainantes pour favoriser l'écoulement rapide de l'eau sur la couche de matériaux à faible conductivité hydraulique saturée Adapter l'hydrologie du site pour favoriser le ruissellement et minimiser l'érosion Ajouter de la végétation pour minimiser l'érosion et diminuer la percolation grâce au prélèvement d'eau pour la transpiration Augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les matériaux à faible conductivité hydraulique saturée Favoriser l'implantation d'espèces végétales à racines peu profondes et à taux de transpiration élevé
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage 	<ul style="list-style-type: none"> Modification des propriétés des matériaux à faible conductivité hydraulique saturée 	
		<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution spatiotemporelle de la température et de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution des espèces de plantes et impact sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes 	
Recouvrement isolant		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des températures 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température des matériaux meubles qui cause un approfondissement de la zone active Exposition potentielle des rejets miniers réactifs à des températures plus élevées, favorables à l'oxydation des minéraux sulfureux 	<ul style="list-style-type: none"> Augmenter l'épaisseur du recouvrement isolant Intégrer une couche de matériau à forte teneur en eau pour augmenter le potentiel isolant et réduire les flux d'oxygène Prendre en compte l'influence possible du développement d'une végétation significative à long terme (déplacement des espèces du sud vers le nord) : effet potentiel sur l'épaisseur de la couche de neige, augmenter l'épaisseur des couches superficielles pour contrôler la présence de racines dans les couches inférieures, et favoriser l'implantation d'espèces à racines peu profondes
		<ul style="list-style-type: none"> Diminution des précipitations solides 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de l'isolation du froid des rejets miniers situés sous le recouvrement 	
		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations liquides 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du risque d'instabilité physique des ouvrages de restauration (tassements, consolidation, fissuration, soulèvement) 	
		<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution spatiotemporelle de la température et de l'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Changement de la distribution des espèces de plantes et impact sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes 	

Annexe D
Récapitulatif de l’approche de
conception générale en fonction des
phases de développement d’un
projet minier

Annexe D – Récapitulatif de l’approche de conception générale en fonction des phases de développement d’un projet minier

	Préprojet (plan de restauration)	Pendant les opérations (mises à jour du plan de restauration)	Fermeture (plan de restauration final)
1. Caractérisation et validation	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation préliminaire ou estimation (modèles prédictifs) des propriétés physiques, géotechniques, hydrogéologiques, géochimiques et environnementales des matériaux du recouvrement et des rejets miniers 	<ul style="list-style-type: none"> Mise à jour de la caractérisation des propriétés physiques, géotechniques, hydrogéologiques, géochimiques et environnementales des matériaux du recouvrement et des rejets miniers Essais de laboratoire et de terrain sur matériaux réels avec végétation Évaluation de l’hétérogénéité des matériaux du recouvrement et des rejets miniers Évaluation des propriétés en place des rejets miniers en tenant compte de la méthode de déposition 	<ul style="list-style-type: none"> Caractérisation des propriétés <i>in situ</i> physiques, géotechniques, hydrogéologiques, géochimiques et environnementales des matériaux du recouvrement et des rejets miniers Essais de laboratoire et de terrain complémentaires sur matériaux réels avec végétation (si nécessaire) Mise en place d’un plan de contrôle qualité sur le prélèvement, le transport et la mise en place des matériaux.
2. Connaissance du site	<ul style="list-style-type: none"> Détermination des conditions climatiques actuelles (typiques et extrêmes) à partir de la station météo la plus proche Détermination des conditions climatiques futures (typiques et extrêmes) Installation d’une station météo sur le site Identification détaillée de la géométrie du site et de l’hydrologie locale Caractérisation de la végétation sur et environnant le site, plan de végétalisation conceptuel 	<ul style="list-style-type: none"> Entretien et suivi de la station météo sur le site et mise à jour des conditions climatiques actuelles Mise à jour des conditions climatiques futures sur la base des développements scientifiques en lien avec les projections des CC Mise à jour du plan de végétalisation sur les systèmes de recouvrement qui seront utilisés, projection de la végétation forestière à long terme sur les recouvrements en tenant compte des CC 	<ul style="list-style-type: none"> Entretien et suivi de la station météo sur le site et mise à jour des conditions climatiques actuelles Mise à jour des conditions climatiques futures sur la base des développements scientifiques en lien avec les projections des CC Mise à jour du plan de végétalisation sur les systèmes de recouvrement qui seront utilisés, projection de la végétation forestière à long terme sur les recouvrements en tenant compte des CC, mise à jour des valeurs de paramètres réalistes associés à la végétation à long terme pour la modélisation
3. Design	<ul style="list-style-type: none"> Essais de laboratoire si matériaux préliminaires disponibles (échantillons de résidus et stériles obtenus à l’étape de développement du projet) Simulations numériques incluant la végétation Intégration des conditions climatiques projetées comme conditions frontières des modèles numériques ou des facteurs de majoration tenant compte des CC Analyse des risques associés aux différentes approches de restauration Ajustement du plan de gestion et de déposition des rejets en fonction du concept de restauration retenu (Design for Closure) 	<ul style="list-style-type: none"> Essais de laboratoire et de terrain (cellules expérimentales à grande échelle) sur matériaux réels, incluant la végétation Mise à jour des modèles numériques en fonction des conditions réelles d’opérations Simulations numériques calibrées avec les résultats des essais au laboratoire et sur le terrain incluant la végétation Intégration des conditions climatiques projetées mises à jour comme conditions frontières des modèles numériques ou des facteurs de majoration tenant compte des CC Intégration des paramètres de végétation tenant compte de l’évolution des essences forestières sous CC 	<ul style="list-style-type: none"> Simulations numériques calibrées avec les données de terrain incluant la végétation Intégration des conditions climatiques projetées mises à jour comme conditions frontières des modèles numériques ou des facteurs de majoration tenant compte des CC

	Préprojet (plan de restauration)	Pendant les opérations (mises à jour du plan de restauration)	Fermeture (plan de restauration final)
4. Construction et instrumentation	s.o.	<ul style="list-style-type: none"> • Si restauration progressive : <ul style="list-style-type: none"> • Construction du système de restauration avec contrôle de qualité afin d’obtenir les propriétés réelles et la géométrie tel que construit • Mise en place d’instruments de mesure visant à ausculter la performance du système • Végétalisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Construction du système de restauration avec contrôle de qualité afin d’obtenir les propriétés réelles et la géométrie tel que construit • Mise en place d’instruments de mesure • Végétalisation
5. Auscultation et suivi	s.o.	<ul style="list-style-type: none"> • Si restauration progressive : <ul style="list-style-type: none"> • Prises de mesure régulières des instruments mis en place pour suivre la performance du système de restauration • Compilation régulière des résultats, contrôle de qualité et rédaction de rapport de suivi • Utilisation de différents équipements pour un même paramètre et mesures directes • Documenter l’évolution de la végétation in situ (notamment présence des arbres) • Mesure des paramètres de végétation in situ pour la modélisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Prises de mesure régulières des instruments mis en place pour suivre la performance du système de restauration • Compilation régulière des résultats, contrôle de qualité et rédaction de rapport de suivi • Utilisation de différents équipements pour un même paramètre et mesure directes • Documenter l’évolution de la végétation in situ (notamment présence des arbres) • Mesure des paramètres de végétation in situ pour la modélisation
6. Réanalyse et ajustements	s.o.	<ul style="list-style-type: none"> • Si restauration progressive : <ul style="list-style-type: none"> • Observation des tendances à moyen et long terme • Comparaison entre les performances mesurées et celles prédites lors du design • Si écart important entre les deux, mise en place de mesures correctrices • Réalisation de modélisations numériques supplémentaires (recalibrage, validation) avec une actualisation des propriétés des matériaux, des conditions frontières et des paramètres de végétation (ex. si l’évolution des CC et/ou de la végétation est différente de celle anticipée). 	<ul style="list-style-type: none"> • Observation des tendances à moyen et long terme • Comparaison entre les performances mesurées et celles prédites lors du design • Si écart important entre les deux, mise en place de mesures correctrices • Réalisation de modélisations numériques supplémentaires (recalibrage, validation) avec une actualisation des propriétés des matériaux, des conditions frontières et des paramètres de végétation (ex. si l’évolution des CC et/ou de la végétation est différente de celle anticipée).

Annexe E
Grille de validation pour intégrer les
changements climatiques au plan de
restauration

La grille de validation (*Tableau E-1*) développée dans cette annexe a pour objectif d’outiller le requérant/le concepteur à intégrer les changements climatiques (CC) lors de la conception d’un plan de restauration.

Les différents points présentés dans la grille sont développés ci-dessous.

Tableau E-1 : Grille de validation pour intégrer les changements climatiques au plan de restauration

	✓*	S.O.**	Renseignements disponibles (référence)***
Intégration des changements climatiques			
1. Identifier les risques et les vulnérabilités liés aux changements climatiques pour les méthodes de restauration considérées			
2. Identifier les approches d’adaptation face aux changements climatiques pour les méthodes de restauration considérées			
3. Identifier le type de paramètres climatiques importants pour les méthodes de restauration considérées			
4. Définir les événements climatiques d’importance (conditions typiques, conditions extrêmes)			
5. Identifier les sources et les références des données climatiques et justifier le choix des données utilisées pour la prise en compte des changements climatiques			
6. Identifier les sources et les références des données de végétation et justifier le choix des données utilisées pour la prise en compte des changements climatiques			
7. Démontrer la performance des méthodes de restauration considérées avec changements climatiques			

* Élément inclus

** Sans objet

*** Si les renseignements ne sont pas inclus dans la révision du plan de restauration soumis, indiquer l’endroit où ils peuvent être trouvés (référence et page).

1. Identifier les risques et vulnérabilités liés aux changements climatiques pour les méthodes de restauration considérées

Identifier les risques et vulnérabilités pour les méthodes de restauration considérées pour un site donné en se basant sur une analyse de risques. L’approche d’évaluation du risque présentée à la [section 4.1.1](#) du présent guide fournit un exemple et des indications pouvant être considérées. Les impacts associés aux CC sur les différentes méthodes de restauration sont quant à eux présentés à la [section 3](#) du guide et sont résumés à l’annexe C.

2. Identifier les approches d’adaptation face aux changements climatiques des méthodes de restauration considérées

Évaluer les options disponibles pour rendre les méthodes de restauration considérées moins vulnérables face aux CC. Des exemples d’adaptation des différentes méthodes de restauration sont fournis à l’annexe C. Les techniques étant les plus facilement adaptables ou moins

vulnérables face aux CC devraient être considérées comme un avantage dans la sélection de la méthode de restauration.

3. Identifier le type de paramètres climatiques importants pour les méthodes de restauration considérées

Identifier les paramètres climatiques importants pour les méthodes de restauration considérées, en se basant sur la [section 3](#), l'annexe C et le *Tableau E-2*. Le tableau E-2 présente une classification simplifiée des paramètres climatiques d'intérêt. Il est important de prendre en considération les potentielles combinaisons de paramètres qui peuvent être impliquées (voir [section 2.1.6.2](#)).

Tableau E-2 : Classification simplifiée des paramètres climatiques d'intérêt selon les différentes méthodes de restauration

Méthodes de restauration	Paramètres climatiques d'intérêt						
	Précipitations moyennes annuelles	Précipitations extrêmes	Période de sécheresse	Couverture de neige	Température moyenne annuelle	Température extrême	Vitesse des vents
Recouvrement en eau dans une fosse	4	5	4	2	3	2	4
Recouvrement en eau avec digues	4	5	4	2	3	2	4
Nappe phréatique surélevée (NPS) avec recouvrement monocouche	4	4	5	3	3	2	2
Couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC)	4	3	5	3	3	2	1
Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée	4	4	2	2	2	2	1
Recouvrement isolant	3	3	3	4	5	4	2

1 - impact négligeable; 2 - peu d'impact; 3 - impact moyen; 4 - impact important 5- impact critique

4. Définir les événements climatiques d'importance (conditions typiques, conditions extrêmes)

Définir les conditions typiques et extrêmes (voir [section 2.1.6](#)) en fonction du climat de la région d'intérêt et des méthodes de restauration considérées. Le *Tableau E-3* récapitule les événements climatiques d'importance en fonction de chaque méthode de restauration et les impacts associés.

Tableau E-3 : Évènements climatiques d’importance en fonction de chaque méthode de restauration et impacts associés

Méthode de restauration	Évènements climatiques d’importance	Impacts associés
Recouvrement en eau	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations moyennes annuelles et des précipitations extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque plus grand d’instabilité physique des ouvrages de retenue
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de l’évaporation en périodes sèches 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution temporaire de l’épaisseur de la couche aqueuse
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la vitesse des vents (nombre de jour où le vent dépasse la valeur critique) et un changement de leur direction 	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en suspension des particules plus importante entraînant une plus grande concentration de contaminants dans l’eau du recouvrement
Nappe phréatique surélevée (NPS) avec recouvrement monocouche	<ul style="list-style-type: none"> • Période de sécheresse prolongée 	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse du niveau de la nappe phréatique en-dessous de la valeur minimale acceptable qui pourrait entraîner l’oxydation des rejets miniers réactifs
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations et de la fréquence des évènements extrêmes de précipitations 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d’instabilité des ouvrages de rétention en raison de pressions interstitielles potentiellement plus élevées • Réduction de l’efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d’eau plus importantes
Couverture avec effets de barrière capillaire (CEBC)	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures et diminution des précipitations en périodes sèches 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de diminuer temporairement le degré de saturation de la couche de rétention d’eau et, ainsi, d’affecter l’efficacité du recouvrement à contrôler la production de DMC
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations et de la fréquence des évènements extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d’affecter l’efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d’eau plus importantes • Effet négatif sur la stabilité physique des zones inclinées
Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations moyennes annuelles et de la fréquence des évènements extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de diminuer la capacité des recouvrements à dévier l’eau et à contrôler la percolation et ainsi augmenter les volumes de DMC générés • Réduction de l’efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d’eau plus importantes • Effet négatif sur la stabilité physique des zones inclinées
Recouvrement isolant	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures de l’air et des précipitations liquides 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d’approfondir la zone active qui pourrait exposer les rejets miniers réactifs à des températures plus élevées, favorables à l’oxydation des minéraux sulfureux et, par conséquent, à la formation d’un DMC • Effet négatif sur la stabilité physique des ouvrages de restauration (tassements, consolidation, fissuration, soulèvement), ce qui pourrait réduire l’efficacité à contrôler la contamination des eaux
	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations sous forme de neige 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d’isoler davantage du froid les rejets miniers situés sous le recouvrement, ce qui risque d’augmenter la température du sol et la réactivité des rejets

5. Identifier les sources et les références des données climatiques et justifier le choix des données utilisées pour la prise en compte des changements climatiques

Documenter le choix des données climatiques et justifier leur utilisation en fonction du climat de la région d'intérêt et des méthodes de restauration considérées. Il est pertinent de documenter, par exemple, le type de données climatiques, les gammes de valeur, la fréquence, la période, l'horizon, le nombre de simulations, le nombre de scénarios RCP, etc. La [section 5.1](#) du présent guide fournit des informations sur la disponibilité et l'accessibilité des données climatiques.

6. Identifier les sources et les références des données de végétation et justifier le choix des données utilisées pour la prise en compte des changements climatiques

Documenter le choix des données de végétation et justifier leur utilisation en fonction du climat de la région d'intérêt et des méthodes de restauration considérées. La [section 5.2](#) du présent guide fournit des informations sur la disponibilité et l'accessibilité des données sur la distribution des essences forestières.

7. Démontrer la performance des méthodes de restauration considérées avec changements climatiques

Démontrer la performance des méthodes de restauration considérées en tenant compte des CC. Un exemple d'approche de conception des ouvrages de restauration intégrant les CC est proposé à la [section 4.1](#) du présent guide.