

Rapport final
PU-2014-06-913

***Analyse de risques et de
vulnérabilités liés aux
changements climatiques
pour le secteur minier québécois***

Pour :

M^{me} Renée Garon
Directrice générale
Direction générale du développement de l'industrie minérale
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
5700, 4^e Avenue Ouest
Québec (Québec) G1H 6R1

Par :

Bruno Bussière, ing., Ph.D.
Isabelle Demers, ing., Ph.D.
Patrick Charron, M.Sc.
Bruno Bossé, Ph.D.

En collaboration avec :

Philippe Roy, Ph.D.
Michel Jébrak, Ph.D.
Sandra Trépanier, ing., M.Sc.



445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971 Télécopieur : 819 797-6672

Juillet 2017

Financé par



Note au lecteur

Ce rapport d'étude a été rédigé par l'Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (URSTM-UQAT) à la demande du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Il a comme objectif d'identifier les principaux risques et vulnérabilités liés aux changements climatiques pour les activités minières au Québec.

Les auteurs du rapport sont conscients que les changements climatiques ne représentent qu'une partie des facteurs qui influencent le secteur minier (ex : le cours des marchés, les contextes économiques et socio-politiques et les cadres réglementaires). Cette analyse n'avait pas pour objet de relativiser les impacts des changements climatiques par rapport à ces autres facteurs.

L'analyse de risques et de vulnérabilités présentée dans ce rapport est qualitative. Elle se limite donc à une évaluation globale des principaux risques et vulnérabilités associés aux changements climatiques, et ce, à l'échelle des régions minières du Québec. L'analyse s'appuie sur des modèles climatiques développés par Ouranos, un consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

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

L'avis des auteurs s'appuie sur une revue de la littérature ainsi que sur la consultation d'une quarantaine d'experts des différents secteurs du domaine minier, soit de l'exploration, de l'exploitation et de la restauration. Collectivement, ce groupe d'experts possède une large connaissance du secteur minier au Québec et de ses enjeux. Les experts consultés proviennent majoritairement du secteur privé, mais également des secteurs public et académique. La méthodologie suivie pour les consulter est décrite au chapitre 4.

Cette étude permet donc d'orienter le gouvernement et l'industrie en vue d'entreprendre un processus d'adaptation du secteur minier québécois aux changements climatiques.

Sommaire exécutif

L'industrie minière, comme tous les autres secteurs d'activités, sera exposée aux impacts des changements climatiques. L'objectif principal de ce rapport est d'identifier les principaux éléments de vulnérabilités aux changements climatiques des activités minières au Québec.

Afin de réaliser cette analyse de risques et de vulnérabilités, le consortium Ouranos a collaboré avec l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) de l'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) pour préparer une synthèse des scénarios climatiques pour le secteur minier. Au Québec, les changements climatiques impliqueraient non seulement des variations de températures, mais également par rapport aux précipitations et à la fréquence des événements extrêmes. Les simulations climatiques projettent, pour toutes les régions minières du Québec étudiées, des hausses de la température moyenne, une forte réduction du nombre de jours de gel, des augmentations de la quantité annuelle de précipitations et des hausses significatives des précipitations abondantes et extrêmes, mais elles prévoient également un allongement des périodes sans précipitations pour la saison estivale. En somme, ces changements pourraient avoir de conséquences significatives sur les activités minières, et ce, tout au long du cycle de vie d'une mine.

Dans le but de répertorier les impacts potentiels des changements climatiques, une revue de la littérature et une consultation d'un groupe d'experts du secteur minier ont d'abord été effectuées. Ensuite, une enquête de type Delphi, menée auprès d'intervenants des domaines de l'exploration, de l'exploitation et de la restauration, a permis d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux principaux impacts des changements climatiques. Finalement, sur la base des résultats de cette enquête, un autre groupe d'experts, ayant une vision d'ensemble du secteur minier québécois, a évalué la vulnérabilité du secteur minier aux principaux impacts des changements climatiques, plus précisément la capacité du secteur à faire face aux différents impacts des changements climatiques ainsi que sa capacité à s'adapter à ce contexte.

Les résultats de cette analyse montrent que les principales vulnérabilités du secteur minier par rapport aux changements climatiques se retrouvent au niveau de la restauration des sites. La performance à long terme des méthodes de restauration et l'intégrité des ouvrages de confinement des résidus après l'exploitation représentent les plus grandes vulnérabilités du secteur minier québécois en lien avec les changements climatiques. La vulnérabilité des infrastructures minières dépend de leurs interactions avec le milieu naturel, mais également de leur durée de vie. Contrairement aux structures usuelles en génie civil démantelées à la fin de leur vie utile, les infrastructures utilisées pour la restauration des sites miniers deviennent généralement des ouvrages permanents. Les digues ceinturant les parcs à résidus doivent fonctionner comme prévu pendant plusieurs années après la fermeture de la mine et sont, par conséquent, plus exposées aux changements climatiques. Les méthodes utilisées pour la restauration des sites miniers sont conçues et appliquées en fonction des variables climatiques du site. Jusqu'à présent, les conceptions des méthodes de restauration ont été basées sur des données météorologiques historiques et, par conséquent, tiennent rarement compte des changements climatiques.

Les résultats montrent aussi des vulnérabilités aux changements climatiques en phase d'exploitation des mines. Celles-ci se concentrent sur la gestion des résidus et de l'eau, dans un contexte d'une augmentation des volumes à gérer. Au moment de l'exploitation, ce n'est pas tant l'évolution du climat qui est problématique, mais plutôt la variabilité des extrêmes qui est la source des plus grandes préoccupations. Un tel contexte est à même de rendre plus à risque la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crue ainsi que l'intégrité structurale des ouvrages de retenue. De manière générale, les vulnérabilités en phase d'exploitation sont jugées légèrement moins critiques comparativement à la phase de restauration. Cela s'explique principalement du fait que les mines en opération ont des durées de vie limitées. Par conséquent, les infrastructures seront généralement moins exposées à l'évolution du climat. Néanmoins, les résultats montrent que le secteur minier a besoin d'outils pour lui permettre d'intégrer les changements climatiques à la conception des ouvrages et à la planification des activités minières.

En ce qui concerne la phase de l'exploration minérale, elle est peu vulnérable aux changements climatiques. Ce constat vient du fait que les activités d'exploration se déroulent sur de courtes périodes, et que les interventions sont souvent ponctuelles. Les experts consultés considèrent que les entreprises d'exploration seront en mesure de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques au fur et à mesure de leur évolution. L'exploration minière sera probablement influencée plus indirectement par les changements climatiques, par exemple par les impacts qu'ils auront sur les marchés et la demande pour certains minéraux ainsi que l'ouverture de nouvelles voies maritimes.

Afin de diminuer les vulnérabilités du secteur minier et permettre son adaptation aux changements climatiques, il faudra mettre au point de nouvelles approches et développer des outils pour intégrer ceux-ci à la planification, à la conception et à la gestion des activités minières. Ce rapport présente des recommandations qui vont dans ce sens.

Sommaire des recommandations par ordre d'importance

Recommandations		Phase du processus de développement minéral
1	Développer une approche méthodologique et des critères de conception visant à intégrer les changements climatiques dans la conception des ouvrages de rétention des résidus miniers et des méthodes de restauration.	Exploitation Restauration
2	Considérer, voire même encourager, l'utilisation des modes de gestion des rejets qui rendent moins vulnérables à long terme les aires d'entreposage des rejets face aux risques géotechniques associés aux digues.	Restauration
3	Favoriser les concepts de restauration les moins vulnérables aux changements climatiques ainsi que ceux qui offrent la possibilité d'être ajustés au fur et à mesure de l'évolution du climat.	Restauration
4	Considérer que, dans les cas où la technique de recouvrements isolants sera envisagée comme méthode de restauration, elle devra faire l'objet d'une démonstration scientifique solide, qui inclut l'impact des changements climatiques sur sa performance à long terme.	Restauration
5	Supporter la recherche en lien avec la réduction de la vulnérabilité du secteur minier par rapport aux changements climatiques, notamment sur : • la performance des méthodes de restauration à long terme; • les méthodes visant à réduire les risques d'instabilités géotechniques (p. ex : résidus épaissis ou filtrés; inclusions de stérile); • l'amélioration des modèles visant l'estimation des conditions climatiques futures ; • l'adaptation des technologies de l'exploration minérale dans le contexte des changements climatiques.	Exploration Exploitation Restauration
6	Ajuster la fréquence de suivi des sites restaurés afin d'éviter la dégradation de la performance des modes de restauration dans le temps attribuable aux changements climatiques et/ou à d'autres phénomènes.	Restauration
7	S'assurer que les garanties financières soient modulées pour tenir compte des effets des changements climatiques sur la performance à long terme des méthodes de restauration.	Restauration
8	S'assurer que, dans le contexte des changements climatiques la protection du territoire n'empêche pas l'accès pour l'exploration minière.	Exploration
9	S'assurer que la performance de la technique de restauration soit robuste face aux changements climatiques avant d'émettre un certificat de libération.	Restauration
10	Produire un guide visant à établir des façons de faire pour mieux intégrer les changements climatiques dans les études techniques.	Exploitation Restauration
11	Utiliser les connaissances des communautés locales, notamment des communautés autochtones, pour mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur les milieux et les impliquer dans le suivi local des changements climatiques.	Exploration Exploitation Restauration
12	Utiliser les données météorologiques existantes recueillies sur les sites miniers actifs pour le développement de scénarios climatiques adaptés au secteur minier.	Exploitation Restauration

Table des matières

	Page
1. Introduction.....	1
1.1 Objectifs et contenu du rapport.....	1
1.2 Définitions des concepts	2
1.2.1 Changements climatiques	2
1.2.2 Impacts attribuables aux changements climatiques.....	2
1.2.3 Risque	3
1.2.4 Vulnérabilité	3
2. Scénarios climatiques 2015-2080	5
2.1 Résultats des simulations climatiques	5
2.2 Indicateurs climatiques qualitatifs	10
2.3 Faits saillants des scénarios climatiques pour l'ensemble du Québec	11
2.4 Niveau du fleuve St-Laurent dans un contexte de changements climatiques.....	12
3. Méthodologie de l'analyse qualitative de risques et de vulnérabilités	13
3.1 Identification des principaux impacts des changements climatiques	13
3.2 Analyse qualitative des principaux risques associés aux changements climatiques	15
3.2.1 Matrice d'analyse de risque	15
3.2.2 Enquête de type Delphi.....	17
3.3 Identification des principales vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques	17
3.4 Présentation des résultats de l'analyse de risque et de vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques.....	18
4. Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour l'exploration minière	18
4.1 Généralités sur l'exploration minière	19
4.1.1 Valorisation et exploration.....	21
4.1.2 Mise en valeur du gisement	23
4.2 Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les activités d'exploration minière	24
4.2.1 Accès et utilisation de l'eau.....	24
4.2.2 Stabilité géotechnique et géomécanique	25
4.2.3 Transport et logistique – accès au territoire – productivité	25
4.2.4 Travailleurs et santé	26

4.3	Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques	26
4.3.1	Difficulté d'accès au territoire en raison de la diminution de la période de gel	27
4.3.2	Perturbation du programme d'exploration en raison des changements au régime des précipitations.....	28
4.3.3	Perte d'accessibilité temporaire au territoire en raison de l'augmentation des événements extrêmes	29
4.3.4	Augmentation des coûts en raison des nouvelles conditions climatiques	30
4.3.5	Instabilités des infrastructures en raison de la fonte du pergélisol.....	31
4.3.6	Difficulté d'approvisionnement régulier en eau pendant l'été en raison de l'augmentation des périodes de sécheresse.....	31
4.3.7	Perturbation des opérations attribuables aux feux de forêt	32
4.4	Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques	32
4.5	Conclusion et recommandations	33
5.	Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour l'exploitation minière	35
5.1	Généralité sur l'exploitation minière	35
5.1.1	Types d'exploitations minières	35
5.1.2	Traitement du minerai	38
5.1.3	Aires d'accumulation des résidus miniers et bassins de rétention.....	39
5.1.4	Gestion de l'eau.....	41
5.1.5	Ouvrages de rétentions.....	42
5.1.6	Autres aspects liés à l'environnement et aux opérations minières.....	47
5.2	Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les opérations d'exploitation	48
5.2.1	Gestion de l'eau.....	48
5.2.2	Ouvrages de rétention	49
5.2.3	Performance environnementale	49
5.2.4	Productivité	50
5.2.5	Transport et logistique	50
5.2.6	Sommaire des impacts et des risques associés aux changements climatiques en période d'exploitation	51

5.3	Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques	53
5.3.1	Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol	53
5.3.2	Défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau (déversoirs/évacuateurs de crue)	54
5.3.3	Possibilités de défaillances des ouvrages de retenue	55
5.3.4	Instabilité des fosses et des ouvertures minières	56
5.3.5	Perte d'accessibilité aux sites miniers	57
5.3.6	Diminution de l'apport en eau fraîche	58
5.4	Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques	59
5.5	Conclusion et recommandations	60
6.	Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour la restauration des sites miniers	64
6.1	Généralités sur la restauration des sites miniers	63
6.1.1	Drainage minier contaminé	63
6.1.2	Méthodes de restauration des sites miniers	64
6.1.3	Facteurs influençant la performance des méthodes de restauration à long terme	72
6.2	Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les méthodes de restauration des sites miniers	72
6.2.2	Systèmes alternatifs	72
6.2.3	Recouvrements en eau	74
6.2.4	Couvertures avec effets de barrière capillaire (CBEC)	77
6.2.5	Recouvrements isolants	78
6.2.6	Autres sources de risques	79
6.3	Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques pour la restauration des sites miniers	79
6.3.1	Diminution de la performance des recouvrements isolants	79
6.3.2	Domages aux matériaux de recouvrement attribuables à la fonte du pergélisol	81
6.3.3	Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol	82
6.3.4	Capacité insuffisante des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue	83

6.3.5	Défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés	84
6.3.6	Diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau	85
6.3.7	Diminution de la performance des barrières à l'oxygène.....	86
6.3.8	Perte d'accessibilité aux sites restaurés.....	87
6.4	Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques	88
6.5	Conclusions et recommandations.....	89
7.	Conclusions et recommandations générales	92
8.	Références.....	96
Annexe 1 – Synthèse bibliographique		
Annexe 2 – Rapport d'activité de l'atelier du 5 novembre 2014		
Annexe 3 – Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier		
Annexe 4 – Questionnaires		
Annexe 5 – Étude de cas de sites restaurés		

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Température moyenne (°C) hivernale (entre décembre et février)	6
Tableau 2 :	Température minimale annuelle (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées.....	7
Tableau 3 :	Nombre de jours sans gel (nombre de jours où la température minimale quotidienne est supérieure à 0°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées	7
Tableau 4 :	Précipitation annuelle (liquide et solide) en mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées	7
Tableau 5 :	Précipitations annuelles du 99 ^e centile (précipitations extrêmes) en mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées.....	8
Tableau 6 :	Accumulation de précipitations (en mm) lors d'évènements extrêmes par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées.....	8
Tableau 7 :	Nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.....	9
Tableau 8 :	Température moyenne (°C) estivale (entre juin et août) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.....	9

Tableau 9 : Température maximale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées	9
Tableau 10 : Changement projeté pour les événements extrêmes de précipitation d’une période de retour de 20 ans pour l’horizon 2080.....	10
Tableau 11 : Période de fonte de la neige pour l’horizon 2080 (date à laquelle le couvert de neige disparaît)	10
Tableau 12 : Accumulation maximale de neige pour l’horizon 2080	11
Tableau 13 : Étapes du processus du développement minéral.....	19
Tableau 14 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à l’exploration minière	33
Tableau 15 : Récurrence de la crue de projet selon la <i>Directive 019</i> (MDDEP, 2012)	45
Tableau 16 : Crue de sécurité, selon le Règlement sur la sécurité des barrages (CEHQ, 2010) ...	45
Tableau 17 : Niveaux cibles pour les crues de sécurité applicables aux phases de construction, d’exploitation et de transition des ouvrages de rétention (ACB, 2014).....	46
Tableau 18 : Niveaux cibles pour les crues de sécurité applicables à la phase d’entretien passif des ouvrages de rétention (ACB, 2014)	46
Tableau 19 : Principaux impacts et risques associés aux opérations minières dans un contexte de changements climatiques.....	52
Tableau 20 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à l’exploitation minière	60
Tableau 21 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à la restauration des sites miniers.....	89
Tableau 22 : Sommaire des recommandations par ordre d’importance	95

Liste des figures

Figure 1 : Régions minières	5
Figure 2 : Principales étapes de l’analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois	14
Figure 3 : Matrice de risque associés aux impacts des changements climatiques	16
Figure 4 : Processus de développement minéral (MERN, 2015).....	20
Figure 5 : Évolution d’un projet minier (Jébrak, 2015)	23
Figure 6 : Répartition de l’investissement minier au Québec par région administrative en 2015	24
Figure 7 : Vue en section schématisée d’une mine à ciel ouvert (adaptée d’Aubertin <i>et al.</i> , 2002	37
Figure 8 : Représentation schématisée d’une mine souterraine (Aubertin <i>et al.</i> , 2002; adaptée de Marshall, 1962)	38

Figure 9 : Schématisation du processus de mise en valeur avec le traitement minéralurgique (Aubertin <i>et al.</i> , 2002)	39
Figure 10 : Phases de vie d'un parc à résidus miniers (ACB, 2014).....	40
Figure 11 : Principales composantes du bilan hydrique d'une opération minière (adaptée d'Aubertin <i>et al.</i> , 2002)	42
Figure 12 : Cheminement des eaux à traiter (Aubertin <i>et al.</i> , 2002)	43
Figure 13 : Drainage minier acide : principales étapes dans le cas de la pyrite (FeS ₂) (Aubertin <i>et al.</i> , 2002)	64
Figure 14 : Principaux systèmes de recouvrement pour le contrôle de drainage minier contaminé.....	65
Figure 15 : Méthode de restauration du recouvrement en eau (adaptée d'Aubertin <i>et al.</i> , 1999).....	68
Figure 16 : Méthode de restauration de la nappe surélevée (à faible profondeur et avec monocouche) (adaptée d'Aubertin <i>et al.</i> , 1999).....	69
Figure 17 : Profil des températures associé aux recouvrements isolants (adaptée d'Andersland and Ladanyi, 2004).....	71
Figure 18 : Sources de risques pour les systèmes alternatifs de recouvrement face aux changements climatiques.....	73
Figure 19 : Sources de risques pour les systèmes conventionnels face aux changements climatiques	74
Figure 20 : Sources de risques pour les recouvrements en eau face aux changements climatiques	75
Figure 21 : Processus affectant l'efficacité des recouvrements en eau (Li <i>et al.</i> 1997).....	75
Figure 22 : Sources de risques pour les recouvrements avec nappe surélevée face aux changements climatiques.....	76
Figure 23 : Processus affectant l'efficacité des recouvrements avec nappe surélevée	77
Figure 24 : Sources de risques des couvertures avec effets de barrière capillaire face aux changements climatiques.....	77
Figure 25 : Sources de risques pour les recouvrements isolants face aux changements climatiques	78
Figure 26 : Processus affectant l'efficacité des recouvrements isolants (adaptée de Coulombe, 2012)	78

1. Introduction

Les données scientifiques qui démontrent le réchauffement du climat mondial sont bien établies. De nombreuses évidences soulignent que les changements climatiques ont déjà des impacts sur l'environnement et qu'ils seront encore plus importants dans le futur. Bien entendu, ces changements ont et auront des conséquences sur les écosystèmes, mais également sur les activités industrielles et la société en général. Ainsi, tous les secteurs d'activités économiques, sans égard à leur localisation géographique, devront faire face à des impacts directs et indirects des changements climatiques.

Étant donné ses constantes interactions avec le milieu naturel environnant, le secteur minier pourrait être vulnérable face à certains impacts des changements climatiques. De plus, les activités minières reposent sur des infrastructures qui doivent avoir une certaine longévité, particulièrement les ouvrages de rétention des résidus. Ces derniers demeureront en place bien longtemps après que les exploitations seront terminées. Ainsi, ces infrastructures doivent performer durant plusieurs années et, par conséquent, leur conception doit tenir compte des changements climatiques. En effet, la hausse de la température, les modifications aux régimes de précipitations et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes sont des exemples bien documentés de changements climatiques pouvant avoir des conséquences importantes sur les activités minières. Le secteur minier est donc à la fois exposé à des risques et à de nouvelles opportunités en lien avec les changements climatiques. Par conséquent, le succès à long terme du secteur minier sera influencé par son habileté à s'adapter à ces changements.

Quelques rapports font état de la vulnérabilité de l'industrie minière par rapport aux changements climatiques et aux nombreux impacts qu'ils pourraient avoir sur ses activités (voir *annexe 1 – Synthèse bibliographique*). Toutefois, un tel exercice n'a pas été effectué spécifiquement pour le Québec.

Le MERN a donc demandé qu'une analyse des risques et des vulnérabilités liées aux changements climatiques pour le secteur minier québécois soit réalisée. Cette action est inscrite dans l'une des orientations de la *Stratégie d'adaptation aux changements climatiques du Québec*, soit « *préserver la prospérité économique* ». L'identification des vulnérabilités face aux changements climatiques permettra au gouvernement et aux entreprises minières de travailler à développer des solutions d'adaptation pour l'industrie.

L'URSTM-UQAT a été mandatée pour réaliser une analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois.

1.1 Objectifs et contenu du rapport

L'objectif global de ce rapport est d'identifier les principaux éléments de risques et de vulnérabilités du secteur minier québécois face aux changements climatiques.

Ce rapport contient :

- une synthèse bibliographique (*annexe 1*);

- une synthèse des changements climatiques pour le secteur minier (*annexe 3*);
- un résumé de l'atelier réunissant un groupe d'experts qui avait pour but d'identifier les principaux impacts des changements climatiques sur les activités minières au Québec (*annexe 2*);
- une analyse qualitative des principaux risques associés aux changements climatiques pour les différentes phases du développement minéral, soit l'exploration, l'exploitation et la restauration;
- une analyse des principales vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques;
- des recommandations visant à réduire la vulnérabilité du secteur minier québécois face aux principaux impacts des changements climatiques.

1.2 Définitions des concepts

Avant d'entreprendre des discussions sur les vulnérabilités du secteur minier québécois face aux changements climatiques, il est nécessaire de définir certains concepts et termes utilisés tout au long de ce rapport.

1.2.1 Changements climatiques

Définition : Tout changement de climat dans le temps, qu'il soit causé par la variabilité naturelle ou par les activités humaines. Les changements climatiques désignent une variation de l'état du climat qui peut être identifiée (p. ex. : à l'aide de tests statistiques) par des changements affectant la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés et persistant pendant de longues périodes, généralement des décennies ou plus (Source : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC]).

Les scénarios climatiques spécifiques à différentes régions minières du Québec, effectués par le consortium Ouranos, sont résumés au chapitre 3 et présentés en détails à l'*annexe 3*.

Les changements climatiques considérés pour cette étude sont essentiellement les suivants :

- Une augmentation des températures moyennes qui implique :
 - la diminution des jours de gel;
 - la fonte d'une partie du pergélisol;
 - l'augmentation des zones actives du pergélisol.
- Des changements au régime des précipitations qui impliquent :
 - l'augmentation des précipitations annuelles moyennes;
 - l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes de précipitations;
 - l'augmentation des périodes de sécheresse pendant l'été.

1.2.2 Impacts attribuables aux changements climatiques

Définition : Les conséquences des changements climatiques sur les systèmes humains et naturels.

Dans ce document, le terme « impacts » est utilisé pour désigner les conséquences sur les activités minières des événements météorologiques et climatiques.

Prenons l'exemple de l'augmentation des précipitations lors des événements de pluies extrêmes, qui peut avoir comme conséquence une capacité insuffisante des déversoirs ou des évacuateurs qui provoquerait des relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

Dans cette exemple, le changement climatique correspond à l'augmentation des précipitations, alors que l'impact correspond, quant à lui, aux relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

1.2.3 Risque

Définition : Le risque est considéré comme une mesure du danger. Il s'exprime en termes de probabilité d'occurrence d'un impact multipliée par le degré d'importance des conséquences de cet impact s'il se produit.

$$\text{Risque} = (\text{Probabilité d'occurrence}) \times (\text{Gravité des conséquences})$$

Selon l'exemple précédent, pour évaluer le risque qu'une insuffisance des déversoirs provoque des relâchements d'eaux contaminées, il faut, dans un premier temps, évaluer la probabilité d'occurrence. Autrement dit, quelle est la probabilité que l'augmentation du volume de précipitations provoque l'insuffisance des déversoirs? Pour évaluer cette probabilité d'occurrence, il faut tenir compte des projections climatiques et de la capacité des déversoirs à gérer de tels volumes de précipitations. Dans le cadre de cette étude, les probabilités d'occurrence sont évaluées seulement de façon qualitative, selon une échelle allant de *rare* à *très probable*.

Dans un second temps, pour évaluer le risque, il faut considérer le niveau de gravité des conséquences de l'impact. Toujours selon le même exemple, quel est le niveau de conséquence des relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement? Par exemple, une telle situation génèrerait des conséquences environnementales. Dans le cadre de cette étude, la gravité des conséquences a également été évaluée de façon qualitative selon une échelle allant de *faible* à *très élevé*.

Finalement, pour évaluer le niveau de risque associé aux impact des changements climatiques, on utilise une matrice d'analyse de risque (voir chapitre 4, *figure 2*).

1.2.4 Vulnérabilité

Définition : La propension ou la prédisposition à être affecté de manière négative par les impacts des changements climatiques.

Pour évaluer la vulnérabilité du secteur minier aux différents impacts des changements climatiques, il faut considérer plusieurs concepts :

- La résistance du secteur, soit sa capacité à résister face à un événement climatique;
- La résilience du secteur, soit sa capacité à récupérer un fonctionnement normal à la suite des impacts d'un événement climatique;
- La capacité du secteur à réagir ou à s'adapter aux changements climatiques.

Autrement dit, la vulnérabilité du secteur minier à un certain impact sera d'autant plus faible que sa résistance/résilience sera grande face à celui-ci.

Toujours selon l'exemple donné, pour évaluer la vulnérabilité du secteur minier par rapport à un possible relâchement d'eaux contaminées attribuable à une capacité insuffisante des déversoirs, il faut évaluer la capacité des entreprises à apporter les correctifs nécessaires (capacité à s'adapter) et leur capacité à récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un tel événement (résilience).

Il faut bien faire attention de ne pas confondre les notions de risque et de vulnérabilité. Par exemple, le secteur minier n'est pas forcément vulnérable à un impact avec un niveau de risque élevé si celui-ci est en mesure de s'adapter facilement à une telle situation. À l'inverse, le secteur minier peut être très vulnérable à un impact avec un niveau de risque faible si celui-ci est incapable de prendre les mesures nécessaires pour faire face à une telle situation.

2. Scénarios climatiques 2015-2080

Pour bien mettre en contexte les possibles impacts des changements climatiques sur les activités minières, il est important de présenter les caractéristiques des changements projetés. Afin de fournir les informations climatiques nécessaires à l'analyse de risques et de vulnérabilités, le consortium Ouranos a préparé des simulations climatiques adaptées autant que possible aux besoins de cette dernière. Ces simulations ont donc utilisé les données existantes et disponibles. De plus, elles se sont concentrées sur les variables climatiques jugées utiles pour les experts du secteur minier.

Ce chapitre vise à résumer les grandes lignes de la synthèse des changements climatiques pour le secteur minier effectuée par Ouranos. Le rapport détaillé de cette synthèse se retrouve à l'annexe 3.

2.1 Résultats des simulations climatiques

Six régions du Québec, caractérisées par une activité minière actuelle et/ou potentielle importante, ont été choisies. Dans le cadre de cette étude, des calculs des scénarios climatiques ont été effectués spécifiquement pour ces régions minières, soit le Grand-Nord, la Côte-Nord, l'Abitibi, la fosse du Labrador, la Baie-James et la région délimitée par Matagami et Chibougamau.

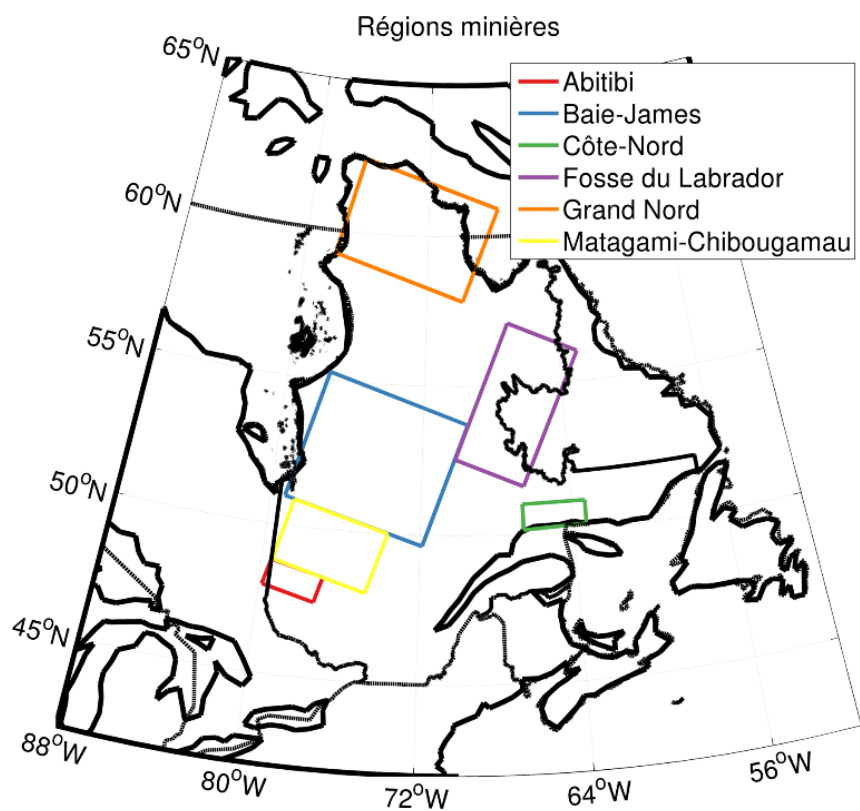


Figure 1 : Régions minières

Les indicateurs climatiques ont été calculés à l’aide d’un ensemble de simulations provenant du projet « *Coupled Models Intercomparison Phase 5* » (CMIP5 – Taylor *et al.*, 2011). Les scénarios représentent des chemins possibles en termes de réchauffement climatique et sont conditionnés par différentes évolutions socio-économiques durant les prochaines décennies. Ils prennent en compte, notamment, différents scénarios d’émissions de gaz à effet de serre. Pour obtenir un ensemble reflétant l’incertitude sur le parcours socio-économique futur de la planète, il s’avère important d’utiliser plus d’un scénario climatique. Dans le cas des simulations climatiques calculées par Ouranos pour cette étude, deux scénarios climatiques ont été utilisés, soit « *Representative Concentration Pathways* » (RCP) 4,5 et 8,5 (Moss *et al.*, 2010) (voir *annexe 3* pour plus de détails).

Les indicateurs climatiques sont tout d’abord calculés sur une base annuelle. Ensuite, les moyennes climatologiques, pour une période donnée (p. ex. : 2041-2070), sont calculées à partir des valeurs annuelles. Pour chacun des scénarios RCP, 43 simulations du projet CMIP5 sont utilisées. Ceci peut être considéré comme un ensemble assez large, qui couvre bien l’incertitude inhérente à ce type d’exercice (i.e. incertitudes des modèles, variabilité naturelle du climat et incertitudes des scénarios RCP).

L’ensemble des résultats des simulations climatiques se retrouve dans le rapport complet d’Ouranos présenté à l’*annexe 3*. Afin de simplifier l’importante quantité d’information contenue dans ce rapport, ce chapitre résume les données pour les différentes régions minières. Les données des simulations climatiques présentées dans les *tableaux 1 à 9* sont issues du scénario RCP 8,5, c’est-à-dire le scénario le plus pessimiste en termes de réchauffement. C’est aussi le scénario qui est le plus réaliste, selon les dernières observations d’émissions de gaz à effet de serre. Il est important de considérer que les valeurs moyennes présentées ici sont accompagnées d’une zone d’incertitude. Pour des fins de simplification, les incertitudes ne sont pas présentées, puisque le but est de fournir les informations climatiques nécessaires à l’analyse de risques et de vulnérabilités. L’information sur les incertitudes est disponible à l’*annexe 3*.

Tableau 1 : Température moyenne (°C) hivernale (entre décembre et février)
par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,52	-11,9	-9,38	-6,84	-15,22	-13,5	-10,7	-7,6	-18,46	-16,4	-13,3	-9,81

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,47	-11,8	-9,28	-6,41	-19,75	-17,8	-14,9	-12	-21,88	-19,1	-14,8	-9,82

Tableau 2 : Température minimale annuelle (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-39,37	-36,9	-32,7	-27,4	-36,38	-33,8	-29,5	-23,8	-38,96	-36,3	-29	-26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-32,68	-30,1	-26,1	-20,9	-40	-37,8	-33,9	-28,9	-43,69	-41,1	-36,6	-28

Tableau 3 : Nombre de jours sans gel (nombre de jours où la température minimale quotidienne est supérieure à 0°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
166	177	194	216	172	184	201	223	150	162	179	201

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
170	181	198	219	129	139	155	176	114	126	143	167

Tableau 4 : Précipitation annuelle (liquide et solide) en mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
853	889	940	990	889	937	994	1049	835	877	946	1014

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
1139	1192	1262	1313	922	974	1043	1112	471	505	558	621

Tableau 5 : Précipitations annuelles du 99^e centile (précipitations extrêmes) en mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26	28	30	32	24	26	28	30	19	21	23	26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
33	34	37	39	20	22	24	27	12	13	20	17

Tableau 6 : Accumulation de précipitations (en mm) lors d'événements extrêmes par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées¹

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
281	308	339	373	262	288	323	357	220	247	290	333

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
311	345	395	431	202	237	284	329	132	153	186	264

¹ Pour mesurer l'accumulation lors d'événements extrêmes, on calcule tout d'abord la valeur du 95^e centile de la période historique (i.e. le 95^e centile est la valeur qui sépare la distribution de la précipitation quotidienne en deux entités : du côté inférieur de ce centile, nous avons 95 % des données et du côté supérieur de celui-ci, nous en avons 5 %). Ensuite, pour chaque année, nous calculons l'accumulation des précipitations qui sont supérieures à la valeur historique du 95^e centile. Cette valeur représente donc la quantité de précipitations en mm accumulée lors d'événements qualifiés d'extrêmes.

Tableau 7 : Nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
7	7	8	8	7	7	8	9	6	7	8	9

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
10	10	11	11	6	7	8	9	3	3	4	5

Tableau 8 : Température moyenne (°C) estivale (entre juin et août) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
15,88	17,35	19,32	21,08	14,94	16,39	17,92	20,12	12,96	14,29	16,15	18,62

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
12,44	13,71	14,89	17,87	10,95	12,14	13,86	16,16	7,19	8,38	10,06	12,37

Tableau 9 : Température maximale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
32,02	33,64	36,54	38,61	31,16	32,77	39,63	37,49	27,88	29,39	31,39	34,15

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26,73	28,16	30,05	32,66	24,71	26,04	27,85	30,36	21,43	22,78	28,02	30,1

2.2 Indicateurs climatiques qualitatifs

Dans le cadre de ce projet, certains indicateurs climatiques sont présentés de manière qualitative en raison d'un niveau de confiance faible, c'est-à-dire que, pour ces indicateurs, les résultats des simulations présentent une grande dispersion. Ainsi, au lieu d'une valeur quantitative accompagnée d'une trop grande zone d'incertitude, l'information est plutôt présentée sous forme de tendance du changement climatique projeté. Néanmoins, ces indicateurs qualitatifs présentent un niveau de consensus élevé, c'est-à-dire qu'un grand nombre de simulations indiquent la même direction du changement.

Tableau 10 : Changement projeté pour les événements extrêmes de précipitation d'une période de retour de 20 ans pour l'horizon 2080

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	15-17,5 ans	Élevé	Faible
Baie-James	15-17,5	Élevé	Faible
Côte-Nord	12,5-15	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	12,5-15	Élevé	Faible
Grand-Nord	15-17,5	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	12,5-17,5	Élevé	Faible

Ces résultats indiquent qu'un événement extrême de précipitation qui se présentait typiquement une fois tous les 20 ans devrait revenir de manière plus fréquente.

Tableau 11 : Période de fonte de la neige pour l'horizon 2080 (date à laquelle le couvert de neige disparaît)

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	Plus tôt	Élevé	Faible
Baie-James	Plus tôt	Élevé	Faible
Côte-Nord	Plus tôt	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	Plus tôt	Élevé	Faible
Grand-Nord	Plus tôt	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	Plus tôt	Élevé	Faible

Typiquement, la fonte de la neige devrait survenir environ un mois plus tôt que durant la période historique 1971-2000.

Tableau 12 : Accumulation maximale de neige pour l’horizon 2080

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	Baisse	Élevé	Faible
Baie-James	Baisse	Élevé	Faible
Côte-Nord	Baisse	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	Légère baisse	Élevé	Faible
Grand-Nord	Baisse	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	Baisse	Élevé	Faible

La baisse devrait être plus importante dans les régions de l’Abitibi, de la Baie-James, de la Côte-Nord, du Grand-Nord et de Matagami-Chibougamau que dans celle de la fosse du Labrador.

2.3 Faits saillants des scénarios climatiques pour l’ensemble du Québec (Ouranos, 2015)

- Pour toutes les régions minières du Québec étudiées, des hausses de la température moyenne sont projetées, elles sont plus importantes pendant la période hivernale, surtout dans le Grand-Nord.
- On projette une forte réduction du nombre de jours de gel par an (avec température minimale inférieure à zéro) ainsi que du nombre de nuits et de jours froids. La saison de gel aura tendance à raccourcir, particulièrement dans le nord du Québec.
- Partout au Québec, les modèles climatiques s’accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations.
- Toutes les régions du Québec peuvent s’attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour.
- Les modèles s’accordent aussi sur des augmentations, mais plus modestes, des précipitations en été et en automne.
- On s’attend à des hausses significatives de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus substantielles dans le nord que dans le sud.
- Les périodes de retour des événements de précipitations extrêmes seraient raccourcies de façon significative. En effet, un événement dont la période de retour est de 20 ans sur l’horizon 1986-2005 pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065, avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l’ensemble du Québec.

- On projette une hausse de la fréquence des orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100.
- À l'échelle du Québec, bien que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes annuelles et des événements de pluies abondantes, ils prévoient également un allongement des périodes sans précipitations pour la saison estivale.
- Les projections d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches annuellement et encore davantage pour la saison estivale sur l'horizon 2081-2100.

2.4 Niveau du fleuve St-Laurent dans un contexte de changements climatiques

Le transport du minerai par voie maritime est un enjeu important pour le secteur minier. Dans un contexte de changements climatiques, où le régime de précipitation est amené à changer, tout comme une modification de l'intensité de l'évaporation causée par une augmentation de la température, il s'avère important d'estimer si le niveau du fleuve St-Laurent est amené à changer.

La littérature à ce sujet est peu disponible. Cependant, une étude récente a montré que les minimums annuels dans le bassin des Grands Lacs seraient plus importants, tandis que les niveaux maximums annuels devraient rester similaires à la période historique 1971-1999 (Music *et al.*, 2015). Bien que le lien entre le niveau des Grands Lacs et celui du St-Laurent ne soit pas exclusivement direct, il s'ensuit que la probabilité d'avoir des niveaux inférieurs dans les prochaines décennies n'est pas nulle.

D'autres études suggèrent plutôt que le niveau des Grands Lacs serait appelé à augmenter dans les prochaines décennies (MacKay & Seglenieks, 2013).

Il demeure important de noter que ces résultats concernent en premier lieu les niveaux d'eau sur la région des Grands Lacs et non pas directement sur le St-Laurent. La problématique du St-Laurent est connectée aux Grands Lacs, mais aussi à ses tributaires ainsi qu'au niveau du Golfe du St-Laurent. Par conséquent, dans une perspective de recherche scientifique, les conclusions les plus récentes suggèrent que l'incertitude est encore très élevée et que le consensus demeure assez faible. Malgré l'incertitude reliée au niveau du St-Laurent, d'un point de vue d'adaptation du secteur minier aux changements climatiques, il serait avisé d'analyser davantage la vulnérabilité du transport du minerai par voie maritime via le St-Laurent par rapport à une légère baisse du niveau de l'eau.

3. Méthodologie de l'analyse qualitative de risques et de vulnérabilités

Ce chapitre présente les étapes qui ont mené à l'identification des principaux impacts des changements climatiques sur les activités minières et, ensuite, à l'évaluation des risques associés à ces impacts ainsi que des vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques. La *figure 2* résume les principales étapes de cette démarche.

3.1 Identification des principaux impacts des changements climatiques

La première étape de cette analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois a d'abord été d'effectuer une synthèse bibliographique. Cette dernière visait à identifier des impacts actuels et anticipés des changements climatiques spécifiquement pour le secteur minier. La littérature scientifique, la littérature spécialisée du secteur minier ainsi que des rapports produits par des instances gouvernementales ont été consultés.

On retrouve le rapport de cette synthèse bibliographique à l'*annexe 1*.

Simultanément à cette première étape, des simulations climatiques pour la période 2015-2080 pour six régions minières du Québec ont été réalisées par le consortium Ouranos. La synthèse des changements climatiques pour le secteur minier est présentée en détails à l'*annexe 3*.

La synthèse bibliographique et celle des scénarios climatiques ont permis de fournir les renseignements de base nécessaires à un groupe d'experts du secteur minier (industriels, universitaires, gouvernementaux) pour amorcer une réflexion sur les impacts des changements climatiques. La consultation de ce groupe d'experts a pris la forme d'un atelier de travail, qui a eu lieu en novembre 2014. Cet atelier a favorisé les échanges entre spécialistes du secteur minier et des changements climatiques. Les discussions ont permis d'identifier des sources de risques pour les activités minières ainsi que des opportunités, des besoins en matière de recherche et des pistes de solution envisageables par rapport à certains impacts des changements climatiques.

On retrouve le résumé de cet atelier à l'*annexe 2*.

Ces premières étapes de la présente démarche ont fait ressortir que de nombreux aspects concernant l'activité minière au Québec peuvent être directement ou indirectement influencés par les changements climatiques, et ce, pour toutes les étapes du cycle de vie d'une mine. Sur la base des résultats de la synthèse bibliographique et de l'atelier de consultation, une sélection des impacts les plus déterminants a été effectuée, afin de réaliser une analyse des risques associés à ceux-ci. Les impacts sont présentés selon les grandes étapes de mise en valeur des ressources minérales que sont l'exploration, l'exploitation et la restauration des sites miniers.

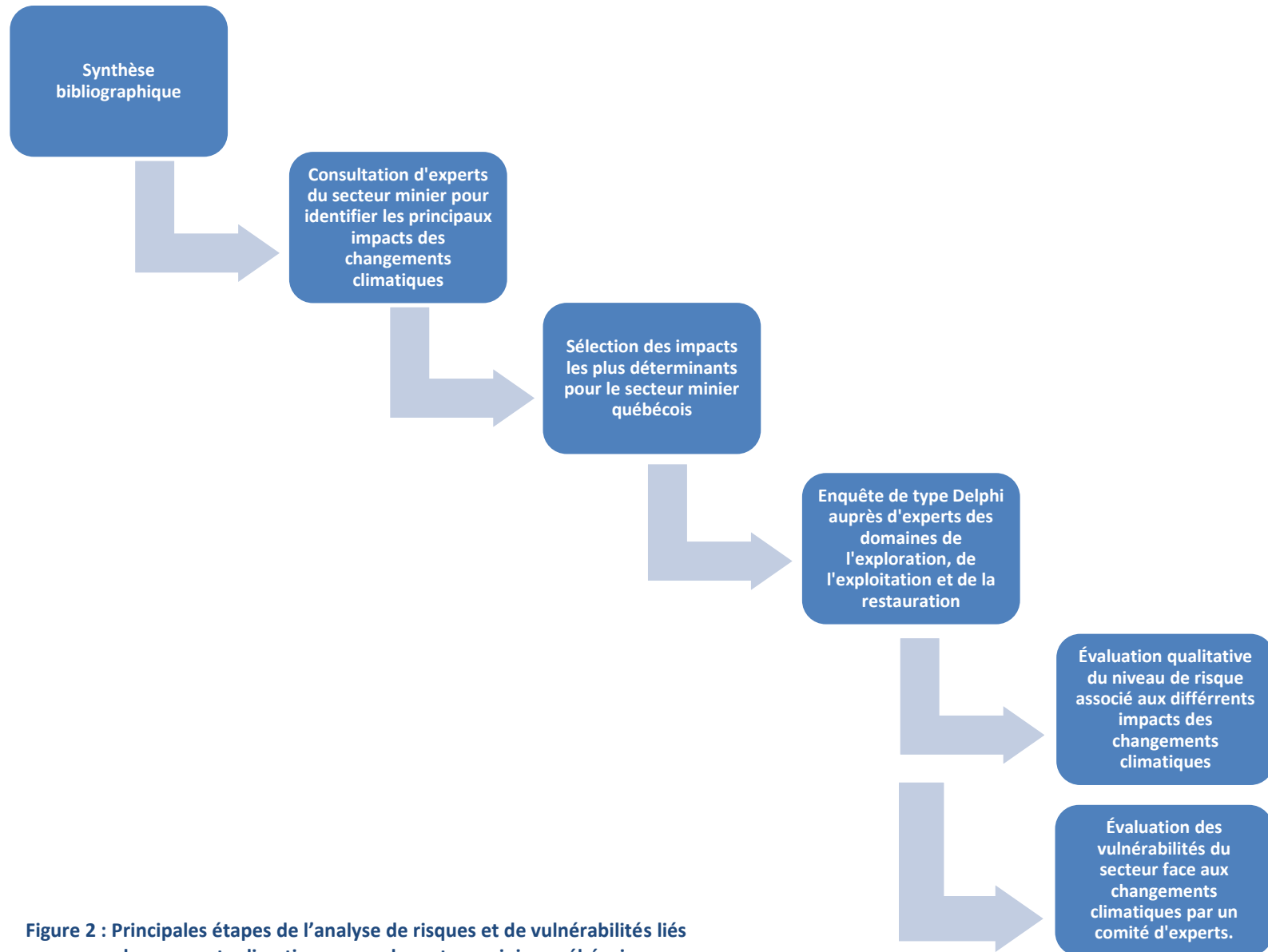


Figure 2 : Principales étapes de l'analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois

3.2 Analyse qualitative des principaux risques associés aux changements climatiques

Afin d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux principaux impacts des changements climatiques répertoriés, un sondage (enquête Delphi) a été réalisé auprès d'experts du secteur selon leurs champs d'expertise, soit l'exploration, l'exploitation et la restauration des sites miniers.

Les questionnaires qui ont été soumis aux participants à ce sondage les ont amenés à se prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci. Les questionnaires qui ont été utilisés sont présentés à l'*annexe 4*.

L'analyse de leurs réponses a permis d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux différents impacts des changements climatiques, en se basant sur une matrice d'analyse de risque qui est présentée à la *figure 3*.

Dans le cadre de cette analyse, le risque est défini comme étant l'association de la probabilité qu'un impact se produise à la gravité des conséquences de celui-ci. Afin d'évaluer la probabilité d'occurrence, les participants à l'enquête devaient considérer les scénarios climatiques présentés par le consortium Ouranos (voir *annexe 3*) ainsi que la robustesse (capacité de résistance) du secteur minier face à la variation des différents paramètres climatiques (i.e., température, précipitations, etc.). Le niveau de gravité des conséquences d'un événement est établi en fonction des effets sur le milieu naturel, sur la santé et la sécurité, des coûts engendrés par les actions ou les travaux à entreprendre pour remédier à la situation ainsi qu'en fonction des effets sur la faisabilité ou la rentabilité d'un projet minier. L'évaluation qualitative du risque, pour chacun des impacts retenus, a été réalisée en prenant en considération le cas d'une mine type, d'envergure moyenne, pour chacune des régions minières du Québec : Abitibi-Témiscamingue (AT), Baie-James (BJ), Côte-Nord (CN), fosse du Labrador (FL), Grand-Nord (GN) et la région de Matagami et Chibougamau (MC).

3.2.1 Matrice d'analyse de risque

L'évaluation qualitative du niveau de risque est basé sur la matrice d'analyse de risque proposée par Environnement Canada² et approuvé par le MERN dans cadre de cette analyse. Le niveau de risque d'un impact des changements climatiques est le produit de la probabilité d'occurrence et de la gravité des conséquences de cet impact (*figure 3*).

² <https://www.ec.gc.ca/dd-sd/default.asp?lang=fr&n=E7537072-1>

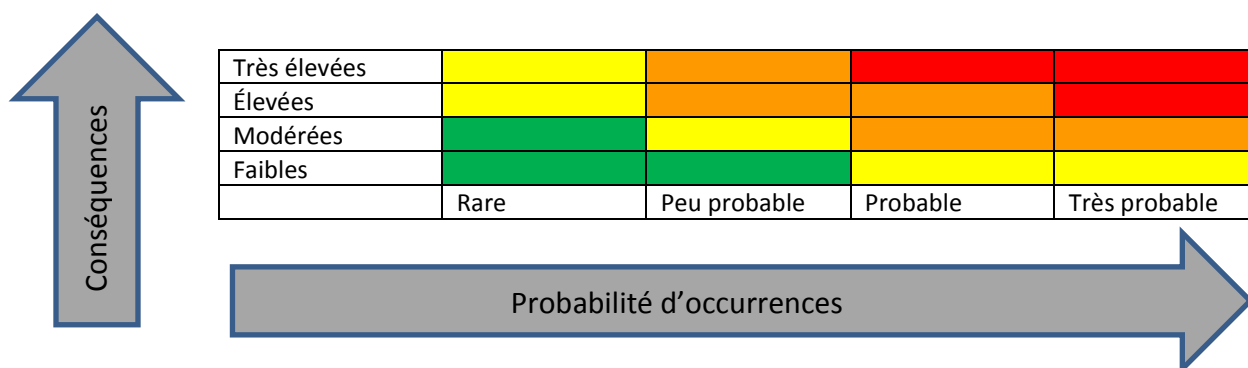


Figure 3 : Matrice de risque associés aux impacts des changements climatiques

Un code de couleur est utilisé pour identifier le niveau de risque :

- **Vert : Risque faible**

Le risque faible est caractérisé par une probabilité d'occurrence *rare* ou *peu probable*, associée à des conséquences de gravité *faibles* à *modérées*.

- **Jaune : Risque modéré**

Le risque modéré est caractérisé par une probabilité d'occurrence de *rare* à *très probable*, associée à des conséquences *faibles* à *très élevées* (i.e., des coûts supplémentaires pour l'entreprise minière ou le gouvernement devront être assumés pour remédier à la situation). Cela ne remet pas la faisabilité ou la vitalité d'un projet minier en question, mais des actions pourraient devoir être entreprises pour remédier à la situation.

- **Orange : Risque élevé**

Le risque élevé est caractérisé par une probabilité d'occurrence de *peu probable* à *très probable*, associée à des conséquences *modérées* à *très élevées* (i.e., des coûts importants pour l'entreprise minière ou le gouvernement devront être assumés pour remédier à la situation). Des actions de plus grande ampleur pourraient devoir être entreprises pour remédier à la situation. Cela pourrait, dans certains cas, affecter la rentabilité ou encore la faisabilité d'un projet minier; des impacts significatifs sur le milieu naturel sont à prévoir.

- **Rouge : Risque très élevé**

Le risque très élevé est caractérisé par une probabilité d'occurrence de *probable* à *très probable* associée à des conséquences *élevées* à *très élevées* (i.e., l'entreprise ou le gouvernement devra déboursier des sommes très importantes pour remédier à la situation). La faisabilité ou la vitalité d'un projet minier peut être remise en question. Cela s'applique également aux événements où le risque pour la protection de l'environnement est grand (contaminations, déversements, pollution des cours d'eau, etc.) et pourrait avoir des impacts à long terme sur le milieu naturel.

3.2.2 Enquête de type Delphi

L'enquête Delphi (Okoli et Pawlowski, 2004; Rousseau, 1996) nécessite minimalement deux tours de consultation. Les questionnaires qui ont été soumis aux participants les ont amenés à se prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci.

L'analyse de leurs réponses a donc permis d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux différents impacts des changements climatiques en se basant sur la matrice présentée précédemment (*figure 3*).

Les résultats du premier tour de consultation ont été analysés pour déterminer le degré de consensus quant à la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et à la gravité des conséquences. Le degré de consensus correspond à la proportion d'experts qui ont jugé que les probabilités d'occurrence sont au même niveau. Il en va de même pour la gravité des conséquences. Le niveau de consensus correspond à une proportion de deux tiers et plus d'experts qui ont fait le même constat (probabilité d'occurrence et gravité des conséquences).

Lors du deuxième tour, les experts ont réévalué le niveau de risques seulement pour les impacts n'ayant pas obtenu un niveau de consensus suffisamment élevé lors du premier tour. Les participants ont donc pu voir leurs réponses comparées à la moyenne des autres participants.

Par exemple, lors de la première ronde, un participant qui avait jugé que la gravité des conséquences était *modérée* pour l'impact X, comparativement à la moyenne du groupe qui évaluait ce même risque à *élevé*, peut après avoir pris connaissance de cet écart, réévaluer le niveau de gravité des conséquences pour cet impact. Autrement dit, le participant peut décider de revoir son évaluation à la hausse ou de conserver son avis original. Les résultats de la deuxième ronde ont ensuite été analysés à nouveau pour déterminer le degré de consensus.

Lorsque le niveau de risque d'un impact n'a pas obtenu le niveau de consensus convenu (2/3), il a été identifié comme tel dans les résultats de l'analyse de risques (chapitres 5, 6 et 7).

3.3 Identification des principales vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques

Pour cet exercice, la vulnérabilité est définie comme étant la susceptibilité du secteur à subir les effets des changements climatiques en considérant sa capacité ou son incapacité à s'adapter (capacité de résilience et/ou d'adaptation).

Pour arriver à évaluer les vulnérabilités, il est important d'avoir une vue d'ensemble du processus de développement minier et d'être en mesure de mettre en perspective les différents impacts et le risque qui leur est associé. Un comité d'experts ayant cette vision d'ensemble du secteur a été consulté, afin de déterminer le niveau de vulnérabilité du secteur minier québécois par rapport aux principaux impacts des changements climatiques. Les membres de ce comité sont tous des experts du secteur minier qui cumulent de nombreuses années d'expérience dans le domaine. Ils proviennent de l'industrie, du gouvernement et du monde universitaire.

3.4 Présentation des résultats de l'analyse de risque et de vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques

Les trois prochains chapitres présentent les résultats de l'analyse de risque et de vulnérabilités pour l'exploration minière, l'exploitation minière et la restauration des sites. Ils sont présentés de la même façon :

- Dans un premier temps, des notions de base sur les activités minières sont fournies afin que le lecteur soit en mesure de comprendre en quoi les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur celles-ci;
- Dans un second temps, les résultats de l'analyse de risque qualitative des principaux impacts des changements climatiques sont présentés à partir des résultats de l'enquête de type Delphi menée auprès des experts du secteur minier;
- Ensuite, une analyse des vulnérabilités face aux changements climatiques est fournie.

Finalement, des pistes de solution et des recommandations pour diminuer la vulnérabilité du secteur minier sont présentées.

4. Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour l'exploration minière

L'exploration minière (incluant la valorisation des ressources minérales) constitue la première étape du processus de développement minéral. L'exploration minière s'exerce aujourd'hui sur tous les continents, à l'exception de l'Antarctique, et elle se pratique ainsi sous presque tous les climats et dans un grand nombre d'écosystèmes. Les méthodes d'exploration diffèrent ou s'adaptent selon les environnements. Les changements climatiques sont susceptibles d'exiger des explorateurs miniers certaines adaptations dans le futur. De plus, les changements sociaux, tels que les habitudes de consommation visant à réduire les gaz à effet de serres, sont susceptibles de favoriser l'exploration de nouvelles substances minérales.

Afin d'être en mesure de comprendre en quoi les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur les activités d'exploration minière, il est nécessaire de présenter quelques notions de base à ce sujet. La section 5.1 présente donc un sommaire des activités de valorisation, d'exploration et de mise en valeur nécessaire à l'ouverture d'une mine. La section 5.2 explique en quoi les changements climatiques pourraient affecter certaines facettes de ces activités, alors que la section 5.3 présente l'analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques, pour l'exploration. Finalement, la section 5.5 apporte quelques pistes de solution et recommandations pour diminuer la vulnérabilité du secteur minier dans un contexte de changements climatiques.

4.1 Généralités sur l'exploration minière

L'exploration est à la base du processus de développement minéral. Il s'agit d'une activité essentielle à la découverte et à la définition d'un gisement. Elle conduit, après la mise en valeur, à l'aménagement du complexe minier (*tableau 13* et *figure 4*) et à la phase d'exploitation proprement dite (*chapitre 6*).

Tableau 13 : Étapes du processus du développement minéral

Étapes	Code	Tâches
Valorisation	VRM	Levés, recherche et synthèse métallogéniques
Exploration	EX-1	Planification de l'exploration
	EX-2	Reconnaissance régionale et levés
	EX-3	Prospection et levés au sol sur les anomalies
	EX-4	Vérification des anomalies et indices
	EX-5	Découverte et délimitation d'un gîte à tonnage évalué
Mise en valeur	MV-1	Définition du gîte évalué
	MV-2	Définition des paramètres techniques (ingénierie)
	MV-3	Définition des paramètres économiques
	MV-4	Étude de faisabilité
Aménagement	ACM-1	Construction. Mise en œuvre de la mine
	ACM-2	Production et mise en marché (exploitation de la mine)
	ACM-3	Fermeture de la mine. Restauration du site

Le processus de développement minéral

Ce schéma idéalisé présente la nature et la durée des travaux, les objectifs, les méthodes d'évaluation, les résultats visés, la nature de l'inventaire minéral et ce pour chacune des quatre phases du processus de développement des ressources minérales : la valorisation des ressources minérales, l'exploration, la mise en valeur et l'aménagement du complexe minier.

Dans ce schéma, un indice minéralisé requiert au moins un échantillon choisi ou un recoupement par sondage, tranchée ou rainure d'une minéralisation qui

possède des attributs économiques potentiels. Un gîte minéral consiste au moins en une zone minéralisée dont le potentiel économique a été estimé approximativement lors d'une première évaluation des ressources minérales. La conversion de ressources minérales en réserves minérales requiert non seulement une étude de faisabilité favorable à la suite de travaux de mise en valeur, mais aussi un engagement vers la mise en production du gisement concerné. La phase de l'aménagement du complexe minier inclut, à la fois, les étapes de la préparation et du développement du projet, de l'exploitation minière et de la restauration du site minier.

	Valorisation des ressources minérales	Exploration					Mise en valeur				Aménagement du complexe minier		
Stade	VRM	EX - 1	EX - 2	EX - 3	EX - 4	EX - 5	MV - 1	MV - 2	MV - 3	MV - 4	ACM-1 (Préparation et développement)	ACM-2 (Exploitation minière)	ACM-3 (Restauration du site)
Travaux	Levés, recherches et synthèses métallogéniques.	Planification de l'exploration.	Reconnaissance régionale et levés.	Prospection et levés au sol sur les anomalies.	Vérification des anomalies et indices.	Découverte et délimitation d'un gîte à tonnage évalué.	Définition du gîte à tonnage évalué.	Définition des paramètres techniques (ingénierie).	Définition des paramètres économiques.	Étude de faisabilité.	Construction. Mise en œuvre de la mine.	Production et mise en marché.	Fermeture de la mine. Restauration du site.
Durée des travaux		2 ans et plus					3 à 8 ans				2 à 3 ans	5 ans et plus	
Objectifs	Fournir l'information et les outils pour développer les ressources minérales dans une perspective de développement durable.	Choisir les minéraux et métaux cibles. Établir les objectifs et stratégies. Choisir des régions cibles prometteuses.	Trouver des anomalies régionales et locales. Choisir les cibles les plus prometteuses.	Acquérir des propriétés. Confirmer la présence, la position et les caractéristiques des anomalies.	Vérifier la cause des anomalies. Trouver des indices minéralisés. Acquérir d'autres propriétés selon le besoin.	Découvrir, confirmer et délimiter un premier inventaire minéral du gîte. Évaluer son potentiel économique de façon préliminaire.	Définir les limites, les contours et la distribution interne de la minéralogie et des teneurs du gîte. Planifier et préparer l'ingénierie du projet.	Établir la faisabilité technique. Établir les plans, oûdles et estimations pour le projet minier.	Établir les paramètres pour l'évaluation économique et financière. Évaluer les sources de financement.	Garantir la validité des données, hypothèses et évaluations. Décider d'entreprendre le projet ou non.	Réaliser le développement de la mine et les constructions requises en respectant le budget et l'échéancier. Préparer la mise en œuvre de la mine et de l'usine.	Réaliser la production commerciale selon le taux et les spécifications prévues. Profitabilité du projet dans une perspective de développement durable.	Restaurer le site de la mine à un état sécuritaire et visuellement acceptable pour que la qualité de l'environnement soit compatible avec l'usage futur.
Méthodes d'évaluation	Levés, recherches et synthèses géoscientifiques, métallogéniques et économiques par les gouvernements, les universités et les autres organismes de recherche.	Études et choix des métaux et minéraux. Revue et synthèse de l'information géologique et métallogénique pour diverses régions. Revue du contexte légal et politique. Déduction et intuition.	Téléodétection, photographies aériennes, géophysique aéroportée. Prospection, géologie et géochimie. Évaluation et sélection des anomalies.	Prospection et levés géoscientifiques au sol. Revue et sélection des anomalies d'intérêt.	Cartographie géologique et autres levés. Tranchées, échantillonnages et forages. Évaluation des résultats et sélection des cibles.	Découpages, tranchées, échantillonnages, forages et géophysique. Inventaire préliminaire du gîte. Caractérisation de l'environnement.	Définition par cartographie, échantillonnages, forages en surface et sous terre. Acquisition de données pour l'ingénierie du projet. Levés détaillés du site et de l'environnement.	Échantillons en vrac. Essais pilotes, ingénierie et estimation des coûts de la mine, du procédé de concentration, de l'infrastructure, de la protection de l'environnement et de la restauration du site.	Étude des marchés, des prix et des aspects financiers. Analyse des risques techniques, économiques, sociaux, politiques et environnementaux.	Révision exhaustive de toutes les données du projet. Évaluation de la rentabilité, des risques et des aspects positifs du projet.	Gestion de projet et gestion de la qualité des travaux. Plan de mise en œuvre et entraînement du personnel.	Gestion de la production en vue de l'amélioration continue de la qualité et du rendement. Exploration, mise en valeur et aménagement de nouvelles zones sur le site minier et hors d'un site minier.	Mise hors service de la mine. Restauration de l'environnement et surveillance.
Résultats visés	Base de données, cartes et modèles	Projets d'exploration	Anomalies régionales	Anomalies locales	Indices minéralisés	Évaluation économique préliminaire	← Étude de pré-faisabilité →			Gisement. Décision de mise en production	Début de l'exploitation	Profitabilité	Site restauré
Inventaire minéral	POTENTIEL MINÉRAL	→ RESSOURCES MINÉRALES					RESSOURCES MINÉRALES	→ RÉSERVES MINÉRALES			RÉSERVES Prouvées ET Probables		

Source : Modifications des coordonnées par S. Lacroix, août 2001 et par la Direction du développement de l'industrie minière, mars 2015, au Rapport annuel de SOQUEM, 1978-77, pages 4-5 et Vallée, M. 1992. Guide to the Evaluation of Gold Deposits, CIM, Special Volume, page 4.
Conception graphique : Charlotte Grenier

Figure 4 : Processus de développement minéral (MERN, 2015)

4.1.1 Valorisation et exploration

La première étape (valorisation des ressources) du processus de développement minéral consiste à la réalisation d'études géoscientifiques et métallogéniques afin de pouvoir évaluer le potentiel minéral. À ces études s'ajoute des levés géologiques, géochimiques et géophysiques sur de très grands territoires. Au Québec, cette étape est principalement planifiée, financée et entreprise par le MERN et vise à faire connaître le potentiel minéral auprès des sociétés d'exploration minière. Des entreprises privées contribuent à l'occasion à ces levés. Les levés géologiques et géochimiques requièrent d'observer directement la surface et d'accéder au terrain, alors que les levés géophysiques aéroportés nécessitent des conditions météorologiques adéquates.

La seconde étape du processus de développement minéral (exploration) peut se subdiviser en cinq principales tâches. La première tâche porte sur la planification de l'exploration (EX-1, *tableau 13*). Il faut sélectionner, à l'échelle régionale, des territoires favorables pour la présence de minéralisations. Cette sélection repose sur des données théoriques et empiriques ou sur les évaluations produites à l'étape de la valorisation des ressources. À ce stade, on ne note aucun impact environnemental ou social. Au Québec, une base de données tout à fait unique au monde permet à un explorateur de disposer de la quasi-totalité des travaux entrepris antérieurement, qu'ils soient publics ou privés. Cette base permet souvent de s'affranchir des tâches EX-3 et EX-4, puisqu'il est fréquent que l'on reprenne l'exploration d'un projet qui a été abandonné précédemment.

La seconde tâche (EX-2, *tableau 13*) comprend une reconnaissance régionale et la réalisation de différents levés sur le terrain. L'objectif d'une campagne d'exploration régionale est d'évaluer l'existence, ou non, d'un potentiel géologique et d'un patrimoine minéral associé, susceptible d'attirer des investisseurs intéressés à le développer jusqu'à une éventuelle exploitation. C'est au cours de cette phase que les permis d'exploration sont accordés par l'autorité publique aux investisseurs intéressés à prendre les risques pour développer le patrimoine minéral.

Les tâches suivantes (EX-3 et EX-4, *tableau 13*) se focalisent sur des travaux de prospections et des levés sur les anomalies et les indices. Cette phase nécessite d'installer des équipes sur le terrain. Plusieurs méthodes sont mobilisées, dont des levés géologiques complétés par des levés géophysiques ou géochimiques pour mieux déterminer la présence possible de minéralisations. Des indices peuvent ainsi être découverts, et le contexte géologique indiquera le potentiel minier du secteur. Il peut être nécessaire à cette étape de réaliser des décapages, des tranchées ou des forages afin d'observer la nature des roches et de prélever des échantillons. L'exécution de forages requiert la construction de voies d'accès temporaires aux sites. Ces activités sur le terrain et les moyens logistiques associés (véhicules tout-terrain, bateau, hélicoptère, etc.) peuvent affecter faiblement l'environnement de manière transitoire.

Enfin, la dernière tâche (EX-5, *tableau 13*) de l'exploration vise à délimiter le gîte et à évaluer son tonnage et sa teneur. Sur les meilleurs indices découverts, on tentera de déterminer : (1) le volume de minéralisation (extension en surface et en profondeur) et (2) la teneur en métaux ou en toute autre substance. Le volume sera évalué par des travaux de surface, en particulier des tranchées, et par des forages de différents types pour prélever des carottes d'échantillons minéralisés en profondeur. La teneur sera évaluée par des analyses chimiques de nombreux

échantillons, de plus en plus rapprochés, pour atteindre le niveau de définition requis pour déterminer la valeur économique du gisement. Plusieurs éléments devront être précisés pour valider la valeur économique du projet. Par exemple : Quelle est la minéralogie des minerais ? La mine sera-elle en surface ou en profondeur ? Quelle est la stabilité des terrains ?

Les travaux d'exploration avancés auront un impact sur le territoire : excavatrices pour les tranchées, foreuses, chemins d'accès, logistique associée aux équipes de travailleurs. Les entreprises pourront avoir besoin de main-d'œuvre locale. À ce stade, il n'est pas encore certain qu'une mine sera développée, et il faudra donc remettre la zone en état après les travaux.

L'importance des travaux est proportionnelle à la cible minière visée : un gisement potentiel de grand volume à basse teneur entraînera plus de travaux qu'un gisement de plus petit volume, mais à forte teneur. Chaque style de gisement possède un volume et une teneur caractéristiques (Boukachabia, 2015).

Si une minéralisation d'intérêt est découverte, il sera nécessaire de préciser les différents paramètres qui conditionnent la faisabilité d'une mine : les modes d'exploitation (souterrain ou en surface) dépendent du tonnage et de la teneur des gisements. La continuité des corps minéralisés doit être rigoureusement évaluée par sondages, puis par des ouvrages miniers pour prélever un échantillon de grand volume. Les paramètres techniques de l'exploitation et son impact environnemental doivent aussi être déterminés, et le mode de traitement choisi.

Une découverte peut ensuite évoluer vers une étude économique préliminaire. C'est la première étude technique et économique réalisée en cours d'avancement d'un projet minier. Elle doit déterminer la viabilité du projet en prenant en compte toutes les composantes (techniques, environnementales, sociétales), identifier les problèmes éventuels (et les études complémentaires nécessaires) et décrire/chiffrer les options possibles pour la suite du projet. De contenu voisin à celui de l'étude économique préliminaire, l'étude de préfaisabilité offre cependant un degré de précision supérieur. Son utilité est à la fois d'informer les actionnaires de l'avancement du projet et de servir de base, au vu des résultats, à la décision de poursuivre ou d'abandonner le projet. L'ensemble des étapes précédentes se réalisent sur une période relativement courte et on peut considérer que les conditions climatiques évolueront peu au cours de celle-ci.

L'exploration minière nécessite des investissements très risqués. Tout au long du processus de développement, le montant des dépenses va généralement en augmentant, tandis que le risque diminue progressivement (*figure 5*). Au Québec, la source des financements est double. D'une part, des fonds privés sont injectés au sein de compagnies publiques, généralement cotées sur le marché, et d'autre part, des fonds publics en provenance d'organismes de support à l'activité minière sont aussi investis dans l'exploration minérale (p. ex : SIDEX, SODEMEX et Ressources Québec).

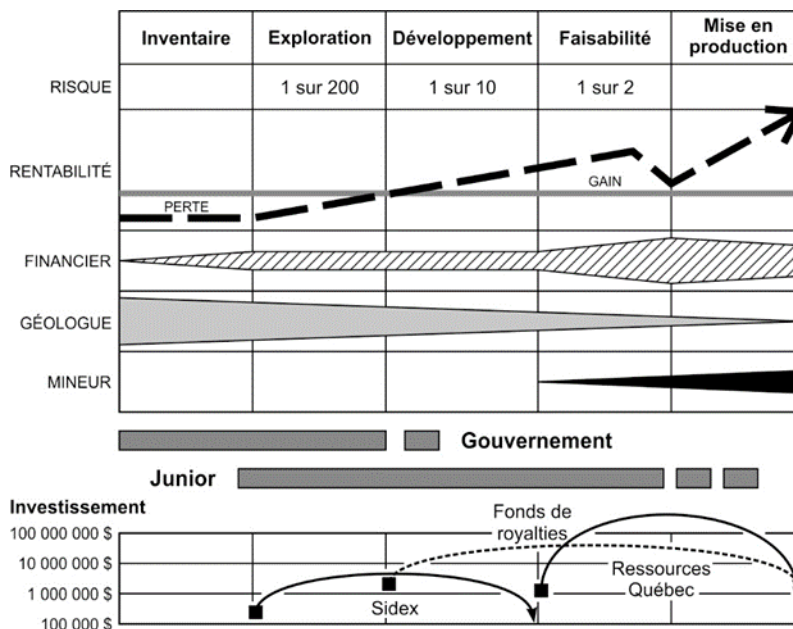


Figure 5 : Évolution d'un projet minier (Jébrak, 2015)

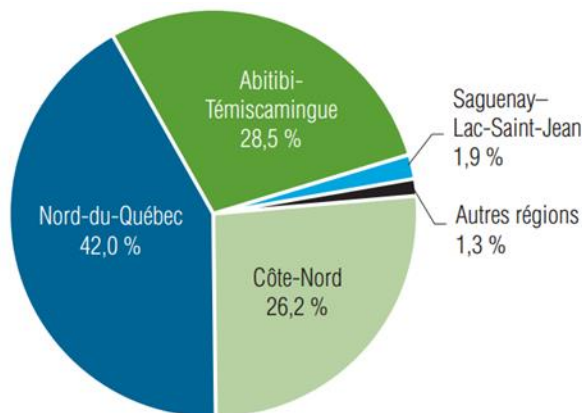
Quelques constats ressortent de cette figure. Le risque diminue, passant d'un taux de succès d'un projet positif sur 200 au démarrage à un taux de 50 % au stade de l'étude de faisabilité (Jébrak, 2015). Le potentiel de rentabilité va en augmentant; les projets menés au départ par de nombreux géologues d'exploration sont progressivement pris en main par des ingénieurs géologues et miniers.

4.1.2 Mise en valeur du gisement

Une fois le concept industriel bien développé (étude de préfaisabilité), on entre dans le champ des études économiques qui visent à déterminer quels seront le coût de la production, le prix de vente attendu, les impôts à prévoir et, donc, le bilan économique de l'exploitation. Les considérations sociales et environnementales seront essentielles à ce stade, et en particulier la prise en compte du cycle de vie complet de la mine, du début de l'exploitation à la fermeture, avec la restauration du site d'exploitation.

Ces travaux aboutissent à une étude de faisabilité, un document qui permettra d'aller chercher les capitaux nécessaires à la construction et à l'ouverture de la mine. Cette étude doit démontrer que l'exploitation d'un gisement déterminé est techniquement, économiquement et environnementalement viable ainsi que socialement acceptée. L'étude doit démontrer que les problèmes géotechniques et hydrogéologiques sont traités et que les calculs des coûts d'investissement et d'opération sont réalistes. Sur cette base, l'entreprise peut décider de monter le financement pour la mise en production.

Au Québec, en 2015, la plus grande part des activités d'exploration de mise en valeur et d'aménagement minier se situe dans le Nord-du-Québec avec 42 % et l'Abitibi-Témiscamingue ainsi que la Côte-Nord, représentant respectivement 28,5 et 26,2 % de ces investissements (figure 6).



Source : Institut de la statistique du Québec, *Relevé des dépenses d'exploration minière, de mise en valeur et d'aménagement des complexes miniers*.

Figure 6 : Répartition de l'investissement minier au Québec par région administrative en 2015

4.2 Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les activités d'exploration minière

L'exploration minière se déroulant sur de courtes périodes, quoique parfois répétées, il faut considérer les impacts que nous allons présenter ici comme résultant des différences de conditions climatiques avec celles qui prévalent actuellement. C'est-à-dire qu'une compagnie qui travaillerait dans une même zone, mais à dix ou quinze ans d'écart, ne pourrait entièrement se fier à sa première expérience pour organiser sa seconde campagne. Nous décrivons ci-après les principaux impacts anticipés des changements climatiques sur les activités d'exploration.

4.2.1 Accès et utilisation de l'eau

L'exploration consomme très peu d'eau. Cependant, au stade des forages, il est nécessaire de disposer d'une alimentation régulière. L'eau utilisée est chargée de particules fines, plus rarement d'adjuvants chimiques de forage; elle doit donc être décantée avant d'être retournée dans l'environnement. Les projections climatiques prévoient une augmentation de la précipitation moyenne pour l'ensemble des régions minières du Québec ainsi que du nombre et de l'intensité des événements extrêmes de précipitation. Les principaux impacts liés à l'accès et à l'utilisation de l'eau sont les suivants :

- L'augmentation des précipitations annuelles, des précipitations plus abondantes ou des événements de précipitation extrême peuvent nécessiter l'emploi de réservoirs de plus grandes dimensions pour les systèmes de rétention des eaux de décantation (forage) ou des systèmes de traitements des eaux usées des campements. Cela pourrait impliquer des coûts supplémentaires par rapport à la situation actuelle. Toutefois, les implications demeurent limitées du fait des faibles volumes mobilisés lors des activités d'exploration.
- En raison de l'augmentation des températures moyennes hivernales, les cycles de gel/dégel risquent d'être plus fréquents (température oscillant autour du point de congélation). Ils peuvent être responsables de verglas, qui nuit à la mécanique de la machinerie ainsi qu'à la bonne circulation de l'eau dans les conduites. Avec les changements climatiques, ces cycles

pourraient être plus fréquents, ce qui pourrait occasionner des problèmes de pompage de l'eau pour les forages.

- Les prévisions montrent que les épisodes de sécheresse pourraient devenir plus fréquents et plus longs en période estivale. Cela pourrait avoir un effet, dans certains sites, sur l'approvisionnement en eau pour les activités d'exploration.

4.2.2 Stabilité géotechnique et géomécanique

Les variations du climat peuvent entraîner diverses instabilités géotechniques et géomécaniques causées par l'augmentation des températures moyennes, la fonte du pergélisol, une zone active plus importante et un pergélisol non continu plus important³.

Au stade de l'exploration initiale, ces variations n'ont que très peu d'impacts, puisque les activités s'exercent sur une courte période. Les installations requises sont de natures temporaires et sont adaptées aux conditions de terrain qui prévalent au moment de la réalisation des activités.

Dans le cas de projets d'exploration avancés, il est nécessaire d'installer un camp de base. Ce dernier constitue souvent l'amorce du futur site de la mine. On se doit donc de prendre en compte dès ce stade les possibles fragilités des sols, augmentées par les interventions humaines. Dans les zones nordiques, les instabilités des sols causées par la fonte du pergélisol, l'augmentation de la zone active et du pergélisol non continu devront être considérées. Les zones à plus fort relief pourraient également nécessiter des précautions particulières.

4.2.3 Transport et logistique – accès au territoire – productivité

L'exploration est particulièrement concernée par l'effet des changements climatiques sur les transports et la logistique des opérations. Le calendrier des activités pourrait être modifié pour s'ajuster aux impacts des changements climatiques. Certains impacts peuvent apparaître comme positifs, d'autres comme négatifs.

Comme aspects positifs, notons que l'augmentation des températures moyennes et la réduction de la période sans gel rendra possible une plus longue période d'approvisionnement par hydravion. Elle permettra également une diminution des coûts de chauffage et de construction. De plus, l'ouverture de la voie maritime du nord favorisera le transport des matières premières. La saison de cartographie devrait aussi être allongée et l'accès facilité à certains territoires.

Cependant, l'accès à d'autres territoires sera affecté par les cycles de gel/dégel et la fonte du pergélisol. En effet, certains environnements ne sont accessibles que lorsqu'ils sont gelés : les lacs, les milieux humides et certains sols seront donc plus difficiles à explorer ou à traverser par des routes d'hiver devenues instables (affaissements et tassements de terrain). Cela peut restreindre les opérations de géophysique au sol et les forages dans ces zones normalement

³ La zone dite active du pergélisol est celle en surface, qui dégèle en été par conduction de chaleur depuis la surface. Le pergélisol non continu est caractérisé par la présence de portion de sol non gelé qui entrecoupe le pergélisol.

gelées. Puisqu'il y aura réduction des périodes de gel, il faudra à certains endroits prévoir réaliser les travaux en été plutôt qu'en hiver, ce qui augmente les impacts sur l'environnement, car le déplacement de la machinerie est plus complexe dans une telle situation. Soulignons le cas particulier de l'exploration du diamant, qui a la nécessité de procéder au prélèvement de gros échantillons à un stade assez précoce de l'exploration. On doit évaluer la teneur en diamants, toujours très faible, et le prix moyen du carat, sur la base de la taille des pierres, de leur clarté et de leur couleur. Il est donc fréquent de procéder à des échantillonnages de plusieurs dizaines de tonnes, ce qui nécessite de la machinerie lourde et des moyens de transporter les échantillons. L'exploration et la mise en valeur de gîtes de diamants pourraient donc être davantage affectées par les impacts des changements climatiques sur le transport et, ainsi, exiger la mise au point ou l'emploi de modes de transport alternatifs.

Dans le Grand-Nord, dans la fosse du Labrador et à la Baie-James, les sites miniers sont éloignés et souvent isolés. De plus, les entreprises y sont, la plupart du temps, responsables de la construction et de l'entretien du réseau routier donnant accès aux sites. Les principaux problèmes liés au transport sont en lien avec la fonte du pergélisol ou encore l'entretien attribuable aux précipitations plus abondantes. Pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue et certains projets miniers de la Côte-Nord, l'accès aux projets miniers est beaucoup plus facile en raison de la proximité du réseau de transport public ou des chemins multi-usages (i.e. chemins forestiers).

L'augmentation prévue des événements extrêmes, tant les phénomènes climatiques que les feux de forêt, compliqueront la logistique et la prévision des campagnes d'exploration. Les risques d'arrêt ou de perturbation des opérations ou de l'approvisionnement, ou les risques d'isolement des équipes sur le terrain (interruption des moyens de transport, coupures de communication ou d'énergie) occasionneront des coûts supplémentaires, non seulement s'ils surviennent, mais aussi pour la prévoyance additionnelle qu'ils nécessiteront.

4.2.4 Travailleurs et santé

Les changements climatiques (augmentation des précipitations moyennes annuelles et des températures moyennes, fonte du pergélisol) étendront plus au nord les zones où les insectes piqueurs se retrouvent en grande quantité. Certains insectes pourraient aussi investir de nouvelles zones géographiques suite aux changements climatiques. La période pendant laquelle ils sont actifs pourrait aussi s'allonger, sans compter la progression vers le nord d'insectes pouvant transmettre, par exemple, le virus du Nil occidental ou la maladie de Lyme.

4.3 Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques

Tel que décrit au chapitre 4, une enquête portant sur le niveau de risque associé aux principaux impacts anticipés des changements climatiques pour le secteur minier a été réalisée auprès d'experts du secteur. En ce qui concerne spécifiquement les activités d'exploration minière, sept experts de ce domaine ont participé à cette enquête.

Les questionnaires qui ont été soumis aux participants les ont amenés à se prononcer, d’une part, sur la probabilité d’occurrence des impacts des changements climatiques et, d’autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci. L’analyse de leurs réponses a donc permis d’évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux principaux impacts des changements climatiques en se basant sur la matrice présentée précédemment (*figure 3*).

Un comité d’experts a par la suite évalué le niveau de vulnérabilité du secteur minier par rapport à ces principaux impacts. C’est-à-dire qu’ils ont évalué la propension du secteur minier à être affecté de manière négative par les impacts des changements climatiques ainsi que sa capacité à réagir ou à s’adapter.

Les résultats de l’analyse qualitative des principaux risques associés aux impacts des changements climatiques et la vulnérabilité du secteur minier face à ceux-ci sont présentés dans ce qui suit. Concernant la matrice de risques présentée au chapitre 4 (*figure 3*), rappelons que les zones en vert représentent un risque faible, en jaune, un risque modéré, en orange, un risque élevé et en rouge, un risque très élevé.

4.3.1 Difficulté d’accès au territoire en raison de la diminution de la période de gel

Mise en contexte

Les variations de température et le raccourcissement de la durée de l’hiver sont parmi les impacts anticipés les plus notables pour l’exploration minière. La diminution du nombre de jours de gel aura pour effet de rendre plus complexe l’accès au territoire, particulièrement sur les lacs et les zones humides (réduction de la durée de vie des routes de glace, glace plus mince, etc.). Cela pourrait restreindre les opérations de géophysique au sol et les forages qui sont réalisés normalement sur des sols et des lacs gelés.

Niveau de risque

En ce qui concerne le niveau de risque associé aux difficultés d’accès au territoire attribuables à la diminution de la période de gel, les réponses des participants à l’enquête placent le niveau de risque à **élevé** pour les régions de l’Abitibi, de Matagami-Chibougamau, de la Fosse du Labrador et du Grand-Nord. Toutefois, les résultats de l’enquête n’ont pas permis d’en arriver à un consensus pour les régions de la Baie-James et de la Côte-Nord, car les réponses des participants à l’enquête varient beaucoup quant à la probabilité d’occurrence qui varie de nul à probable. Cela ne nous permet donc pas d’établir le niveau de risque pour ces deux régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		A-MC-FL-GN		
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie-James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- **Probable** : Plusieurs sites auront des problèmes temporaires d'accessibilité.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Perturbation du calendrier de réalisation des travaux et/ou coûts supplémentaires.

Vulnérabilité

Étant donné que la diminution de la période de gel se fera de façon progressive, dans la perspective d'un réchauffement progressif, les compagnies d'exploration seront en mesure de s'adapter assez facilement au fil des ans. C'est pourquoi la vulnérabilité du secteur est jugée **faible** par rapport à cet impact.

4.3.2 Perturbation du programme d'exploration en raison des changements au régime des précipitations

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes, mais surtout des événements extrêmes de précipitations, compliquera la logistique et la prévision des campagnes d'exploration. Cela pourrait générer des pressions additionnelles sur la capacité à réaliser les programmes d'exploration. Citons, par exemple, l'entretien des chemins d'accès qui serait plus difficile.

Niveau de risque

Le consensus place le niveau de risque à **faible** pour la région de l'Abitibi et à **élevé** pour les autres régions. Il n'y a pas eu de consensus sur la probabilité d'occurrence pour la région de la Côte-Nord. Il n'a donc pas été possible d'établir le niveau de risque pour cette région.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		MC-BJ-FL-GN		
	Peu Probable	A			
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie-James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- **Peu probable** : La majorité des programmes ne seraient pas affectés.
- **Probable** : La majorité des programmes seraient affectés.

Gravité des conséquences

- **Faible** : Ajustements mineurs aux programmes d'exploration.
- **Modérée** : Modifications significatives aux programmes d'exploration.

Vulnérabilité

Comme mentionné précédemment, les activités d'exploitation sont de courte durée, ce qui fait en sorte que les entreprises seront à même de s'adapter au fil des ans et des campagnes d'exploration. De plus, des activités d'exploration se font déjà partout dans le monde, sous toutes les conditions climatiques, ce qui implique que les entreprises sont à même de s'adapter aux changements au régime de précipitation. Pour ces raisons, la vulnérabilité du secteur minier à cet impact est jugée **faible**.

4.3.3 Perte d'accessibilité temporaire au territoire en raison de l'augmentation des événements extrêmes

Mise en contexte

Les événements extrêmes (orages, inondations, etc.) pourraient aller jusqu'à entraîner la fermeture temporaire de routes. Les risques d'arrêt ou de perturbation des opérations ou de l'approvisionnement, ou encore les risques d'isolement des équipes sur le terrain occasionneraient des coûts supplémentaires, non seulement s'ils surviennent, mais aussi pour la prévoyance additionnelle qu'ils nécessiteraient.

Niveau de risque

Selon les réponses des experts interrogés, le niveau de risque varie entre **modéré** et **élevé**, selon les régions. À noter que le niveau de consensus des répondants est **faible** pour toutes les régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable		A-MC-BJ-CN	FL-GN	
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie-James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

Probité d'occurrence

- **Peu probable** : La majorité des sites demeureront accessibles.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Perturbations des opérations; arrêt de certains travaux sur de courtes périodes; légère augmentation des coûts.
- **Élevée** : Importantes perturbations des opérations; arrêt temporaire des travaux; augmentation significative des coûts.

Vulnérabilité

Bien que des pertes d'accessibilité aux sites d'exploration puissent être plus fréquentes dans le futur, il n'en demeure pas moins que ce sont des situations temporaires et ponctuelles. De plus, les entreprises composent déjà avec cette réalité, même si elle est plutôt rare. Elles seront donc

à même de trouver facilement des solutions et de s'adapter. Pour ces raisons, la vulnérabilité de secteur à cet impact est jugée **faible**.

4.3.4 Augmentation des coûts en raison des nouvelles conditions climatiques

Mise en contexte

Comme présenté jusqu'à maintenant, les changements climatiques pourraient avoir différents impacts qui augmenteraient les coûts et les investissements nécessaires à la réalisation des travaux d'exploration.

Par exemple, les coûts reliés au transport pourraient être affectés par l'entretien supplémentaire des chemins d'accès, alors que le raccourcissement des périodes de gel pourrait mener à une plus grande utilisation du transport aérien. Des événements extrêmes comme des feux de forêt ou des pluies abondantes pourraient mener à l'isolation des sites et des travailleurs, à l'arrêt des travaux, etc.

L'effet global des changements climatiques pourrait donc éventuellement résulter en une augmentation des coûts pour les entreprises.

Niveau de risque

Pour la région de l'Abitibi, le risque est jugé **modéré**, alors que pour la région Matagami-Chibougamau, il est jugé **élevé**. Pour les autres régions, il n'y a pas eu de consensus chez les participants sur la probabilité d'occurrence, mais le degré de gravité des conséquences est évalué à **modéré**.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable	A	MC		
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- *Probable* : La majorité des projets subiront une augmentation des coûts.

Gravité des conséquences

- *Faible* : Augmentation mineure des coûts
- *Modérée* : Investissements requis pour adapter les installations.

Vulnérabilité

Bien qu'il soit possible que les changements climatiques se traduisent en une augmentation des coûts pour les entreprises, les impacts se feront sentir de façon progressive, ce qui leur permettra de s'adapter et d'ajuster leur gestion. De plus, les impacts des changements climatiques quant aux coûts sont minimes par rapport aux autres facteurs qui les influencent. C'est pourquoi la

vulnérabilité du secteur minier est considéré **faible** face à une possible augmentation des coûts en raison des conditions climatiques.

4.3.5 Instabilités des infrastructures en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

Dans la région du Grand-Nord et au nord de la Fosse du Labrador, l'augmentation des températures moyennes provoquera, à certains endroits, la fonte d'une partie du pergélisol et l'augmentation des zones actives. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages. L'augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de tassements de terrain qui pourraient entraîner des dommages aux infrastructures.

Niveau de risque

Étant donné que cet impact affecte directement la présence d'infrastructures sur le pergélisol, il s'adresse donc spécifiquement aux caractéristiques locales des différents sites. Il est alors impossible d'en généraliser la probabilité d'occurrence à l'échelle d'une région. Les participants ont donc été interrogés uniquement sur la gravité des conséquences, ce qui ne permet pas d'évaluer le niveau de risque associé à cet impact. Néanmoins, la gravité des conséquences est évaluée à *modéré* pour la Fosse du Labrador. Pour le Grand-Nord, il n'y a pas eu de consensus, car le niveau de gravité des conséquences varie entre *modéré* et *élevé*.

Gravité des conséquences

- *Modérée* : Investissements requis pour maintenir la stabilité des infrastructures.
- *Élevée* : Occasionne des coûts supplémentaires et des difficultés logistiques élevées ajoutant des contraintes pour trouver des sites propices à la construction.

Vulnérabilité

Ces impacts étant spécifiques à chaque site minier, il s'avère difficile de porter un jugement sur le niveau de vulnérabilité. Néanmoins, les entreprises qui œuvrent dans le domaine jugent être en mesure de s'adapter sans trop de difficultés. Dans son ensemble, la vulnérabilité du secteur est jugée **faible** pour cet impact.

4.3.6 Difficulté d'approvisionnement régulier en eau pendant l'été en raison de l'augmentation des périodes de sécheresse

Mise en contexte

L'exploration consomme peu d'eau; cependant, au stade des forages, il est nécessaire de disposer d'une alimentation régulière. L'augmentation des températures moyennes ainsi que l'allongement des périodes sans précipitation pour la saison estivale pourraient générer des périodes de sécheresse, rendant l'approvisionnement en eau plus difficile.

Niveau de risque

Encore une fois, comme il est impossible d'évaluer la probabilité d'occurrence de cet impact à l'échelle d'une région, les participants ont été interrogés uniquement sur la gravité des conséquences. En effet, l'approvisionnement en eau est aussi spécifique aux différents sites d'exploration et il est impossible de généraliser pour l'ensemble d'une région. Néanmoins, pour toutes les régions, les participants ont jugé le niveau des conséquences à *modéré*.

Gravité des conséquences

- *Modérée* : Perturbations des opérations, arrêt de certains travaux sur de courtes périodes; légère augmentation des coûts.

Vulnérabilité

Encore une fois, cet impact est très spécifique à chaque site d'exploration. Il s'avère donc difficile de porter un jugement sur le niveau de vulnérabilité du secteur minier québécois. Néanmoins, les entreprises qui œuvrent dans le domaine devraient être en mesure de s'adapter sans trop de difficultés, car les changements climatiques se feront de façon graduelle. Dans son ensemble, la vulnérabilité du secteur est jugée **faible** pour cet impact.

4.3.7 Perturbation des opérations attribuables aux feux de forêt

Mise en contexte

En raison de l'accroissement des températures moyennes et maximales ainsi que de l'augmentation des périodes sans précipitation pendant l'été, on anticipe une hausse de la fréquence des feux de forêt en milieu boréal.

Niveau de risque

Encore une fois, comme il est impossible d'évaluer la probabilité d'occurrence des feux de forêt, les participants ont été interrogés uniquement sur la gravité des conséquences. Pour l'ensemble des régions, les participants ont jugé le niveau des conséquences à *modéré*.

Gravité des conséquences

- *Modérée* : Perturbations des opérations; arrêt de certains travaux sur de courtes périodes; légère augmentation des coûts.

Vulnérabilité

Bien que les feux de forêt puissent être plus fréquents dans le futur, il n'en demeure pas moins que ce sont des situations temporaires et ponctuelles. De plus, les entreprises composent déjà avec cette réalité, même si elle est plutôt rare. Pour ces raisons, la vulnérabilité du secteur est jugée **faible** à cet impact.

4.4 Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques

Le *tableau 14* résume le niveau de vulnérabilité aux principaux impacts liés aux changements climatiques pour l'exploration minière. Les experts consultés s'entendent donc pour dire que la vulnérabilité du secteur de l'exploration minière est faible sur tous les plans. Le secteur est faiblement vulnérable à tous les impacts identifiés, peu importe leur niveau de risque, c'est-à-dire qu'il saura résister aux événements non souhaités, qu'il pourra récupérer un fonctionnement normal suite aux conséquences d'un impact et qu'il a la capacité de réagir ou de s'adapter aux changements climatiques. Il faut considérer que toutes les conditions climatiques envisagées ont déjà été vécues, quelque part sur la planète, pour l'une ou l'autre des entreprises œuvrant dans le domaine de l'exploration. Les experts s'entendent donc sur le fait qu'elles vont continuer à s'adapter, comme elles l'ont toujours fait.

Tableau 14 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à l'exploration minière

Impacts des changements climatiques	Niveau de risque		Vulnérabilité
Difficulté d'accès au territoire en raison de la diminution de la période de gel	Élevé		Faible
Perturbation du programme d'exploration en raison des changements au régime de précipitations	Faible (A)	Élevé (MC-BJ-FL-GN)	Faible
Perte d'accessibilité temporaire au territoire en raison de l'augmentation des événements extrêmes	Modéré (A-MC-BJ-CN)	Élevé (FL-GN)	Faible
Augmentation des coûts en raison des nouvelles conditions climatiques	Modéré (A)	Élevé (MC)	Faible
Instabilités des infrastructures en raison de la fonte du pergélisol	S/O	S/O	Faible
Difficulté d'approvisionnement régulier en eau pendant l'été en raison de l'augmentation des périodes de sécheresse	S/O	S/O	Faible
Perturbation des opérations attribuable aux feux de forêt	S/O	S/O	Faible

A : Abitibi
 BJ : Baie-James

CN : Côte-Nord
 FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord
 MC : Matagami-Chibougamau

4.5 Conclusion et recommandations

De manière générale, les vulnérabilités liées aux changements climatiques pour les activités d'exploration minière sont limitées. Ce constat part du fait que l'exploration se déroule sur une courte période et que les interventions sur le territoire sont peu intensives. De plus, bien que certains changements climatiques puissent être importants, ils se feront sentir de façon progressive au fil des ans. Les entreprises d'exploration seront donc en mesure de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques année après année. Il est également improbable qu'à moyen et long termes l'exploration se fasse selon les pratiques et les technologies actuelles.

Même si l'exploration ne semble pas devoir faire face à un défi d'adaptation face aux impacts des changements climatiques, une piste de solution et quelques recommandations sont suggérées dans ce qui suit.

Piste de solution n° 1 : Maintenir les conditions favorables à l'exploration minérale, particulièrement dans le contexte des changements climatiques.

Pour que l'exploration demeure performante au Québec, elle doit disposer d'un environnement compétitif quant aux moyens dont elle dispose, tant aux niveaux économique, technologique et d'accès au territoire. L'accès au financement pour les sociétés juniors d'exploration (à travers qui se réalisent la majorité des travaux d'exploration au Québec) de même que la capacité d'accès au territoire sont considérés par les experts consultés comme les principales vulnérabilités de l'exploration minière, et ce, sans égard aux changements climatiques.

L'accès au territoire est donc crucial pour l'exploration minière. Au-delà des impacts directs des changements climatiques sur les activités d'exploration minière, les modifications qui pourraient être apportées au cadre réglementaire, en réaction ou en prévision des changements climatiques, sont à même d'affecter l'exploration et la couverture du territoire. En effet, le législateur doit s'assurer que le cadre réglementaire soit adapté aux réalités des activités d'exploration minière afin de concilier la protection des milieux naturels et les impératifs d'accès au territoire. D'ailleurs, les experts consultés ont souligné qu'ils craignent que le contexte des changements climatiques soit à l'origine de nouvelles mesures visant à protéger davantage le territoire, et que de telles mesures aient comme conséquences indirects de limiter davantage l'accès au territoire pour les activités d'exploration.

Dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques, il sera important pour le secteur minier que les actions du gouvernement considèrent l'aspect fondamental que représente l'accès au territoire.

Recommandation

- **Dans le contexte des changements climatiques, s'assurer que la protection du territoire n'empêche pas l'accès pour l'exploration minière.**

Piste de solution n° 2 : Maintenir l'appui à la recherche pour le développement ou l'adaptation des technologies d'exploration minérale au contexte des changements climatiques.

Les besoins de développement de nouvelles méthodes d'investigation performantes demeurent une priorité pour le secteur de l'exploration, et ce, indépendamment du contexte des changements climatiques. Dans l'esprit de la recommandation précédente, la recherche favorisant le développement de méthodes réduisant les perturbations des territoires vulnérables serait souhaitable. De telles méthodes permettraient de s'adapter plus facilement aux changements climatiques, mais aussi d'occasionner moins d'impacts environnementaux et sociaux ainsi que d'accéder aux ressources. De telles technologies seraient également exportables par l'industrie québécoise.

5. Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour l'exploitation minière

Afin d'être en mesure de comprendre en quoi les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur les opérations des mines en exploitation, il apparaît nécessaire de présenter quelques notions de base à ce sujet. La section 6.1 présente donc les types d'exploitation ainsi que les principales infrastructures liées à la gestion des résidus miniers et des eaux minières. La section 6.2 explique en quoi les changements climatiques pourraient affecter certaines facettes des opérations d'exploitation, alors que la section 6.3 présente l'analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques. Finalement, la section 6.5 propose quelques pistes de solutions et recommandations pour diminuer la vulnérabilité du secteur minier face aux changements climatiques.

5.1 Généralité sur l'exploitation minière

Par définition, une mine est une anomalie géologique, c'est-à-dire une concentration suffisamment importante de minéraux pour que leur extraction soit rentable. Une fois un gisement découvert, il est nécessaire de déterminer la possibilité d'en faire une exploitation minière d'un point de vue technique et économique.

Les études de faisabilité permettent de déterminer le type d'exploitation minière (souterraine ou à ciel ouvert), la méthode de minage qui sera privilégiée ainsi que les méthodes de traitement du minerai qui permettront une extraction économiquement rentable. Il est également nécessaire de planifier, dès cette phase, le mode de restauration du site qui devra être mis en place à la fin de la vie utile de la mine.

La configuration du site minier est aussi planifiée lors de ces études. Cela permet le choix de l'emplacement de différentes infrastructures telles que le chevalement de la mine, l'usine de traitement du minerai, les bâtiments de service, le parc à résidus ainsi que les différents bassins et structures de confinement. Ce travail est fait en tenant compte des caractéristiques naturelles du site ainsi que des besoins de l'exploitation minière, tout en tentant de minimiser les impacts environnementaux.

La mise en production d'un gisement minier requiert aussi l'obtention de nombreux permis émis par le gouvernement (p. ex. : certificat d'autorisation [CA] et bail minier). Ce n'est donc qu'après les phases d'exploration, de la recherche de financement, de la production d'études de faisabilité et de l'obtention des permis nécessaires que le projet minier se concrétise. Si toutes les conditions nécessaires sont remplies, débute alors la période de construction de la mine.

5.1.1 Types d'exploitations minières

Un gisement peut être exploité soit à ciel ouvert, soit de manière souterraine. Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend principalement de la profondeur du gisement. Si celui-ci affleure à la surface, le gisement sera exploité à ciel ouvert. Par contre, s'il est clairement en profondeur, l'exploitation de la mine se fera de façon souterraine. Pour des gisements qui se retrouvent dans une zone mitoyenne entre la surface et une zone plus profonde, le choix de la

méthode dépend alors de paramètres tels que la qualité du roc ainsi que de la possibilité d'extension en profondeur du gisement. De nombreuses mines ont débuté leur exploitation par une exploitation à ciel ouvert pour ensuite se poursuivre de manière souterraine.

Les mines à ciel ouvert ont généralement des coûts de production moins élevés que les mines souterraines, mais elles supposent également un impact sur le paysage plus important.

5.1.1.1 Mines à ciel ouvert

L'exploitation à ciel ouvert d'un gisement se fait via la construction d'une fosse, dont les dimensions sont principalement dictées par la forme du gisement exploité. Le travail débute par le décapage du mort-terrain, qui sera entreposé pour la restauration finale du site⁴, et se poursuit par l'excavation graduelle des bancs de la fosse. Des étapes séquentielles de forage, de dynamitage et de déblaiement seront alors nécessaires. En cours de production, il est aussi nécessaire d'assécher la fosse en effectuant le pompage de l'eau de mine vers des bassins de rétention, appelés fréquemment bassin d'eaux de mine.

Les mines à ciel ouvert opèrent généralement à des tonnages de minerai plus élevés que l'exploitation souterraine, soit typiquement de l'ordre de 10 000 à 70 000 tonnes par jour. Le minerai extrait de la mine est acheminé directement à l'usine de traitement, mais il arrive qu'une certaine quantité soit aussi entreposée en surface, dans une halde à minerai. Une quantité variable, mais généralement importante, de matériel stérile est également extraite de la mine; typiquement, on retrouve des rapports stériles/minerai de 1:1 à 6:1. Ce matériel est alors entreposé dans une halde à stériles, généralement en surface. Différents bâtiments (administratifs, de service, etc.) sont également construits sur le site, afin de supporter l'opération minière, en plus des bassins d'eaux de mine.

De par sa nature, l'exploitation à ciel ouvert nécessite l'occupation d'un large territoire, qui s'étendra avec l'avancement de l'exploitation de la mine. Au quotidien, les principales problématiques environnementales sont les poussières, le bruit et les vibrations.

⁴ Guide de préparation du plan de restauration des sites miniers au Québec :
<https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2007-10/restauration.asp>

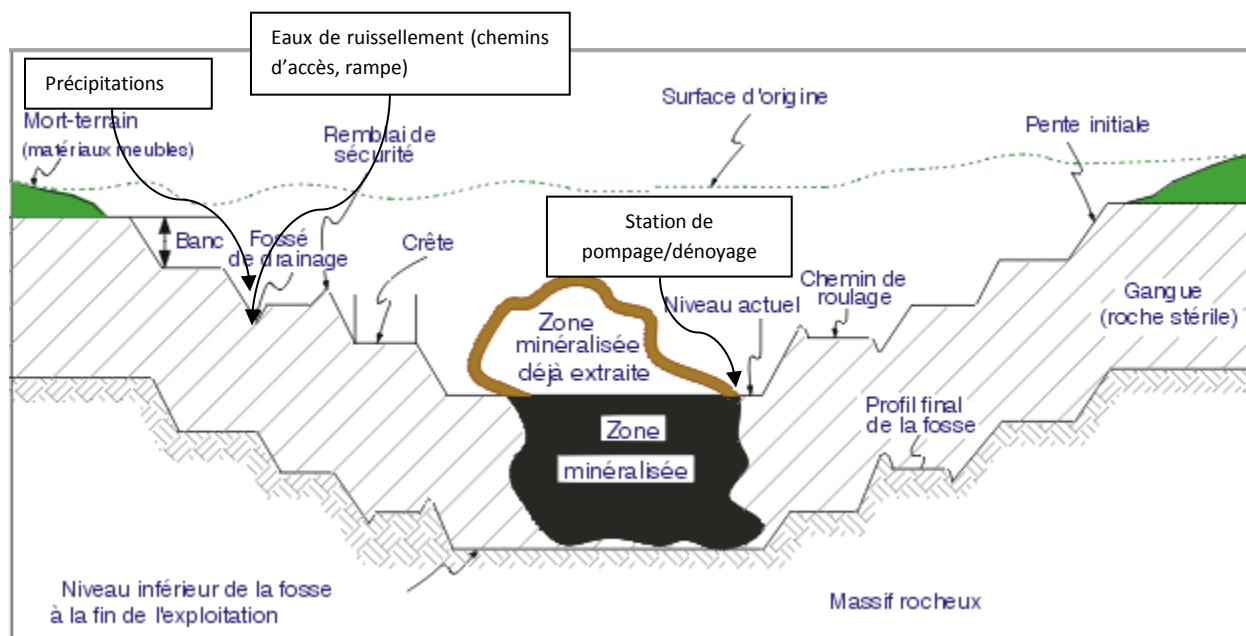


Figure 7 : Vue en section schématisée d'une mine à ciel ouvert (adaptée d'Aubertin *et al.*, 2002)

5.1.1.2 Mines souterraines

La séquence usuelle de production d'une mine souterraine comprend le développement des infrastructures souterraines, l'ouverture des galeries au minerai, l'abattage et le soutirage des chantiers et, dans certains cas, le remblayage des ouvertures à la fin de leur utilisation. En cours d'opération, il est essentiel de maintenir une ventilation adéquate à l'intérieur de la mine et également de s'assurer de l'intégrité des parois rocheuses. De plus, il est souvent nécessaire d'effectuer en continu le dénoyage des ouvertures souterraines. En effet, au Québec, la nappe phréatique est élevée et généralement en recharge, ce qui tend à combler les ouvertures souterraines.

Les mines souterraines opèrent généralement à des tonnages moins élevés que les mines à ciel ouvert. Typiquement, le taux d'extraction du minerai varie en moyenne entre 300 et 10 000 tonnes par jour. Le minerai qui est hissé de la mine est généralement acheminé directement à l'usine, si celle-ci est présente sur le site. Des haldes à minerai sont aussi construites sur le site pour permettre l'entreposage temporaire de minerai lorsque nécessaire. Une certaine quantité de stérile est aussi générée par l'exploitation minière souterraine. Ce stérile peut, dans certains cas, être recyclé sous terre sous forme de remblai rocheux, ce qui diminue d'autant la quantité à entreposer en surface dans des haldes à stériles.

Les infrastructures présentes à la surface d'une mine souterraine (*figure 8*) sont le chevalement, les cheminées de ventilation et à minerai (souvent appelées par le terme anglophone *raise*), parfois une sortie de rampe, des bassins d'eaux de mine ainsi que les haldes à minerai et à stériles. On compte aussi évidemment divers bâtiments administratifs et de service. Parfois, par souci d'efficacité, certaines infrastructures sont construites directement sous terre.

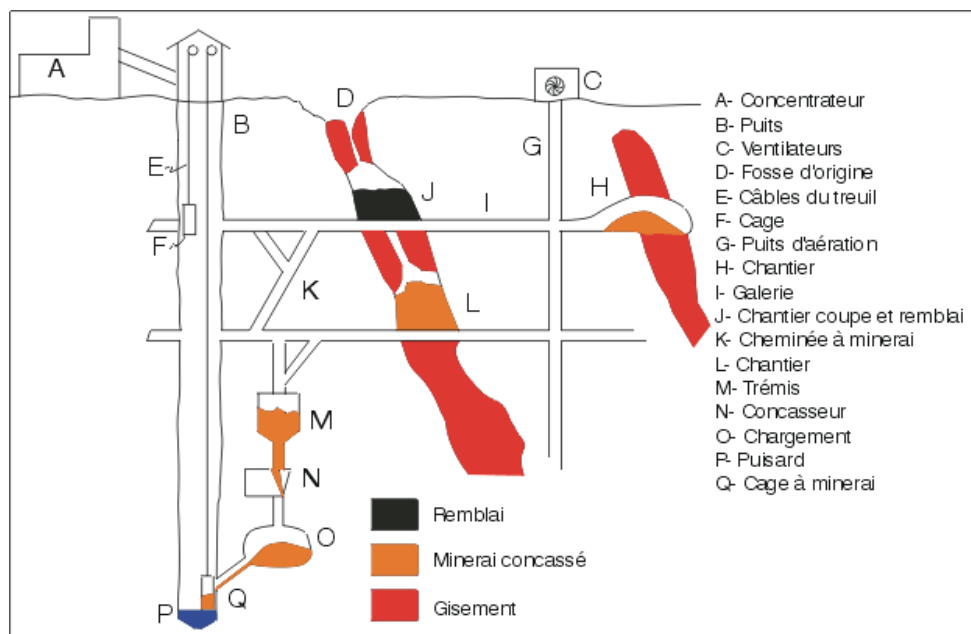


Figure 8 : Représentation schématisée d'une mine souterraine (Aubertin *et al.*, 2002; adaptée de Marshall, 1962)

5.1.2 Traitement du minerai

Généralement, les usines de traitement de minerai sont jointes au site de production minier. Il peut arriver, toutefois, qu'on utilise des infrastructures de traitement déjà existantes et que celles-ci soient éloignées du site de la mine. Le cas échéant, il faut organiser une logistique de transport entre les opérations minières et celles de traitement, soit par camion, par train ou même par bateau. Évidemment, la capacité de l'usine de traitement du minerai est directement proportionnelle à la production minière. Sinon, la mise en place de haldes à minerai est nécessaire pour faire l'entreposage temporaire de l'excédent de production minière. Une halde est un empilement de matériaux en vrac généralement déposés par camions.

Un concassage primaire est souvent effectué sur le site de la mine, et le reste du processus de fragmentation de la roche se fait à l'usine de traitement. Après avoir broyé la roche, celle-ci est soumise à diverses étapes de séparation visant à extraire les particules économiques de la portion stérile. On parle ici de différentes méthodes : les méthodes physiques qui utilisent les différences de propriétés entre les minéraux à séparer (p. ex. : les différences de densité ou de magnétisme); les méthodes physico-chimiques comme la flottation, une méthode de séparation des solides qui utilise les différences de propriétés physico-chimiques des interfaces entre les solides, une solution aqueuse et un gaz; des méthodes chimiques, telle la cyanuration pour l'extraction de l'or par exemple, un procédé qui consiste à d'abord effectuer la dissolution de l'or par une solution de cyanure et, ensuite, à récupérer l'or contenu dans la solution-mère. Ces dernières méthodes nécessitent l'addition de réactifs chimiques, d'une toxicité variable (Aubertin *et al.*, 2002). De plus, comme ces divers processus impliquent généralement une grande quantité d'eau et que celle-ci devra être traitée avant d'être rejetée dans l'environnement, il est

nécessaire que les opérations minières recyclent au maximum l'eau servant au procédé d'extraction du minerai.

La portion non-économique du minerai (le résidu) est par la suite dirigé vers des sites de confinement. Ces derniers, appelés parcs à résidus, sont destinés à recevoir les résidus des usines de traitement du minerai. Les résidus y sont acheminés sous forme de pulpe plus ou moins épaisse par des pipelines.

Plusieurs mines souterraines retournent une partie importante des résidus qu'elles génèrent sous forme d'un remblai souterrain (cette proportion peut aller jusqu'à 50 %; Belem et Benzaazoua, 2007). Ce remblai est utilisé pour remplir les cavités créées par l'exploitation de la mine. Le résidu non utilisé pour le remblayage est, quant à lui, acheminé vers le parc à résidus, où il se combinera aux eaux de ruissellement et aux eaux de mine qui y sont aussi dirigées. Certaines opérations épaississent ou assèchent les résidus avant leur dépôt final au parc à résidus (Bussière, 2007), ce qui contribue à minimiser le volume d'eau à gérer et aussi à faciliter son recyclage.

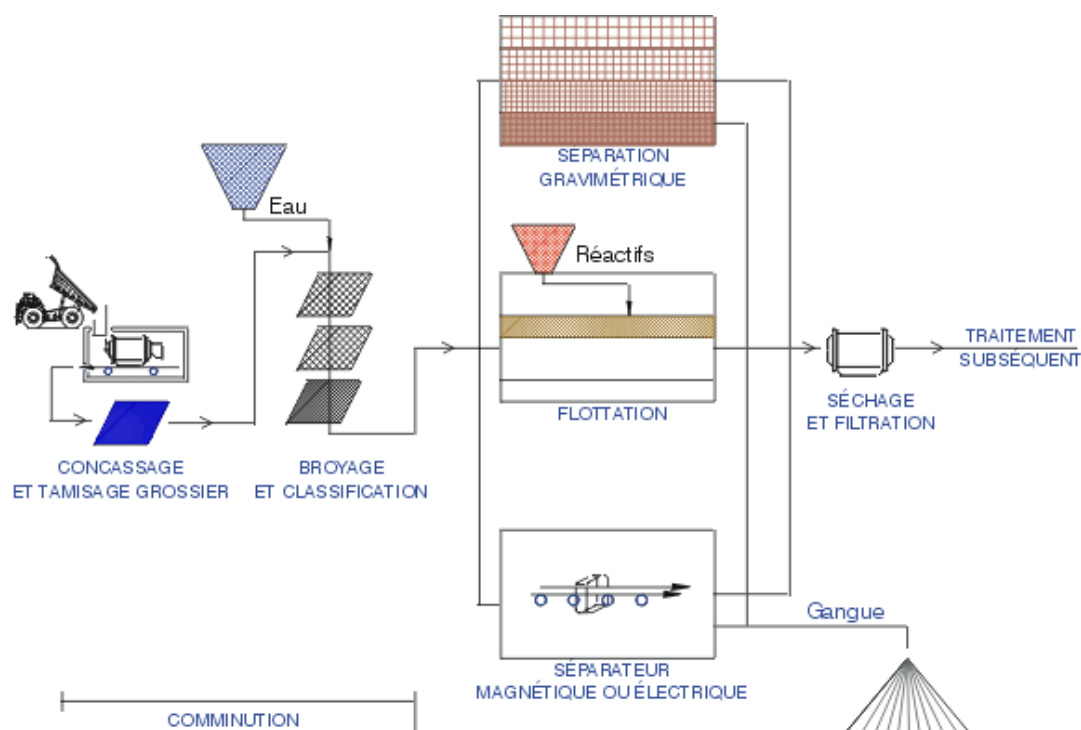


Figure 9 : Schématisation du processus de mise en valeur avec le traitement minéralurgique (Aubertin *et al.*, 2002)

5.1.3 Aires d'accumulation des résidus miniers et bassins de rétention

Les résidus miniers résultant de l'exploitation minière sont généralement entreposés à proximité de la mine, dans des zones d'accumulation pouvant s'étendre sur plusieurs dizaines d'hectares (Aubertin *et al.*, 2002a; Bussière *et al.*, 2005; Bussière, 2007). En fonction de leur texture, les

rejets miniers sont stockés à la surface sous forme de haldes à stériles ou au sein de parcs à résidus miniers. Ces derniers désignent plus spécifiquement des ouvrages permettant d'entreposer des solides ou des liquides potentiellement contaminés.

Les parcs à résidus sont conçus, construits et exploités pour stocker de façon sécuritaire les résidus produits durant l'exploitation d'une mine, afin de protéger l'environnement contre la dispersion de ces résidus ou d'eau contaminée. Ils sont généralement formés en construisant une ou plusieurs digues (selon la topographie des lieux) pour fermer une vallée naturelle ou pour ceinturer un terrain. Un parc à résidus miniers typique peut être constitué de différents éléments incluant : des digues étanches et/ou perméables, des éléments d'imperméabilisation de l'aire d'accumulation, des systèmes de contrôle des eaux contaminées, des déversoirs et évacuateurs de crue et des fossés de contrôle des eaux. Les phases de vie d'un parc à résidus miniers sont définies selon les quatre principales étapes que représentent la conception, la construction, l'exploitation et la fermeture. L'Association canadienne des barrages (ACB, 2014) subdivise la fermeture en trois parties, soit la transition, l'entretien actif et l'entretien passif (*figure 10*). Les principaux facteurs à considérer dans la conception, la construction, l'exploitation et la fermeture d'un parc à résidus sont discutés aux chapitres 6 et 7, en mettant l'accent sur les risques liés aux changements climatiques. Il est à noter que pendant l'exploitation d'une mine, les parcs à résidus font également partie du système de gestion de l'eau sur le site minier, notamment pour le recyclage de l'eau de procédé, pour la gestion des effluents de la mine et pour le détournement des eaux propres (non affectées par l'exploitation minière). Plus d'informations sur la conception des parcs à résidus miniers et leur opération peuvent être trouvées dans Vick (1990), Aubertin *et al.* (2002) et Blight (2010).

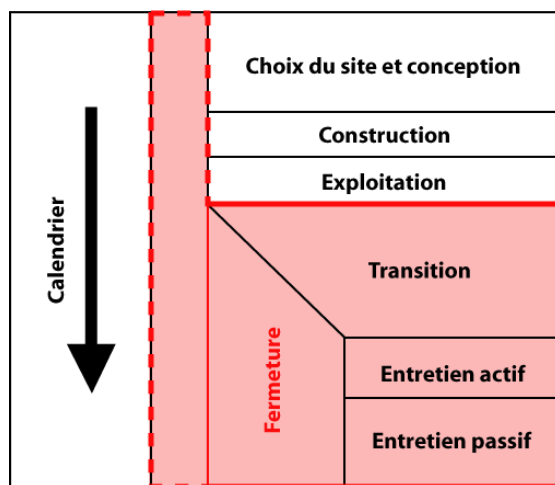


Figure 10 : Phases de vie d'un parc à résidus miniers (ACB, 2014)

Puisque la durée de vie d'une usine de traitement du minerai peut être plus grande que celle de l'exploitation d'une mine, le parc à résidus peut subir, au cours de sa vie utile, des modifications de sa capacité, et ce, peu importe le mode de construction choisi au départ. Le rehaussement des digues ou la construction de nouvelles cellules sont autant d'étapes nécessaires lors de l'évolution d'un parc à résidus. Il est essentiel, à toutes les étapes de la construction, de tenir

compte du bilan hydrique du secteur et de planifier correctement en fonction d'une gestion globale, mais aussi périodique, des événements climatiques (p. ex. : fonte des neiges au printemps ou périodicité d'événements extrêmes).

Comme le but d'un parc à résidus est de contenir un maximum de volume de résidus solides, l'excédent d'eau est déchargé dans un ou des bassins de rétention supplémentaires. Ces structures de confinement sont appelées bassins de sédimentation ou bassins de polissage. Ils servent de zone tampon dans le processus de traitement de l'eau usée, avant son relâchement dans l'environnement. Ces bassins suivent généralement la même évolution dynamique de construction que le parc à résidus.

5.1.4 Gestion de l'eau

Le principe de base pour la gestion des eaux sur un site minier est d'utiliser des conduits (fossés collecteurs, tuyaux, etc.), des pompes et la gravité afin de récupérer et d'acheminer l'eau vers des bassins d'accumulation. L'eau peut également être renvoyée vers les opérations minières, où elle sera réutilisée ou traitée.

Chaque site est un cas unique et varie en fonction de la topographie des lieux, du type de traitement de minerai utilisé et des caractéristiques physicochimiques des eaux. On retrouve généralement les éléments suivants :

- Le parc à résidus qui contient la pulpe (mélange de solides et liquide);
- Un ou des fossés collecteurs autour des bassins et des différentes haldes;
- Des canaux de déviation;
- Des bassins d'accumulation où l'eau est stockée avant son traitement ou son transfert;
- Des bassins de sédimentation ou de polissage, où l'eau réside avant son renvoi dans l'environnement.

Les caractéristiques des différentes eaux usées varient et leur traitement différera selon le cas.

L'eau de procédé est celle que l'on retrouve dans la pulpe de résidu. Cette eau peut être à différents pH, de très acide à basique, ou contenir divers réactifs (p. ex. : composés de cyanures, moussants, collecteurs, déprimants, activants, flocculant, etc.), des métaux dissous, des thiosels ou polythionates ou encore des matières en suspension. Elle est généralement soumise à un traitement partiel permettant sa réutilisation comme eau de procédé (utilisée dans le traitement du minerai).

Les eaux de pompage de l'exploitation minière proviennent principalement de l'infiltration des eaux de surface, de l'eau souterraine, de la machinerie (forage) et du remblayage hydraulique. Elles peuvent contenir du nitrate d'ammonium, des lubrifiants, des résidus de cyanures ou des produits chimiques de flottation (avec remblai hydraulique) ainsi que des matières en suspension. Tout comme l'eau de procédé, ces eaux sont généralement soumises à un traitement partiel permettant leur réutilisation (Aubertin *et al.*, 2002).

Finalement, les eaux d'infiltration ou de ruissellement, de précipitation ou encore de pompage sont généralement neutres. Ces eaux ne sont pas contaminées lors de leur entrée dans le processus de collecte du site minier. Par contre, elles peuvent le devenir en présence de contaminants hydriques à la surface (p. ex. : par les matières en suspension). Dans tous les cas, les eaux présentes à la surface seront dirigées vers un point de collecte via un réseau de tranchées et de fossés généralement associé au bassin d'eau de mine, où elles se mélangeront aux eaux de collectes souterraines.

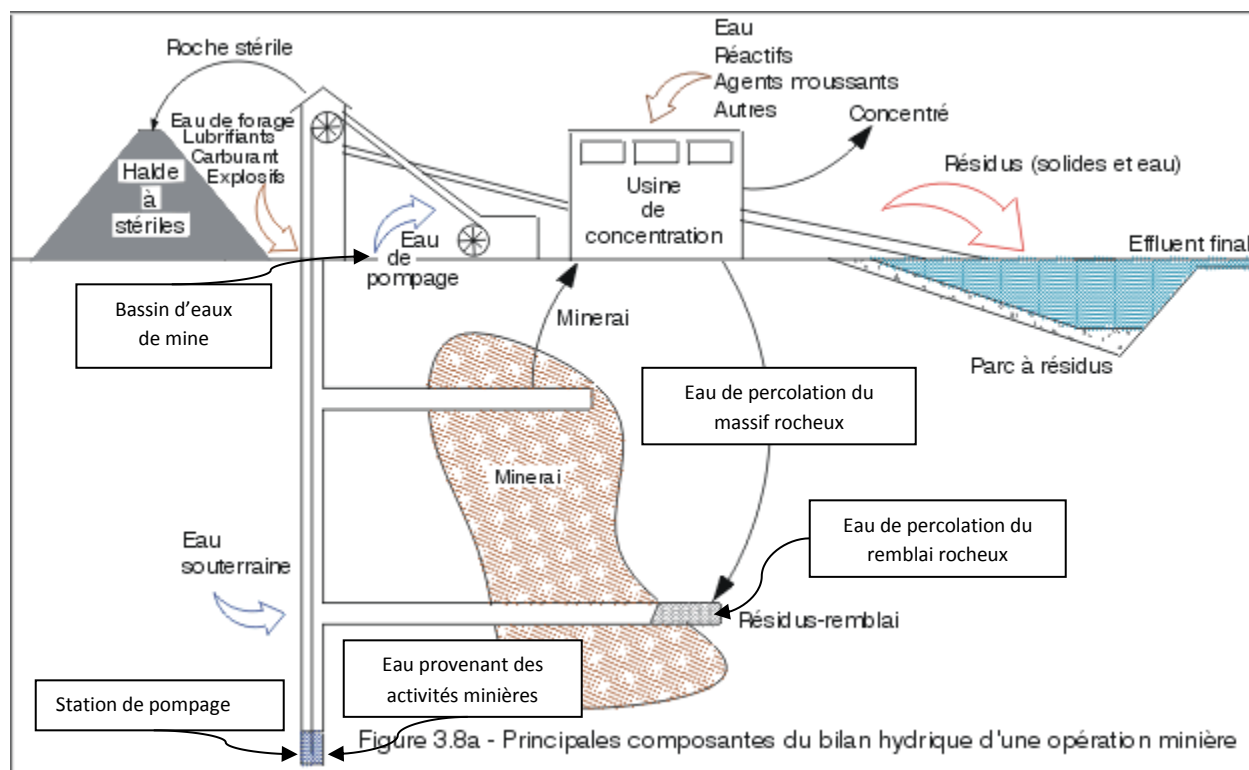


Figure 11 : Principales composantes du bilan hydrique d'une opération minière (adaptée d'Aubertin et al., 2002)

5.1.5 Ouvrages de rétentions

5.1.5.1 Généralités

Comme mentionné précédemment, les résidus miniers humides sont pompés ou descendent par gravité sous forme de pulpe vers le parc à résidus, où s'effectue une ségrégation entre les particules grossières, les particules fines et l'eau. Lors de l'exploitation minière, le parc à résidus est essentiellement une infrastructure qui emmagasine les solides, après les avoir séparés de l'eau, et qui doit ultimement évacuer cette dernière de façon à permettre la consolidation des résidus solides. Les résidus miniers densifiés sont le résultat de l'assèchement des résidus humides avant leur sortie du concentrateur à l'aide de filtres presses. Ces résidus peuvent être acheminés vers le parc à résidus sous forme solide ou encore sous l'aspect d'une pulpe épaissie ou de pâte (Bussière, 2007).

Les parcs à résidus conventionnels (déposition en pulpe) sont de plus en plus construits de façon à minimiser les exfiltrations de l'eau qu'ils contiennent ou reçoivent. Des systèmes de

récupération et de contrôle des eaux d'infiltration sont installés afin de récupérer les eaux qui peuvent s'échapper de la base des digues. Ces eaux seront ensuite renvoyées dans le parc à résidus ou envoyées dans un autre bassin intermédiaire. Il peut y avoir plusieurs bassins en série pour contrôler différents paramètres physicochimiques de l'eau. Le transfert d'un bassin à l'autre, ou encore dans l'environnement, se fait par le biais de déversoirs physiques ou mécaniques. Des pompes, des tours de transfert à variation de hauteur, des valves mécaniques ou des fossés de drainage avec bassins instrumentés sont autant de moyens de transférer l'eau entre les bassins.

Les parcs à résidus sont aussi équipés d'évacuateurs de crue, afin de contrôler le débit lors d'épisodes de précipitations extrêmes et de systèmes d'évacuation par lesquels les eaux décantées seront évacuées des parcs pour être réutilisées ou encore traitées.

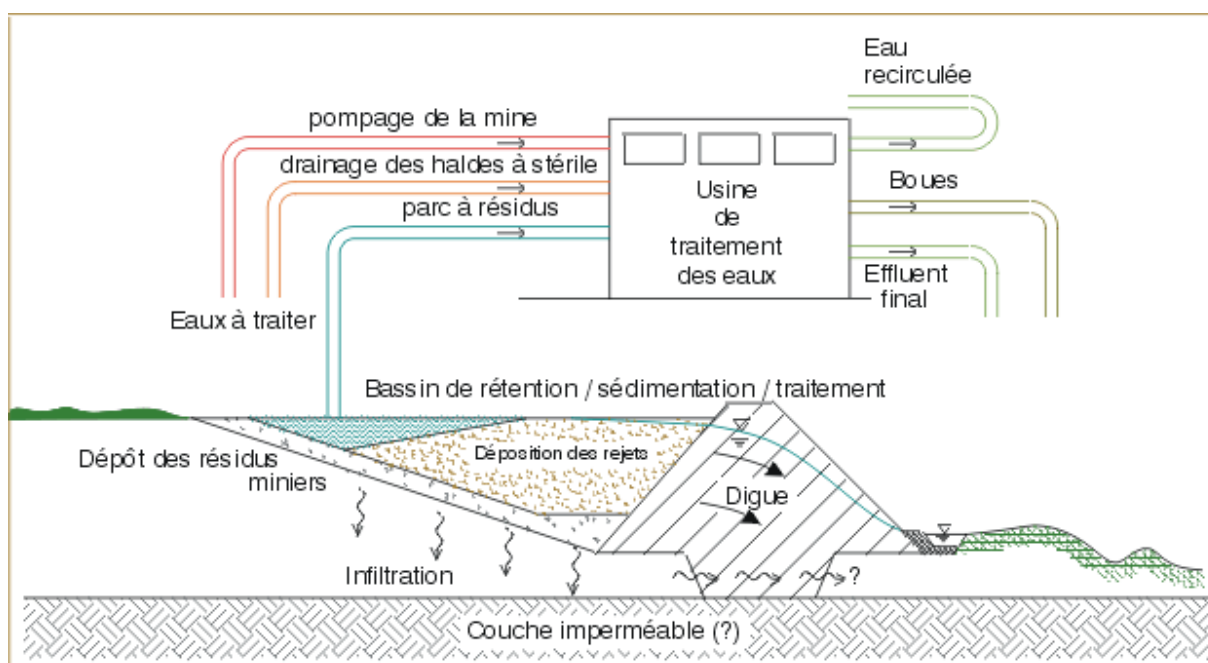


Figure 12 : Cheminement des eaux à traiter (Aubertin et al., 2002)

Certaines aires d'accumulation de résidus miniers peuvent être entièrement construites avant le début de l'exploitation. Cependant, en règle générale, les parcs à résidus sont construits au fur et à mesure de l'exploitation minière. Quelquefois, seule une digue d'amorce est construite en début d'exploitation, et elle est ensuite rehaussée périodiquement au fur et à mesure de la progression de l'exploitation. Dans ce dernier cas, les phases de conception, de construction et d'exploitation sont étroitement liées et il est difficile de les séparer.

La phase d'exploitation d'une mine est généralement courte (20 à 30 années). La durée de vie d'une mine est affectée par la disponibilité des ressources et par plusieurs autres facteurs qui évoluent dans le temps (environnementaux, sociaux, techniques et économiques). Si des changements dans la composition des résidus miniers ou des exigences réglementaires surviennent au cours de l'exploitation, le concepteur doit revoir les critères de conception originaux afin de les adapter. Quelle que soit la durée de vie prévue de la mine, les parcs à résidus

doivent être conçus pour prévoir la suspension temporaire de la production et la possibilité que cette suspension devienne permanente. Pendant une suspension temporaire ou indéfinie de l'exploitation, le propriétaire du parc à résidus est tenu de le surveiller et de l'entretenir en prévision d'une reprise éventuelle de la production.

5.1.5.2 Approche de conception des ouvrages miniers

L'approche d'évaluation des risques est généralement utilisée dans la conception des ouvrages de contrôle des eaux. Ceux-ci sont d'abord classés selon le niveau des conséquences advenant une défaillance. L'évaluation est faite pour les différentes phases de la vie de l'ouvrage (exploitation, fermeture). Les conséquences de la rupture d'une digue qui retient des résidus liquéfiables peuvent être plus importantes que celles d'un barrage ne contenant que de l'eau, parce qu'en plus des dommages physiques, des dommages à l'environnement peuvent être causés par les épanchements de résidus. De plus, dans bien des cas, la récupération des résidus épanchés est impraticable. Des analyses de bris de barrage et des études d'inondation sont habituellement réalisées pour appuyer l'évaluation des conséquences d'une rupture d'un parc à résidus. Les *Recommandations de sécurité des barrages* (ACB, 2013) présentent un schéma de classement des barrages basé sur les conséquences d'une rupture en tenant compte des populations à risque, des pertes de vie, de la valeur aux points de vue environnemental et culturel, des infrastructures et des pertes économiques. La *Directive 019* (MDDEP, 2012) ainsi que le *Règlement sur la sécurité des barrages* (CEHQ, 2010) définissent également les crues de sécurité en fonction des conséquences d'une rupture.

Crue nominale écologique (crue de projet)

Le terme « Crue nominale écologique » provient de l'Association canadienne des barrages (ACB, 2014). Il est défini comme la crue la plus importante gérée sans déversement d'eau non traitée dans l'environnement. Ainsi, un déversoir ou un évacuateur de crue d'un parc à résidus a généralement deux niveaux de risques basés sur deux niveaux de conséquences, soit un premier pour le risque écologique relié au déversement d'eau contaminée dans l'environnement (d'une façon contrôlée via le déversoir) et un deuxième pour le risque relié à la rupture de digues (formation d'une brèche suivie d'une perte de résidus et d'eau dans le milieu récepteur). Le choix de la période de récurrence de la crue nominale écologique doit tenir compte de facteurs comme la qualité de l'eau emmagasinée, les exigences en matière de réglementation et la sensibilité du milieu récepteur. La crue nominale écologique (ou crue de projet) est habituellement prescrite par les agences de réglementation. La *Directive 019* (MDDEP, 2012) prescrit des périodes de récurrence variant entre 100 et 2000 ans pour la crue nominale écologique (voir *tableau 15*). La crue nominale écologique est notamment utilisée pour déterminer la revanche minimale à conserver en tout temps sous le déversoir et, ainsi, éviter un déversement contrôlé via le déversoir pendant les précipitations ne dépassant pas la récurrence retenue.

Tableau 15 : Récurrence de la crue de projet selon la Directive 019 (MDDEP, 2012)

Type d'ouvrage		Récurrence de la crue de projet (crue écologique)	Crue de sécurité pour le déversoir
Ouvrage de rétention avec retenue d'eau	Aire d'accumulation de résidus miniers acidogènes, cyanurés, radioactifs ou à risques élevés	1 : 2000 ans	CMP
	Aire d'accumulation pour tout autre type de résidus miniers	1 : 1000 ans	
Aire d'accumulation sans retenue d'eau		1 : 100 ans	S/O

Notes :

1. La *Directive 019* doit être consultée pour les explications et les notes applicables à ce tableau.
2. Des prescriptions sont données dans la *Directive 019* sur la façon de calculer la crue de projet et sur les revanches minimales à respecter.
3. CMP = Crue maximale probable

Crue de sécurité

La crue de sécurité est définie dans les *Recommandations de sécurité des barrages* (ACB, 2013) comme étant la crue la plus importante au point de vue de point de volume, de forme, de durée ou de moment où elle se produit, pour laquelle un barrage ou ses ouvrages connexes sont conçus. La crue de sécurité est donc utilisée pour dimensionner le déversoir ou l'évacuateur de crue, de façon à ce que les eaux puissent être évacuées d'une façon sécuritaire. Les crues de sécurité prescrites par la *Directive 019* (MDDEP, 2012) et par le *Règlement sur la sécurité des barrages* (CEHQ, 2010) sont indiquées dans les *tableaux 16* et *17*. L'ACB (2014) suggère des niveaux cibles pour les crues de sécurité (*tableau 18*). Ces niveaux sont applicables pour les phases de construction, d'exploitation et de transition des ouvrages de rétention et sont fonction du classement du barrage.

Tableau 16 : Crue de sécurité, selon le Règlement sur la sécurité des barrages (CEHQ, 2010)

Niveau des conséquences en cas de rupture en période de crue	Probabilité de récurrence de la crue
Minimal ou faible	1 : 100 ans
Moyen ou important	1 : 1000 ans
Très important	1 : 10 000 ans
Considérable	CMP

Notes :

1. Le *Règlement sur la sécurité des barrages* doit être consulté pour les explications et les notes applicables à ce tableau.
2. Des prescriptions sont données dans le *Règlement sur la sécurité des barrages* sur la façon de calculer la crue de projet et sur les revanches minimales à respecter.
3. CMP = Crue maximale probable

Tableau 17 : Niveaux cibles pour les crues de sécurité applicables aux phases de construction, d'exploitation et de transition des ouvrages de rétention (ACB, 2014)

Classement des barrages	Probabilité annuelle de dépassement
Risque faible	1 : 100
Risque significatif	Entre 1 : 100 et 1 : 1000
Risque élevé	1/3 entre 1 : 1000 et la CMP
Risque très élevé	2/3 entre 1 : 1000 et la CMP
Risque extrême	CMP

Notes :

1. Le rapport de l'ACB (2014) doit être consulté pour les explications et les notes applicables à ce tableau.
2. CMP = Crue maximale probable

L'ACB (2014) suggère que le propriétaire minier choisisse des cibles plus sévères pour la phase post-fermeture (aussi appelée entretien passif). Puisque les critères de conception sont établis pour réduire la probabilité d'une rupture, ceux à appliquer pour la phase d'entretien passif doivent être plus rigoureux pour tenir compte des intervalles plus longs ainsi que de la surveillance limitée et de la capacité réduite de réagir aux signes d'alerte. Les niveaux cibles suggérés par l'ACB (2014) pour les crues de sécurité applicables à la phase d'entretien passif sont indiqués dans le *tableau 18*.

Tableau 18 : Niveaux cibles pour les crues de sécurité applicables à la phase d'entretien passif des ouvrages de rétention (ACB, 2014)

Classement des barrages	Probabilité annuelle de dépassement
Risque faible	1 : 1000
Risque important	1/3 entre 1 : 1000 et la CMP
Risque élevé	2/3 entre 1 : 1000 et la CMP
Risque très élevé	CMP
Risque extrême	CMP

Notes :

1. Le rapport de l'ACB (2014) doit être consulté pour les explications et les notes applicables à ce tableau.
2. CMP = Crue maximale probable

Crue maximale probable (CMP)

Les déversoirs et évacuateurs de crue qui doivent être maintenus à long terme sont généralement conçus pour la CMP. La façon de déterminer cette dernière, tel que recommandé par l'ACB (2013), est résumée ci-dessous. Les crues extrêmes, dont la CMP, sont généralement

évaluées à l'aide de méthodes déterministes qui maximisent les divers facteurs contribuant à provoquer une inondation. La CMP est considérée comme la crue la plus sévère « raisonnablement possible » à un endroit particulier. Elle est obtenue à partir de la précipitation maximale probable (PMP). La PMP peut être estimée à partir de plusieurs approches basées sur des données hydrométéorologiques (précipitations maximales observées, vents, points de rosée) faisant l'objet d'une maximisation déterministe ou encore à partir de la méthode statistique de Hershfield (1965). Cette valeur est généralement définie pour une période de retour d'environ 60 000 ans (Koutsoyiannis, 1999; Aubertin *et al.*, 2011). Sa probabilité d'occurrence annuelle (p_a) correspond à l'inverse de la période de retour ($p_a \approx 10^{-5}$). À noter que l'intensité de la PMP est souvent proche de la précipitation maximale correspondant à $p_a = 10^{-2}$ (période de retour de 100 ans) multipliée par cinq (Aubertin *et al.*, 2011). En effet, la PMP généralement utilisée pour la conception d'ouvrages en génie civil est donc cinq fois supérieure à la valeur proposée actuellement dans la *Directive 019*.

Il est important de mentionner que, la plupart du temps, les différentes approches permettant d'estimer les événements extrêmes probables (*i.e.* PMP, CMP) sont essentiellement basées sur des données observées sur plusieurs années. Quand bien même ces données seraient accessibles sur une plus longue période, les approches actuelles ne prennent pas en considération les changements climatiques (*i.e.*, augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des événements extrêmes dans le temps), ce qui remet en question leur utilisation dans un tel contexte.

5.1.6 Autres aspects liés à l'environnement et aux opérations minières

De nombreuses lois et exigences réglementent la gestion environnementale d'un site minier. Au Québec, la *Directive 019* met en place une procédure administrative, fournit aux entreprises les renseignements exigés lors de la demande des certificats d'autorisations nécessaires à l'exploitation de la mine et fixe certaines balises environnementales lors des opérations. La *Directive 019* n'est pas, pour le moment, un texte réglementaire, mais plutôt un texte d'orientation qui précise les attentes du gouvernement. Ce dernier peut y avoir recours lors de la délivrance d'une ordonnance ou d'une autorisation. Le gouvernement suggère entre autres des modes d'entreposage des déchets solides et liquides (stériles, dépôts de surface, déchets dangereux, produits pétroliers) et de gestion des eaux, des normes de rejet des eaux usées pour certains paramètres (eaux de pompage, effluent final), des paramètres et méthodes d'échantillonnage de la qualité des eaux, le suivi environnemental et une méthode pour gérer la relation effluent final et milieu récepteur.

Afin de respecter ces normes environnementales, des étapes de traitement de l'eau seront nécessaires en fonction des contaminants présents et du type de traitement du minerai utilisé. Ces étapes utilisent des processus physiques, chimiques ou bactériologiques (Aubertin *et al.*, 2002). La sortie finale de l'eau, juste avant le milieu récepteur, est munie d'un système de mesure en continu du pH et du débit, et fait l'objet d'un échantillonnage de l'eau pour fin d'analyse de conformité.

À plus ou moins grande échelle, toutes les opérations minières doivent effectuer un contrôle des poussières générées par les activités d'exploitation. Les opérations à ciel ouvert à fort volume

d'extraction et situées près de zones habitées sont particulièrement sensibles à cet aspect. Les différentes haldes, les zones asséchées des parcs à résidus, la fosse à ciel ouvert, les activités de concasseurs de surface et l'utilisation des chemins d'accès sont parmi les sources usuelles de poussières sur un site minier (USEPA, 1976; Countess Environmental, 2006; Blight, 2007; Brotons *et al.*, 2010). Les émanations de poussières sont règlementées afin de garantir la qualité de l'air et de l'environnement dans le milieu récepteur. Des stations de mesures et d'échantillonnage de l'air ambiant fournissent les données nécessaires à la gestion des contaminants. Des méthodes usuelles d'abattage de poussières utilisant de l'eau seront généralement mises en œuvre afin de contrôler cette contamination. Les excédents d'eau seront inclus dans les eaux de ruissellement et devront être traités avant de les retourner dans l'environnement. Des agents agglomérants peuvent également être utilisés pour amalgamer les poussières entre elles et, ainsi, minimiser leur dispersion aérienne.

5.2 Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les opérations d'exploitation

Cette section présente les impacts des changements climatiques sur les différentes composantes d'une exploitation minière, qu'elle soit souterraine ou à ciel ouvert, ainsi que les principaux risques qui y sont associés.

5.2.1 Gestion de l'eau

Les principaux impacts des changements climatiques en phase d'exploitation sont reliés à la gestion de l'eau, généralement dans un contexte d'une augmentation des volumes à gérer et à traiter, aux coûts qui y sont associés ainsi qu'à la stabilité des ouvrages de rétention des résidus miniers.

Les projections climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes pour l'ensemble des régions minières du Québec ainsi que du nombre et de l'intensité des événements extrêmes de précipitation (voir chapitre 4). Pour les mines actives, cela signifie des quantités d'eau plus importantes à gérer et à traiter par des moyens actifs, ce qui génère des coûts supplémentaires.

Dans certains cas, la gestion de l'eau circulant à l'intérieur des ouvrages de rétention (parc à résidus, bassins de polissage et de décantation, etc.) est déjà un défi lors de périodes sensibles, comme par exemple au printemps lors de la fonte des neiges. L'augmentation des volumes d'eau circulant à l'intérieur de ces ouvrages génère donc des risques environnementaux en raison des probabilités de débordements et de relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

Les déversoirs ou évacuateurs de crue sont nécessaires pour permettre le passage contrôlé des eaux en période de crue. Une défaillance du déversoir peut entraîner une érosion importante et, dans le pire des cas, la rupture de la digue. Les projections climatiques prévoient que l'intensité, la fréquence et la durée des précipitations extrêmes augmenteront pour toutes les régions minières, tout comme les précipitations annuelles moyennes. Il faut donc s'attendre à ce que certaines mines devront augmenter la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crue, ce qui pourrait représenter des coûts importants pour les exploitants. Cette augmentation des

événements extrêmes de précipitations génère des risques environnementaux par rapport aux probabilités de débordements et de relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

5.2.2 Ouvrages de rétention

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes est prévue pour l'ensemble des régions minières, tout comme les précipitations moyennes annuelles. Les risques d'instabilité des ouvrages de rétention et du maintien de leur intégrité sont donc accrus. Par contre, la période d'exploitation est généralement courte et les ouvrages sont souvent modifiés pendant l'exploitation pour s'adapter aux conditions changeantes des opérations.

Dans la région du Grand-Nord et au nord de la Fosse du Labrador, l'augmentation des températures moyennes provoquera, à certains endroits, la fonte d'une partie du pergélisol et l'augmentation des zones actives. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de retenue. Par contre, les technologies permettant la construction sur le pergélisol existent, et les lignes directrices sont bien connues à cet effet (MEND, 2012; Andersland et Ladanyi, 2004; Doré et Zubeck, 2008). De plus, l'augmentation des zones actives du pergélisol pourrait également créer des problèmes pour trouver des lieux propices à la construction de certains ouvrages. Les conséquences seraient principalement d'ordre logistique pour les opérations minières, mais elles pourraient tout de même engendrer des coûts supplémentaires pour les exploitants.

5.2.3 Performance environnementale

Au Québec, à l'horizon 2081-2100, les simulations climatiques projettent un allongement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitations pour la saison estivale (Ouranos, 2015). La diminution de l'apport en eau fraîche ou l'augmentation de l'évapotranspiration pourrait donc accroître la concentration des contaminants dans les effluents miniers.

Dans les cas extrêmes, la rareté de l'eau pourrait limiter la capacité des exploitants à contrôler les poussières. Une telle situation pourrait être plus problématique pour les exploitations à proximité de zones habitées, que l'on retrouve principalement en Abitibi-Témiscamingue ou sur la Côte-Nord.

Dans les cas extrêmes de sécheresse, des conflits d'usage avec les communautés avoisinantes, en ce qui a trait à l'approvisionnement en eau, pourraient se produire. Néanmoins, bien qu'il soit possible que les périodes de sécheresse pendant l'été soient plus probables, il faut considérer que les précipitations annuelles seront plus importantes, ce qui pourrait apporter un certain équilibre dans les bilans hydriques. Les probabilités d'occurrence demeurent donc peu probables.

5.2.4 Productivité

La diminution de l'apport en eau fraîche ou l'augmentation de l'évapotranspiration en été pourrait concentrer davantage les contaminants dans l'eau recyclée utilisée pour le traitement du minerai. Cela pourrait causer des problèmes de rendement à l'usine de traitement.

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes de précipitation pourrait également générer des problèmes d'instabilité des pentes des fosses et des ouvertures minières. De tels événements pourraient avoir des conséquences très importantes, notamment en ce qui concerne la santé et la sécurité des travailleurs. Encore une fois, en phase d'exploitation, la stabilité de ces structures est constamment surveillée, ce qui fait que les ressources sont généralement disponibles pour réagir. Néanmoins cela ne garantit pas de possibles défaillances en phase d'exploitation.

5.2.5 Transport et logistique

En ce qui concerne le transport, les principaux impacts associés aux changements climatiques sont essentiellement localisés dans le Grand-Nord, dans la fosse du Labrador et à la Baie-James. Dans ces régions, les sites miniers sont éloignés et souvent isolés. De plus, les entreprises y sont, la plupart du temps, responsables de la construction et de l'entretien du réseau routier donnant accès aux sites. Les principaux problèmes liés au transport sont en lien avec la fonte du pergélisol ou encore l'entretien attribuable aux précipitations plus abondantes. Pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue et certains projets miniers de la Côte-Nord, l'accès aux projets miniers est beaucoup plus facile en raison de la proximité du réseau de transport public ou des chemins multi-usages. Les risques associés au transport y sont donc beaucoup plus faibles.

L'augmentation des températures annuelles moyennes aura pour effet de diminuer la capacité du transport aérien. En effet, la capacité portante des avions diminue en fonction de l'augmentation de la température de l'air. Ce phénomène pourrait engendrer des coûts supplémentaires pour les compagnies minières. Par contre, les conséquences sont considérées comme étant faibles puisque l'effet de l'augmentation de la température sur les coûts globaux du transport aérien est moindre, voire peu significatif, par rapport à d'autres facteurs comme les coûts en carburant par exemple. De plus, la phase d'exploitation est généralement très courte par rapport aux évolutions du climat, ce qui fait en sorte que la capacité du transport aérien évoluera peu sur la durée de vie d'une mine. Il faut également souligner que ce risque touche principalement les régions du Grand-Nord et de la fosse du Labrador, car les entreprises minières des autres régions sont desservies presque exclusivement par le transport terrestre.

L'augmentation des températures moyennes dans les régions plus au nord pourrait avoir des impacts positifs sur le transport du minerai et les approvisionnements, en allongeant les périodes annuelles navigables ou encore en ouvrant la voie maritime du nord. Cela pourrait du même coup diminuer les coûts liés à l'entreposage, en raison des périodes plus courtes où les approvisionnements et l'exportation du minerai ne seront pas possibles.

Le transport par bateau sur la voie maritime du St-Laurent est d'une grande importance pour le secteur minier québécois. Une diminution du niveau du fleuve St-Laurent pourrait affecter les capacités du transport maritime. Tel que mentionné au chapitre 3, le manque d'études

concernant le niveau du St-Laurent et les conclusions contradictoires suggèrent que l'incertitude est encore très élevée par rapport à la fluctuation du niveau du fleuve. Au moment de rédiger ce rapport, il n'est donc pas possible d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un tel impact.

En raison de l'augmentation des températures moyennes hivernales, les cycles de gel/dégel risquent d'être plus fréquents. Cette augmentation pourrait avoir des impacts sur les infrastructures routières (route, aéroport, chemin de fer) et, par conséquent, augmenter les coûts engendrés par leur entretien. En raison de leur éloignement et du fait que les compagnies minières sont responsables de l'entretien du réseau donnant accès à leurs sites, les impacts seraient plus importants dans les régions de la Baie-James, de la fosse du Labrador et du Grand-Nord. Dans des cas extrêmes, l'augmentation des dommages causés par les cycles de gel/dégel et, surtout, par la fonte du pergélisol pourrait résulter en la fermeture de routes et, dans certains cas, l'isolement temporaire de certains sites miniers. Pour les raisons expliquées précédemment, les impacts sont plus importants pour les régions du Grand-Nord, de la Baie-James et de la fosse du Labrador. En effet, l'isolation des sites pourrait avoir des conséquences économiques importantes en plus des considérations de santé et sécurité.

L'augmentation des événements extrêmes, comme des tempêtes majeures, des inondations ou des feux de forêt, pourrait également perturber la chaîne d'approvisionnement ou encore provoquer l'arrêt des opérations et, dans certains cas, l'isolation de sites miniers.

5.2.6 Sommaire des impacts et des risques associés aux changements climatiques en période d'exploitation

Le *tableau 19* résume les principaux impacts et risques associés aux opérations minières dans un contexte de changements climatiques. Trois indicateurs climatiques ont été retenus comme étant les plus pertinents : l'augmentation des précipitations moyennes; l'augmentation de la température moyenne; l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (précipitations et sécheresse).

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

Évènement climatique	Cibles	Principaux Impacts	Risques
Augmentation progressive des précipitations moyennes à l'échelle du Québec jusqu'en 2100	- Ouvrages de rétention - Productivité/Opérations minières	- Possibilité de capacité insuffisante des bassins d'accumulation des eaux minières; - Augmentation des volumes d'eau à gérer et à traiter.	- Augmentation des risques liés aux relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement; - Augmentation des coûts reliés à la gestion et au traitement de volumes d'eau supérieurs.
Augmentation progressive des températures moyennes à l'échelle du Québec jusqu'en 2100 (i.e., augmentation de l'évaporation potentielle, du nombre de jours sans gel).	Infrastructures / Ouvrages de rétention	Fonte du pergélisol et zone de pergélisol non continu plus importante;	- Risques pour l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages; - Problèmes pour trouver des endroits propices aux constructions; - Augmentation des coûts d'entretien des infrastructures routières; - Risques de fermeture de routes ou chemins de fer (affaissements et tassements de terrain) et isolement des sites;
	Productivité / Opérations minières	- Augmentation de l'évapotranspiration en été; - Changements au bilan hydrique; - Augmentation des températures dans les différentes haldes, dont la halde à minerai;	- Problèmes liés à la recirculation de l'eau en raison d'une augmentation de la charge en contaminants dans l'eau; - Problèmes liés à la diminution de la dilution des effluents finaux; - Problèmes pour la réduction des poussières; - Modification de la chimie de surface du minerai, avec des conséquences fréquentes au procédé de traitement subséquent;
	Transport / Logistique	- Diminution de la capacité de transport par avion; - Variation possible du niveau du fleuve St-Laurent; - IMPACTS POSITIFS - Allongement des périodes annuelles navigables dans le Nord; - Ouverture de la voie maritime du Nord favorisant le transport des matières premières et du minerai	- Coûts plus élevés pour l'approvisionnement; - Modification des capacités du transport maritime et du calendrier de transport par bateau. - Diminution des coûts d'approvisionnement en matériel et également d'entreposage du minerai.
Augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des évènements de précipitation ou de sécheresse extrêmes.	Infrastructures / Ouvrages de rétention	- Risques de capacité insuffisante des déversoirs et des évacuateurs de crue; - Augmentation soudaine des volumes d'eau à gérer dans les infrastructures minières;	- Augmentation des risques liés au débordement et au relâchement d'eaux contaminées dans l'environnement; - Coût élevé de modification de ces ouvrages; - Risques pour l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de rétention; - Risque d'instabilité des ouvertures minières et des pentes des fosses; - Danger lié à la santé et à la sécurité des travailleurs ainsi qu'à l'intégrité des infrastructures de production minière;
	Transport / Logistique	Problématique d'accès lors d'épisodes extrêmes (transport, communication, approvisionnement en énergie).	Risques d'arrêt des opérations, perturbation de la chaîne d'approvisionnement, isolement des sites.

5.3 Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques

Tel que décrit au chapitre 4, une enquête portant sur le niveau de risque associé aux principaux impacts anticipés des changements climatiques pour le secteur minier a été réalisée auprès d'experts du secteur. En ce qui concerne spécifiquement les opérations d'exploitation minière, onze experts de ce domaine ont participé à cette enquête. Les questionnaires qui ont été soumis aux participants les ont amenés à se prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci. L'analyse de leurs réponses a donc permis d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux principaux impacts des changements climatiques, en se basant sur la matrice présentée précédemment (figure 3).

Un comité d'experts a par la suite évalué le niveau de vulnérabilité du secteur minier par rapport à ces principaux impacts, c'est-à-dire qu'ils ont évalué la propension du secteur minier à être affecté de manière négative par les impacts des changements climatiques ainsi que sa capacité à réagir ou à s'adapter à ceux-ci.

Les résultats de l'analyse qualitative des principaux risques des impacts des changements climatiques et la vulnérabilité du secteur minier face à ceux-ci sont présentés dans les sections qui suivent.

5.3.1 Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

L'augmentation des températures moyennes, le raccourcissement de la durée de l'hiver et la diminution du nombre de jours de gel pourraient mener à la fonte du pergélisol dans certaines régions et à l'augmentation des zones actives. Cette augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de tassements de terrain. Cela pourrait avoir pour conséquences d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de rétention tels que les digues des parcs à résidus, les bassins de décantation, les bassins de polissage et les bassins de rétention.

5.3.1.1 Niveau de risque

Le niveau de risque associé à la perte potentielle de stabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol est jugé **élevé** pour les deux régions concernées, à savoir la Fosse du Labrador et le Grand-Nord.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable			GN	
	Peu Probable			FL	
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : Possibilité de défaillances (pourrait se produire à une fréquence d'environ une fois aux 50 ans);
- *Probable* : Plusieurs ouvrages ne seront pas en mesure de maintenir leur stabilité; plusieurs subiront une défaillance (pourrait se produire à une fréquence d'environ une fois aux 10 ans).

Gravité des conséquences

- *Élevée* : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées.

Vulnérabilité

La stabilité des structures et des ouvrages de rétention est déjà une préoccupation pour les mines situées en régions froides avec pergélisol. En effet, l'eau et les résidus qui sont mis en place sont des sources de chaleur qui peuvent dégrader le pergélisol. Lorsque ce dernier est utilisé pour imperméabiliser les infrastructures, et que l'on ajoute à cela les incertitudes reliées aux changements climatiques, cela devient encore plus préoccupant. De plus, comme les milieux nordiques sont sensibles, une rupture peut mener à des impacts environnementaux importants qui pourraient nuire à l'acceptation sociale de futurs projets. En se basant sur cette analyse, le panel d'experts considère la vulnérabilité du secteur minier quant aux risques d'instabilités des structures et des ouvrages de rétention, en raison de la fonte du pergélisol, de **modérée à élevée**.

5.3.2 Défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau (déversoirs/évacuateurs de crue)

Mise en contexte

Les projections climatiques prévoient que l'intensité et la fréquence des précipitations abondantes et extrêmes augmenteront pour toutes les régions minières, tout comme les précipitations annuelles moyennes. Pour les mines actives, cela signifie des quantités d'eau plus importantes à gérer et à traiter par des moyens actifs, ce qui génère des coûts supplémentaires.

Dans certains cas, la gestion de l'eau circulant à l'intérieur des ouvrages de rétention (parc à résidus, bassins de polissage et de décantation, etc.) est déjà un défi lors de périodes sensibles, par exemple au printemps, lors de la fonte des neiges.

Il serait donc possible que des déversoirs et des évacuateurs de crue opèrent à leur capacité maximale et même plus. L'augmentation du volume d'eau circulant à l'intérieur de ces ouvrages génère donc des risques environnementaux en raison des probabilités de débordements et de relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

Niveau de risque

Pour l'ensemble des régions, les participants ont jugé le niveau de risque **élevé**.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		A-MC-GN	BJ-CN-FL	
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- **Probable** : Plusieurs sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.
- **Élevée** : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus).

Vulnérabilité

Il existe présentement des outils et critères afin de concevoir les ouvrages de gestion et de traitement de l'eau telles la crue de projet, la crue maximale de projet et la crue de sécurité. Cependant, ces outils et critères sont basés sur des données climatiques historiques et non futures. Il est donc urgent de développer de nouveaux outils qui tiennent compte des changements climatiques, afin de réduire la vulnérabilité du secteur minier. De plus, une défaillance des ouvrages pourrait avoir des conséquences environnementales et économiques majeures pour la compagnie responsable et pour l'industrie minière québécoise en général. En se basant sur ces faits, la vulnérabilité du secteur minier face à de possibles défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau en période d'exploitation est jugée **élevée**.

5.3.3 Possibilités de défaillances des ouvrages de retenue

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes, et surtout des événements extrêmes de précipitations, pourrait générer des pressions sur les ouvrages de retenue tels que les barrages et les digues des parcs à résidus. Il faut également considérer que, pour les sites en opération depuis plusieurs années, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Cela génère des risques environnementaux par rapport aux probabilités de défaillances des ouvrages de retenue et, par conséquent, de relargages de rejets

liquides et solides dans l’environnement. On entend par défaillance tout bris qui entraîne une fuite plus ou moins importante de liquide et/ou de matériel solide.

Niveau de risque

Selon les régions, le niveau de risque varie entre **modéré** et **élevé**. Il n’y pas eu de consensus pour la région de la Côte-Nord en ce qui concerne la probabilité d’occurrence. Par contre, la gravité des conséquences pour cette région est jugée **élevée**.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable			BJ-FL-GN	
	Rare			A-MC	
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d’occurrence

- **Rare** : Nombre très limité de sites avec une défaillance d’ouvrage de retenue.
- **Peu probable** : La majorité des sites seront en mesure de supporter les volumes d’eau supplémentaires; possibilité de quelques défaillances ponctuelles.

Gravité des conséquences

- **Élevée** : Forte réduction de la qualité de l’environnement; l’intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus).

Vulnérabilité

Pour les mêmes raisons que pour les ouvrages de gestion et de traitement de l’eau, soit le fait que les critères de design ne sont pas adaptés aux changements climatiques et que les impacts environnementaux et économiques liés à une instabilité physique des ouvrages sont importants, la vulnérabilité du secteur minier par rapport à de possibles défaillances des ouvrages de retenue en période d’exploitation est jugée de **modérée à élevée**.

5.3.4 Instabilité des fosses et des ouvertures minières

Mise en contexte

L’augmentation de la fréquence et de l’intensité des événements extrêmes de précipitation pourrait également générer des problèmes d’instabilité des pentes, des fosses et des ouvertures minières. De tels événements pourraient avoir des conséquences très élevées, notamment en ce qui concerne la santé et la sécurité des travailleurs.

Niveau de risque

Les participants ont jugé le niveau de risque **élevé** pour toutes les régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable			CN	
	Peu Probable			A-MC-BJ-FL-GN	
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			
A : Abitibi		CN : Côte-Nord		GN : Grand-Nord	
BJ : Baie James		FL : Fosse du Labrador		MC : Matagami-Chibougamau	

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : La majorité des mines seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques problèmes d'instabilité.
- *Probable* : Plusieurs mines n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de problèmes d'instabilité.

Gravité des conséquences

- *Élevée* : Investissements majeurs requis pour des travaux correctifs et arrêt possible de la production; danger pour la santé et la sécurité des travailleurs limité.

Vulnérabilité

En phase d'exploitation, la stabilité des fosses et des ouvertures minières est constamment surveillée afin de s'assurer de la sécurité des travailleurs. Même si on peut penser qu'une augmentation des précipitations moyennes et des événements extrêmes va accroître le nombre d'instabilités, on considère que les compagnies minières ont tous les outils pour gérer cette situation. De plus, comme la période d'exploitation est de l'ordre de dizaines d'années, les changements à ce niveau devraient être progressifs. De plus, les ressources humaines et financières sont disponibles pour réagir aux signes d'alerte et aux situations d'urgence, ainsi que pour apporter toute modification devenue nécessaire. Pour ces raisons, la vulnérabilité du secteur minier face à de possibles instabilités des fosses et des ouvertures minières est jugée **faible à modérée**.

5.3.5 Perte d'accessibilité aux sites miniers

Mise en contexte

Dans certaines régions, les sites miniers sont éloignés et souvent isolés. De plus, les entreprises y sont, la plupart du temps, responsables de la construction et de l'entretien du réseau routier ou ferroviaire donnant accès aux sites. Pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue et pour certains projets miniers de la Côte-Nord, l'accès aux projets miniers est beaucoup plus facile, en raison de la proximité du réseau de transport public ou des chemins multi-usages.

Les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur les infrastructures routières (route, aéroport, chemin de fer) et, par conséquent, augmenter les coûts engendrés par leur entretien. Les principaux impacts sont en lien avec la fonte du pergélisol ou encore avec

l'augmentation de précipitations plus abondantes. Les dommages causés pourraient résulter en la fermeture temporaire de routes, de voies ferrées ou de pistes d'atterrissage, ce qui pourrait perturber la chaîne d'approvisionnement ou encore provoquer l'arrêt des opérations. Dans certains cas extrêmes, des isollements temporaires de sites miniers pourraient survenir.

Niveau de risque

Les participants ont jugé le niveau de risque **faible** pour toutes les régions. Par contre, il n'y a pas de consensus sur la probabilité d'occurrence pour la Côte-Nord. Celle-ci varie de *rare* à *peu probable*, mais comme la gravité des conséquences est jugée *faible*, le risque demeure également *faible* pour cette région.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable				
	Rare	A-MC-CN	BJ-GN		
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- *Rare* : Possibilité qu'un très faible nombre de sites soient temporairement inaccessibles.

Gravité des conséquences

- *Faible* : Légère augmentation des coûts et efforts d'entretien des infrastructures; faibles investissements requis de façon préventive.
- *Modérée* : Investissements requis pour maintenir l'accès.

Vulnérabilité

La vulnérabilité du secteur minier face à de possibles pertes d'accessibilité aux sites miniers est jugée **faible**, puisque l'on considère que l'industrie est déjà habituée de gérer ce genre d'imprévu, et ce, sans trop de difficultés. Au pire, ces situations se produiront plus souvent, sans faire en sorte que les entreprises ne soient pas en mesure de s'adapter.

5.3.6 Diminution de l'apport en eau fraîche

Mise en contexte

La diminution de l'apport en eau fraîche pendant la saison estivale ou une évapotranspiration accrue pourrait augmenter la concentration des contaminants dans l'eau recyclée utilisée pour le traitement du minerai. Cela pourrait causer des problèmes de rendement à l'usine de traitement.

Niveau de risque

Les participants ont jugé le niveau de risque **faible** pour toutes les régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

Probabilité d'occurrence

- **Rare** : Faible possibilité qu'un très faible nombre de sites aient des problèmes d'approvisionnement en eau fraîche.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Perturbation des opérations; diminution du rendement; adaptations nécessaires pour maintenir la production.

Vulnérabilité

L'apport en eau fraîche est important pour l'industrie minière. Cependant, les changements climatiques ne devraient pas modifier de façon significative cet apport. Il est jugé qu'en cas de sécheresse, des alternatives devraient être facilement trouvées, considérant la durée relativement courte de ce manque d'eau fraîche. La vulnérabilité du secteur minier face à une diminution de l'apport en eau fraîche est donc jugée **faible**.

5.4 Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques

Le *tableau 20* résume le niveau de vulnérabilité aux principaux impacts liés à l'exploitation minière. On remarque que pour deux impacts, la vulnérabilité du secteur minier est jugée élevée (défaillance des ouvrages de gestion et de traitement des eaux et défaillance des ouvrages de retenue) et qu'une vulnérabilité est catégorisée de *modérée* à *élevée* (instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol). Ces éléments devraient être prioritaires afin de réduire le niveau de vulnérabilité de l'industrie minière et du gouvernement face aux impacts des changements climatiques.

Tableau 20 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à l'exploitation minière

Impacts possibles des changements climatiques	Niveau de risque		Vulnérabilité
Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol	Élevé		Modérée / Élevée
Défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau	Élevé		Élevée
Défaillances des ouvrages de retenue	Modéré (A-MC)	Élevé (BJ-FL-GN)	Élevée
Instabilité des fosses et des ouvertures minières	Élevé		Faible / Modérée
Perte d'accessibilité aux sites miniers	Faible		Faible
Diminution de l'apport en eau fraîche	Faible		Faible

5.5 Conclusion et recommandations

En phase d'exploitation, la vulnérabilité du secteur minier face aux changements climatiques est jugée de faible à élevée, selon les différents impacts des changements climatiques. De façon plus spécifique, les principales vulnérabilités se situent au niveau de la gestion des résidus et de l'eau dans un contexte d'une augmentation des volumes à gérer. Au moment de l'exploitation des mines, ce n'est pas tant l'évolution du climat qui est problématique, mais plutôt la variabilité des extrêmes qui est la source des plus grandes préoccupations. Un tel contexte est à même de rendre plus à risque la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crue ainsi que l'intégrité structurale des ouvrages de retenue. En plus des possibles risques pour l'environnement, les travaux nécessaires pour corriger de telles situations pourraient représenter des coûts supplémentaires importants pour les entreprises minières.

Pour les autres impacts des changements climatiques, l'industrie minière est plus facilement en mesure de s'adapter lors de la phase d'exploitation des mines. En effet, la présence continue des opérateurs miniers lors de cette phase fait en sorte que les ouvrages font normalement l'objet de surveillance et que les ressources humaines et financières sont généralement disponibles pour apporter les modifications devenues nécessaires. Il faut aussi considérer que la durée de vie de la majorité des exploitations est relativement courte par rapport à l'évolution du climat. Cela fait en sorte que, pour bien des exploitations, le climat sera relativement semblable sur l'ensemble de la durée de vie des exploitations. Pour les mines qui ont une durée de vie plus longue, certains effets des changements climatiques pourront être perceptibles. Toutefois, les exploitants seront à même de s'adapter de façon progressive aux conditions climatiques au fur et à mesure de leur évolution dans le temps. De même, l'industrie minière est présente un peu partout à l'échelle de la planète et, par conséquent, elle est en mesure de s'adapter à une multitude de conditions climatiques.

Cela étant dit, bien qu'en phase d'exploitation le contexte soit plus favorable à l'adaptation aux changements climatiques, les vulnérabilités décrites au *tableau 20* demeurent une réalité et des défaillances peuvent se produire malgré la présence des opérateurs miniers sur les sites en exploitation.

Afin de réduire les vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques en phase d'exploitation, cette section présente quelques pistes de solution et des recommandations.

Piste de solution n° 1 : Identifier les conditions météorologiques extrêmes pour considérer une intégration adéquate des changements climatiques dans la conception des ouvrages de rétention.

Lors de la phase de conception d'un ouvrage minier, les conditions extrêmes doivent être prises en considération. Par conséquent, de nouveaux critères de conception considérant les changements climatiques doivent être développés, notamment en ce qui concerne l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des événements extrêmes de précipitation. Des outils pour l'estimation des futures CMP et PMP devront être développés. Ultimement, de nouvelles approches devront être proposées afin de prendre en considération les changements climatiques dès la phase de conception des ouvrages miniers.

Pour y arriver, les opérateurs devront avoir accès à des scénarios climatiques adaptés aux secteurs miniers, c'est-à-dire des données climatiques utiles à l'ingénierie et à la conception des ouvrages. Il apparaît donc essentiel que les spécialistes des changements climatiques, tels que le consortium Ouranos, et les spécialistes du secteur minier collaborent afin de développer de tels outils. À ce niveau, il serait intéressant d'utiliser les données météorologiques recueillies depuis des années sur les sites miniers.

Recommandations :

- **Supporter la recherche visant à mieux estimer les conditions climatiques futures;**
- **Utiliser les données météorologiques existantes recueillies sur les sites miniers actifs pour le développement de scénarios climatiques adaptés au secteur minier.**
- **Utiliser les connaissances des communautés locales, notamment des communautés autochtones (*Traditional knowledge*) pour mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur les milieux et les impliquer dans le suivi local des changements climatiques.**

Piste de solution n° 2 : Considérer les changements climatiques dès la phase de conception des ouvrages de gestion des résidus, afin d'assurer des conditions qui conduiront plus tard à une restauration et une fermeture durable

L'un des éléments vulnérables, dans le contexte des changements climatiques, est la stabilité des digues. Ces dernières sont conçues et construites sur la base de critères établis sur des paramètres climatologiques désuets, puisqu'ils sont fondés sur des données historiques. Il est donc nécessaire de modifier les critères de conception des digues en tenant compte des scénarios climatiques futurs. Dans le même ordre d'idées, il sera important de prévoir la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crue en fonction des changements climatiques.

Puisque les techniques de gestion des résidus nécessitant des digues sont plus vulnérables aux changements climatiques, il serait approprié de favoriser l'utilisation d'approches de gestion des rejets qui réduisent les pressions exercées sur celles-ci. Des techniques telles que l'utilisation de

résidus épaissis ou filtrés sont des façons de réduire les risques d'instabilité physique et de faciliter la gestion de l'eau sur les sites miniers.

Puisque les exploitations s'échelonnent sur de relativement courtes périodes, soit tout au plus quelques décennies, il serait possible d'adapter les méthodes de gestion des résidus et/ou les infrastructures en fonction de l'évolution du climat. Il en revient donc à développer des techniques dites évolutives qui auraient la capacité de s'adapter. En prévoyant ce caractère évolutif dès la conception, les travaux nécessaires à l'adaptation aux nouvelles conditions climatiques des ouvrages seraient beaucoup plus simples, économiques et sécuritaires.

Recommandations :

- **Développer une approche méthodologique visant à intégrer les changements climatiques à la conception des ouvrages de rétention des résidus miniers;**
- **Développer des critères de conception des digues qui considèrent les changements climatiques;**
- **Augmenter les connaissances en lien avec l'utilisation des résidus épaissis ou filtrés, afin de réduire les volumes d'eau utilisés;**
- **Encourager la mise en place de techniques qui favorisent le drainage et la consolidation des résidus (p. ex. : inclusion de stériles), afin de réduire l'instabilité des matériaux.**

Piste de solution n° 3 : Mieux intégrer les changements climatiques dans l'encadrement réglementaire des sites miniers

Étant donné que la gestion des résidus et de l'eau sont les éléments les plus vulnérables aux impacts des changements climatiques, il apparaît essentiel de considérer les vulnérabilités inhérentes aux différents concepts de gestion des résidus et de restauration dès la phase de conception, afin d'assurer des conditions qui conduiront plus tard à une fermeture durable des exploitations minières. Cette importance d'intégrer les changements climatiques dès la conception des opérations minières, particulièrement en ce qui a trait à la gestion des résidus, doit être considérée dans les demandes de certificat d'autorisation émis par le gouvernement. Bien que ce dernier le fasse déjà dans certains cas, il n'en demeure pas moins que les façons de faire et les outils nécessaires à cette intégration des changements climatiques ne sont pas disponibles pour les entreprises minières. À l'heure actuelle, faute de meilleures solutions, les entreprises se contentent souvent d'augmenter les facteurs de sécurité utilisés dans la conception des ouvrages pour répondre aux préoccupations des changements climatiques. Bien entendu, pour pouvoir tenir compte des changements climatiques, tel que mentionné à la recommandation précédente, les conditions climatiques à utiliser et les critères de conceptions devront être mieux définies.

Recommandation :

- **Produire un guide visant à établir des façons de faire et des méthodes pour mieux intégrer les changements climatiques dans le cadre des demandes de certificat d'autorisation (CA) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC).**

6. Analyse qualitative de risques et de vulnérabilités liées aux changements climatiques pour la restauration des sites miniers

Afin d’être en mesure de comprendre en quoi les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur la restauration des sites miniers, il apparaît nécessaire de présenter des notions de base à ce sujet. La section 7.1 présente donc les principales méthodes de restauration et leurs particularités et la section 7.2 explique en quoi les changements climatiques pourraient affecter leur performance. Ensuite, la section 7.3 présente l’analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques. Finalement, la section 7.5 apporte des pistes de solution et des recommandations en lien avec la restauration pour diminuer la vulnérabilité du secteur minier face aux changements climatiques

6.1 Généralités sur la restauration des sites miniers

6.1.1 Drainage minier contaminé⁵

Le drainage contaminé provient généralement des sites d’entreposage de rejets miniers (p. ex. : rejets de concentrateur et stériles miniers), contenant des minéraux sulfureux, lorsque ces derniers sont exposés aux conditions atmosphériques ambiantes (Aubertin *et al.*, 2002; Bussière *et al.*, 2005). Les interactions entre les rejets miniers sulfureux, l’eau et l’oxygène atmosphérique engendrent des mécanismes réactionnels chimiques naturels à l’origine de la contamination des eaux de drainage (Kleinmann *et al.*, 1981; Lowson, 1982; MEND, 1991; Evangelou et Zhang, 1995). Communément, deux types de drainage contaminé sont distingués : le drainage minier acide (DMA) et le drainage neutre contaminé (DNC).

Le DMA représente l’une des problématiques environnementales les plus critiques du secteur minier. Plus spécifiquement, l’oxydation de sulfures s’accompagne d’une libération de cations (p. ex. : Fe^{2+} , Fe^{3+}), d’oxyanions (p. ex. : SO_4^{2-}) et de protons (H^+), ce qui mène à une diminution du pH des eaux de percolation couplée à un relargage de métaux (p. ex. : Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) et métalloïdes (p. ex. : As, Ge, Sb) (*figure 13*). La cinétique d’oxydation des sulfures (Aubertin *et al.*, 2002) ou la cinétique de relargage des métaux et métalloïdes est généralement influencée par plusieurs facteurs, tels que la catalyse bactérienne (Nordstrom, 2000; Baker and Banfield, 2003), la température (Éthier, 2011) et le pH (MEND, 1991).

Les mécanismes de génération du DNC sont souvent très proches de ceux du DMA (Aubertin *et al.*, 2015). Plus spécifiquement, le DNC résulte habituellement de réactions d’oxydation naturelles de minéraux sulfureux à des pH proches de la neutralité (MEND, 2004a; Plante, 2010). Ce dernier peut apparaître dans différentes conditions :

- Une présence suffisante de minéraux neutralisants (carbonates ou silicates) contrôlant l’acide généré durant l’oxydation des sulfures (MEND, 1993a; Sherlock *et al.*, 1995);

⁵ Le drainage contaminé provenant de résidus miniers cyanurés, radioactifs, contaminés par des composés organiques ou encore à risques élevés n’est pas pris en considération dans cette évaluation.

- Des eaux de drainage naturellement neutres, mais avec des concentrations en certains métaux (p. ex. : Cd, Mn, Ni, Pb, Zn) plus élevées que les normes, et ce, en raison de leur plus grande solubilité à des pH proches de la neutralité (Villeneuve, 2004; Cravotta, 2008);
- Des méthodes de restauration pour le contrôle du DMA, permettant une réduction de la génération d'acide. Néanmoins, il peut toujours y avoir des charges résiduelles en métaux ou encore les concentrations en métaux peuvent demeurer au-dessus des normes prescrites.

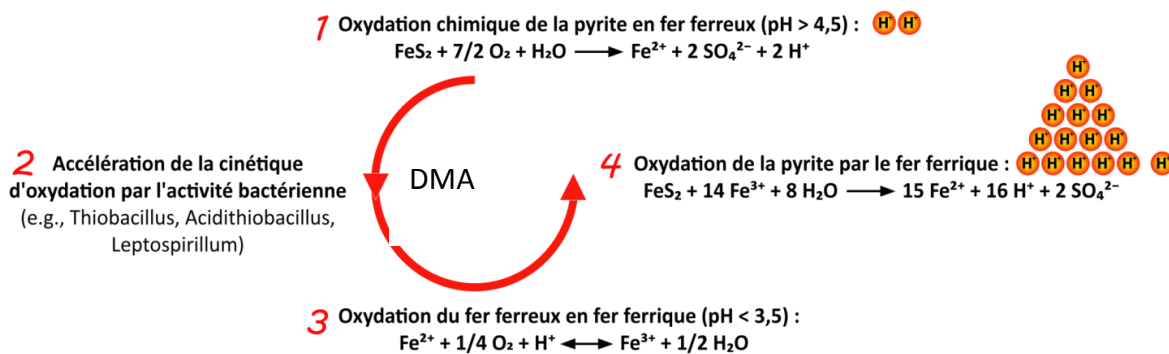


Figure 13 : Drainage minier acide : principales étapes dans le cas de la pyrite (FeS_2) (Aubertin *et al.*, 2002)

6.1.2 Méthodes de restauration des sites miniers

Indépendamment des possibilités de traitement⁶ (voir MEND, 2000; Johnson and Hallberg, 2005), le contrôle du DMA et du DNC est envisageable dès lors que l'une des trois composantes inhérentes aux réactions d'oxydation (eau–air–sulfure) est contrôlée (Aubertin *et al.*, 2002; Bussière *et al.*, 2005). Une telle opération sous-entend, généralement, la conception de systèmes de recouvrement basée sur des approches spécifiques aux caractéristiques du milieu concerné, plus particulièrement aux conditions climatiques locales et à la disponibilité des matériaux ayant les propriétés hydrogéologiques et géotechniques adéquates (figure 14).

6.1.2.1 Systèmes de recouvrement pour le contrôle du drainage minier contaminé

En climats semi-aride à aride, où l'évaporation potentielle est élevée et les précipitations annuelles faibles, les systèmes de recouvrement visent principalement à réduire les infiltrations des eaux météoriques vers les résidus miniers générateurs de drainage contaminé (*i.e.*, barrière à l'eau), alors qu'en climat humide, où l'évaporation potentielle est relativement faible par rapport aux précipitations annuelles élevées, ils visent d'abord à contrôler la migration de l'oxygène⁷ (*i.e.*, barrière à l'oxygène). En climat nordique, où les températures moyennes annuelles sont négatives et le pergélisol continu, le contrôle d'un drainage minier contaminé est communément basé sur le maintien à basse température des résidus réactifs, à l'aide de

⁶ Selon le guide en matière de restauration des sites miniers au Québec (MRN, 1997), les opérations de traitement sont généralement basées sur des techniques de décontamination spécifiques et ne sont pas considérées comme des méthodes de restauration à proprement parler.

⁷ Les systèmes de recouvrement permettant la réduction du flux d'oxygène sont essentiellement appliqués pour contrôler la production de DMA et sont généralement privilégiés en climat humide par rapport aux systèmes de recouvrement permettant la réduction des infiltrations d'eau.

recouvrements isolants faisant intervenir les propriétés thermo-hydriques des matériaux. Certaines techniques utilisées en climat plus tempéré (p. ex. : ennoïement, recouvrement étanche) sont également parfois utilisées pour contrôler le DMA en régions froides.

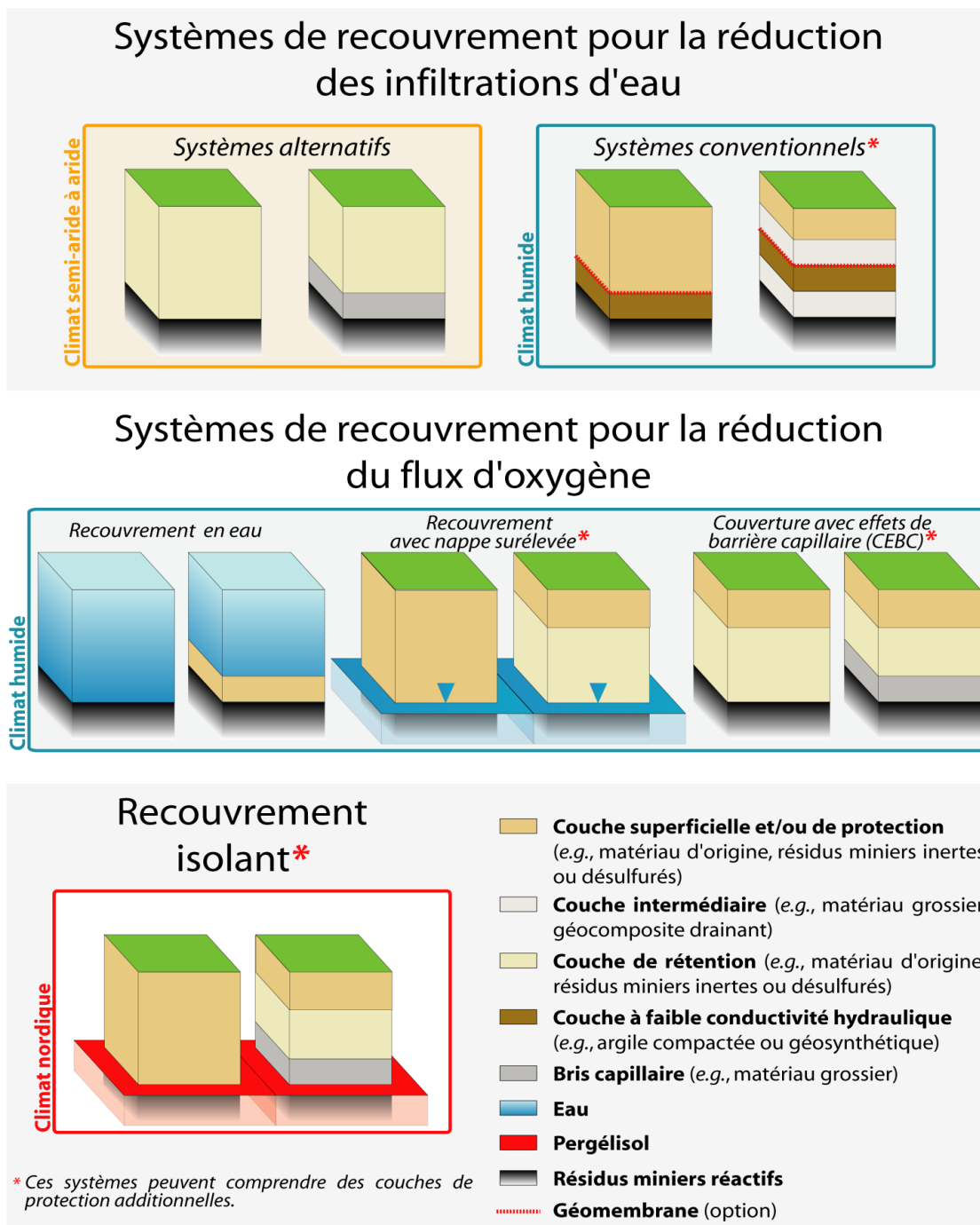


Figure 14 : Principaux systèmes de recouvrement pour le contrôle de drainage minier contaminé

Il est à noter que le choix d'un système applicable à un site contaminé est également contrôlé par d'autres facteurs, tels que le degré de complexité et les coûts de construction. En fonction de la taille du site, de l'approche envisagée, de la disponibilité des matériaux à proximité du site et du coût du transport, les coûts de construction d'un système de recouvrement peuvent augmenter de manière importante (pour plus d'information, voir Bussière *et al.*, 1999; Wilson *et al.*, 2003).

6.1.2.2 *Systèmes de recouvrement pour le contrôle de drainage contaminé par réduction des infiltrations d'eau*

Le contrôle de drainage contaminé par réduction des infiltrations d'eau est réalisé à partir de systèmes de recouvrement autrefois appelés « couvertures sèches » (Aubertin *et al.*, 1995; MEND, 2001; INAP, 2003). Les configurations de ces systèmes sont sensiblement similaires à celles développées depuis plusieurs décennies pour les recouvrements de sites d'enfouissement de déchets municipaux, industriels ou radioactifs (Daniel and Koerner, 2007). Deux catégories principales de recouvrement sont proposées : les systèmes conventionnels faisant intervenir des matériaux naturels et/ou géosynthétiques « imperméables » (barrière étanche) et les systèmes alternatifs, également connus sous les appellations anglaises « *store-and-release (SR) covers* », « *water balance covers* » et « *evapotranspiration (ET) covers* », basés exclusivement sur les interactions sol/atmosphère (processus physique d'évaporation ou biophysique d'évapotranspiration) et les propriétés non saturées de matériaux naturels.

Systèmes conventionnels⁸

Dans le cas des recouvrements conventionnels (Dwyer, 2003; Albright *et al.*, 2004, 2006, 2012), habituellement destinés à la restauration d'aires d'entreposage en climat humide, le modèle de base correspond à l'installation d'un matériau avec une faible perméabilité (p. ex. : argile ou till compacté, avec ou sans géomembrane) entre les résidus miniers réactifs et une couche superficielle favorable au développement d'une végétation pérenne offrant une protection contre l'érosion. Cette configuration, couramment appliquée au Québec⁹ pour la restauration des sites miniers, est aussi connue sous l'appellation anglaise « *Subtitle 'D' cover* » (Dwyer, 2003; EPA, 2011). Afin d'améliorer l'efficacité de ce modèle, une première couche intermédiaire peut être ajoutée entre les résidus réactifs et la couche à faible perméabilité pour empêcher les remontées capillaires d'eau contaminée ou limiter les interactions. Une deuxième couche intermédiaire, ou un géocomposite drainant avec une forte conductivité hydraulique saturée, peut également être installée entre la couche à faible perméabilité (protégée par une géomembrane) et la couche superficielle du recouvrement. L'objectif de cette dernière vise principalement à favoriser le drainage des infiltrations d'eau vers l'extérieur du système, tout en limitant l'assèchement de la couche à faible perméabilité par capillarité (pour plus d'information,

⁸ Les systèmes conventionnels disposent généralement d'une double protection contre les infiltrations d'eau : une couche d'argile compactée ainsi qu'une géomembrane. À noter qu'une couche d'argile synthétique, aussi appelée géocomposite bentonitique (GCB) peut remplacer la couche d'argile compactée au sein de ces recouvrements multicouches (*e.g.*, Albright *et al.*, 2004, 2013).

⁹ Dans la majorité des cas, les systèmes de recouvrement conventionnels appliqués au Québec comprennent seulement une géomembrane placée sur un géotextile placé directement sur les résidus miniers réactifs (Maurice, 2002).

voir Aubertin *et al.*, 1995). Cette configuration est également connue sous l'appellation anglaise « *Subtitle 'C' cover* » (Dwyer, 2003; EPA, 2011).

Systèmes alternatifs

Dans le cas des systèmes alternatifs (MEND, 1994; Dwyer, 2003; Albright *et al.*, 2004; Bossé, 2014), habituellement destinés aux climats semi-aride à aride, où l'évaporation potentielle est nettement supérieure aux précipitations annuelles, deux catégories de recouvrement sont distinguées: le modèle de base (monocouche) et le système avec bris capillaire. La monocouche correspond à l'installation d'un matériau fin¹⁰ directement sur les résidus miniers réactifs (Zhan *et al.*, 2001; Williams *et al.*, 2006; Keller *et al.*, 2011). Dans cette configuration, le matériau fin possède une épaisseur suffisante pour contrôler la percolation, une bonne capacité stockage/libération des eaux météoriques ainsi que des propriétés satisfaisantes pour l'implantation d'une végétation pérenne et son développement racinaire. Afin d'améliorer l'efficacité de ce type de recouvrement, un bris capillaire constitué d'un matériau grossier (gravier, sable ou stériles miniers) est parfois ajouté au-dessus des résidus miniers réactifs (Bossé *et al.*, 2013, 2015; Knidiri *et al.*, 2016). L'épaisseur de la couche de matériau fin est habituellement inférieure à celle des recouvrements monocouches. Les objectifs de ce bris capillaire sont doubles : améliorer la capacité stockage/libération des eaux météoriques et empêcher des interactions directes entre l'eau contaminée et le recouvrement par remontée capillaire.

6.1.2.3 Systèmes de recouvrement pour le contrôle de drainage contaminé par réduction du flux d'oxygène

En climat humide, où les précipitations annuelles sont importantes et l'évaporation potentielle relativement faible, le contrôle d'un drainage contaminé par réduction du flux d'oxygène est réalisé à partir de systèmes de recouvrement distincts. Sachant que le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est plus faible que dans l'air (environ 10 000 fois), cette approche implique l'utilisation de techniques permettant le maintien d'un haut degré de saturation d'eau au sein d'une des composantes des systèmes de recouvrement ou encore le recouvrement en eau des résidus.

Recouvrements en eau (voir études de cas site Lorraine – annexe 5)

La déposition de résidus miniers réactifs sous un recouvrement en eau (couverture aqueuse) représente une option efficace pour limiter la formation d'un drainage minier contaminé (Vigneault *et al.*, 2001; Kachhwal *et al.*, 2011; Awoh, 2012; Moncur *et al.*, 2015). L'approche consiste à maintenir une couverture d'eau directement au-dessus de rejets réactifs, afin d'empêcher leur oxydation (*figure 15*).

¹⁰ Plus le matériau possède une granulométrie fine et une k_{sat} faible, plus sa capacité de libération est faible (Bossé, 2014). Lors de la conception d'un recouvrement alternatif (contrairement à la CEBC), il est recommandé d'utiliser un matériau fin, avec une capacité de libération adaptée, pour favoriser le transfert de l'eau vers l'atmosphère.



Figure 15 : Méthode de restauration du recouvrement en eau¹¹ (adaptée d'Aubertin *et al.*, 1999)

Même si l'eau contient de l'oxygène dissous, les flux sont généralement assez faibles pour ne pas générer une contamination environnementale majeure. Deux techniques sont généralement distinguées : la déposition subaquatique, lorsque des résidus réactifs frais (non oxydés) sont déposés dans l'eau; l'ennoiement, lorsque des résidus entreposés dans un parc étanche (partiellement oxydés) sont submergés. En effet, quand bien même des fosses à ciel ouvert, des carrières ou des cavités souterraines pourraient être utilisées (sous certaines conditions¹²) afin de diminuer des possibles risques d'instabilités physiques (Aubertin *et al.*, 2002, 2015), cette méthode de restauration implique généralement la conception d'infrastructures adaptées (p. ex. : digues de confinement étanches, ouvrages de dérivation). De plus, un recouvrement en eau est un système dynamique complexe, où différents processus interdépendants peuvent affecter sa performance à long terme ainsi que la qualité de l'eau du recouvrement (p. ex. : mouvement de l'eau, transport de l'oxygène dissous jusqu'aux résidus réactifs, remise en suspension des particules, relargage des métaux dissous) (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). Il est à noter que la remise en suspension de particules fines provenant des résidus réactifs sous l'action du vent et des vagues peut être atténuée en ajoutant une couche de protection d'un matériau inerte (St-Arnaud, 1994; Awoh, 2012). Dans tous les cas, un bilan hydrique positif entre les apports (précipitations, ruissellement, recharge souterraine) et les pertes (évaporation, infiltration dans les aquifères) d'eau doit être assurée 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 de contrôler la génération de drainage minier contaminé, même en cas d'évaporation et de sécheresse.

Recouvrements avec nappe surélevée

La méthode de la nappe surélevée est une alternative à celle du recouvrement en eau. Le principe consiste à rehausser le niveau naturel d'une nappe phréatique afin de conserver les rejets réactifs à un état proche de la saturation hydrique, ce qui permet de réduire la diffusion de l'oxygène, donc la formation d'un drainage contaminé (MEND, 1996; Nicholson and Tibble, 1995; Tibble and Nicholson, 1997; Aubertin *et al.*, 1999; Dagenais, 2005; Ouangrawa *et al.*, 2006, 2009, 2010; Ouangrawa, 2007; Demers, 2008; Cosset, 2009; Pabst *et al.*, 2014; Éthier, 2016). En effet, les

¹¹ La couche de protection est facultative pour la méthode du recouvrement en eau.

¹² Le requérant d'un CA doit démontrer, par une étude de modélisation, que les mesures d'étanchéité mises en place permettront d'éviter toute dégradation significative de la qualité de l'eau souterraine, à défaut de quoi un changement de site ou encore une nouvelle conception du mode de gestion des résidus miniers est nécessaire (Directive 019, §2.9).

résidus réactifs sont généralement déposés au sein d'un parc imperméable, où la nappe peut être maintenue soit à la surface des rejets soit à une profondeur légèrement inférieure (figure 16). Lorsque la nappe phréatique est maintenue à une faible profondeur sous la surface des rejets, l'efficacité de cette méthode de restauration dépend alors des propriétés hydrogéologiques des résidus réactifs. Pour favoriser la remontée capillaire de l'eau, les résidus doivent posséder une granulométrie fine ainsi qu'une conductivité hydraulique saturée relativement faible. Pour une efficacité optimale, la profondeur théorique de la nappe phréatique doit être inférieure (Ouangrawa, 2007) à la valeur d'entrée d'air (AEV) des résidus, afin de les conserver (par capillarité) dans un état proche de la saturation et de réduire le flux d'oxygène.

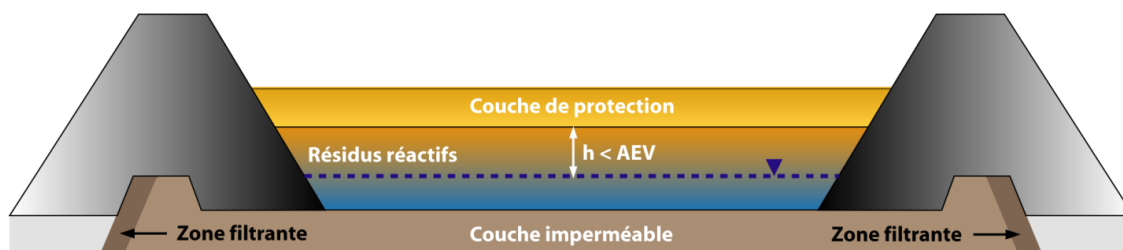


Figure 16 : Méthode de restauration de la nappe surélevée (à faible profondeur et avec monocouche) (adaptée d'Aubertin *et al.*, 1999)

Toujours dans le but d'améliorer l'efficacité de cette méthode de restauration (monocouche avec nappe surélevée), il est d'usage de recouvrir les résidus miniers réactifs avec une couche de protection (sable ou gravier) pour empêcher l'érosion et la possible remontée d'eau contaminée (par capillarité) provenant des résidus réactifs pour diminuer les effets de l'évaporation, pour réduire le ruissellement de surface en maximisant les infiltrations et pour favoriser l'implantation d'une végétation pérenne (Dagenais *et al.*, 2006). Il est à noter qu'un matériau à granulométrie fine peut aussi être utilisé comme matériau de recouvrement (couche de protection). Dans cette configuration, le matériau fin doit posséder une épaisseur suffisante et une bonne capacité de stockage pour maintenir en permanence (notamment par capillarité et sans une alimentation régulière d'eau) un haut degré de saturation hydrique ($> 85 \%$).

Concrètement, trois approches peuvent être appliquées pour élever le niveau d'une nappe phréatique lorsque celui-ci n'est pas suffisamment haut (Day *et al.*, 1996; MEND, 1996; Orava *et al.*, 1997; Ouangrawa, 2007; Cosset, 2009) :

- Une modification du bilan hydrique (p. ex. : dérivation d'un point d'eau vers le site; diminution de l'évaporation);
- Une augmentation de la capacité de rétention des résidus (p. ex. : densification, ajout d'un liant);
- Une diminution de l'écoulement latéral et vertical (p. ex. : ajout de frontières imperméables).

L'avantage de cette méthode de restauration par rapport aux recouvrements en eau est qu'elle nécessite des digues de confinement moins élevées ainsi qu'une quantité d'eau moins importante (pressions interstitielles plus faibles). Il est à noter qu'une nappe surélevée permet également de réduire les risques d'érosion, de possibles ruptures de digues attribuables à des

pressions interstitielles trop élevées ou encore de débordements en crête (pour plus d'information, voir Aubertin *et al.*, 2015).

Couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) (voir étude de cas site LTA – annexe 5)

Comme dans le cas des recouvrements alternatifs recommandés en climats semi-aride à aride, des systèmes relativement similaires, constitués de matériaux naturels avec des propriétés hydriques spécifiques, sont également proposés en climat humide. Le principe de base de ces systèmes, appelés CEBC, repose sur les propriétés des matériaux non saturés, afin de limiter la diffusion de l'oxygène (et non réduire les infiltrations d'eau) jusqu'aux rejets générateurs d'un drainage contaminé. Les principales différences avec les systèmes alternatifs concernent les propriétés hydriques du matériau à granulométrie fine ainsi que la présence d'une couche de protection (sable ou gravier avec une AEV faible et une k_{sat} élevée) située à la surface des recouvrements pour diminuer les effets de l'évaporation, limiter l'érosion, réduire le ruissellement ainsi que favoriser l'implantation d'une végétation pérenne et son développement racinaire.

Concrètement, une CEBC correspond à la superposition d'un matériau à granulométrie fine (typiquement un matériau silteux) au-dessus des résidus miniers réactifs à granulométrie plus grossière (Zhan *et al.*, 2001, 2014). Dans cette configuration, le matériau à granulométrie fine possède une épaisseur suffisante et une bonne capacité de stockage des eaux météoriques pour maintenir en permanence (sans une alimentation régulière d'eau) un haut degré de saturation (> 85 %). La couche de matériau à granulométrie fine, dont les pores sont remplies d'eau, limite le passage de l'oxygène, réduisant ainsi la possibilité d'oxyder les minéraux sulfureux sous-jacents et, par conséquent, la formation d'un drainage contaminé (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'améliorer l'efficacité de ce type de recouvrement, un bris capillaire (discontinuité hydraulique), constitué d'un matériau grossier (gravier, sable ou stériles miniers avec une AEV faible et une conductivité hydraulique élevée), est communément ajouté au-dessus des résidus miniers réactifs. Le contraste plus important des propriétés hydriques des différentes couches permet alors d'améliorer la capacité de stockage et d'empêcher des interactions directes entre l'eau contaminée provenant des résidus réactifs (par remontée capillaire) et le recouvrement. Un des avantages de cette méthode de restauration est qu'elle peut être utilisée indépendamment du fait que le niveau phréatique soit loin (quelques mètres) ou proche du matériau à granulométrie fine.

6.1.2.4 Recouvrements isolants

En climat nordique, où les températures moyennes annuelles sont négatives et où le pergélisol est continu, les systèmes de recouvrement isolant (voir *figure 17*) sont considérés comme une option efficace pour contrôler la formation d'un drainage minier contaminé (MEND, 2004b, 2009).

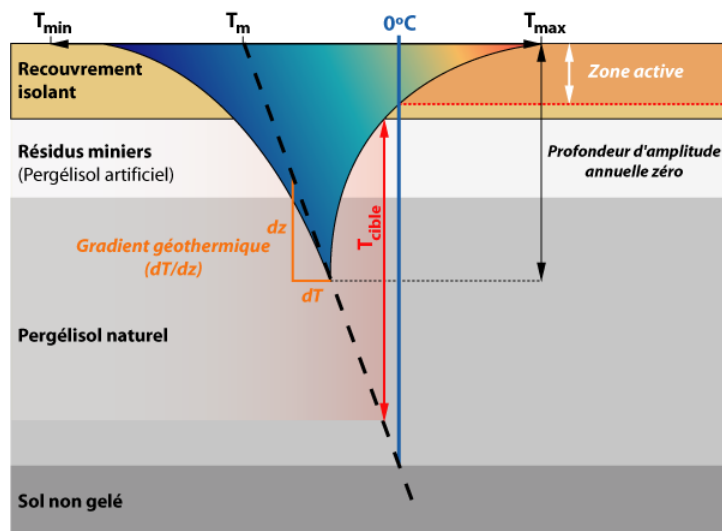


Figure 17 : Profil des températures associé aux recouvrements isolants
(adaptée d'Andersland and Ladanyi, 2004)

Le principe fondamental de ces derniers consiste simplement à intégrer les résidus miniers réactifs au sein du 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, 2015). Ce type de recouvrement mise donc sur les propriétés thermo-hydriques des matériaux, sachant qu'à faible température ($T_{\text{cible}} < -2$ à -5 °C), la cinétique d'oxydation des sulfures est presque nulle¹³ et les écoulements d'eau sont limités, ce qui permet de contrôler les risques de contamination dans l'environnement. En effet, la performance des recouvrements isolants dépend des conditions ambiantes et du maintien du pergélisol à long terme. Afin d'empêcher le dégel des résidus réactifs durant le réchauffement saisonnier, de limiter l'érosion et de favoriser l'implantation d'une végétation pérenne, une couche superficielle, constituée de matériaux inertes, est généralement ajoutée (le recouvrement isolant). Pour une meilleure isolation, cette couche comprend généralement un matériau à granulométrie fine partiellement saturé au-dessous d'un matériau à granulométrie plus grossière (pour plus d'information, voir Arenson and Sego, 2007; MEND, 2009; Pham *et al.*, 2009; Coulombe, 2012). L'ajout de cette couche isolante influence la performance du système en modifiant le profil thermique et hydrique des résidus et permet de contrôler la formation d'un drainage minier contaminé. Il est à noter que Boulanger-Martel (2015) a proposé une amélioration de la couche de protection (*i.e.*, en incluant le concept de la CEBC utilisée en climat humide pour réduire la diffusion de l'oxygène vers les rejets réactifs, afin de garantir la performance du système durant le réchauffement saisonnier, voire d'un réchauffement climatique global.

¹³ Des travaux récents ont montré que certains rejets miniers peuvent quand même s'oxyder à des températures inférieures à 0°C (Elberling, 2001, 2005; Éthier, 2011).

6.1.3 Facteurs influençant la performance des méthodes de restauration à long terme

Plusieurs facteurs pouvant affecter la performance à long terme des systèmes de recouvrement sont habituellement pris en considération dès leur conception (voir Aubertin *et al.*, 2002; 2015). Parmi ces facteurs, il est possible de distinguer :

- l'effet de la géométrie (p. ex. : limite de bas de pente) et de l'épaisseur des couches;
- l'effet des cycles gel/dégel sur les propriétés des matériaux meubles (*i.e.*, conditions de température);
- l'effet de cycles mouillage/séchage sur les propriétés des matériaux meubles (p. ex. : effet du retrait, phénomène de dessiccation, effet d'hystérésis);
- l'instabilité des parties inclinées (*i.e.*, le glissement des pentes ou leur déplacement différé);
- l'instabilité liée aux tassements totaux et différentiels;
- l'influence du changement des propriétés des matériaux dans le temps en fonction des conditions d'exposition (p. ex. : liquéfaction, induration);
- l'influence des événements extrêmes (p. ex. : CMP, PMP, sécheresse) et de la physiographie du bassin versant à l'échelle locale;
- la résistance à l'érosion interne et de surface (hydrique et/ou éolienne);
- la résistance aux bio-intrusions (*i.e.*, racines, insectes, animaux) et autres activités anthropiques;
- la résistance aux déformations induites par les séismes ou par d'autres sollicitations dynamiques.

Bien que les effets des changements climatiques soient généralement ignorés lors de la conception des systèmes de recouvrement, les principaux matériaux constitutifs sont, quant à eux, scrupuleusement sélectionnés afin d'assurer leur performance à long terme (≈ 100 ans). Toutefois, et sachant que la majorité de ces systèmes de recouvrement ont été développés durant les dernières décennies, l'information concernant la performance des méthodes de restauration à long terme n'est pas encore toute disponible.

6.2 Identification des principaux impacts et risques associés aux changements climatiques pour les méthodes de restauration des sites miniers

Les sources de risques face aux changements climatiques pour les différentes méthodes de restauration présentées dans cette section sont illustrées ci-dessous; les sources principales sont encadrées en jaune avec fond noir.

6.2.1 Systèmes alternatifs

La méthode de restauration basée sur l'utilisation de systèmes alternatifs (*figure 18*), plus communément utilisée en climats semi-aride à aride pour réduire les infiltrations d'eau jusqu'aux rejets générateurs de drainage contaminé, est ici jugée inadaptée aux conditions climatiques actuelles du Québec. Cependant, ces systèmes ont récemment été proposés sous des conditions climatiques nordiques (MEND, 2012), et ce, en raison des faibles précipitations annuelles

(≤ 200 mm/an)¹⁴. En admettant que le réchauffement climatique global provoquerait uniquement une augmentation de l'évaporation potentielle dans les années à venir (de l'ordre de 145 à 220 mm/an – Ouranos, 2014), cette méthode de restauration pourrait effectivement être appropriée dans le cas où le recouvrement posséderait une capacité de libération élevée.



Figure 18 : Sources de risques pour les systèmes alternatifs de recouvrement face aux changements climatiques

Toutefois, dans le contexte des changements climatiques au Québec, une augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes) est prévue, ce qui rendrait plus difficile le contrôle de la percolation profonde (capacité de stockage insuffisante) et, par conséquent, de la génération d'un drainage contaminé.

6.2.1.1 Systèmes conventionnels

Les sources de risques pour les systèmes conventionnels (*figure 19*) sont relativement similaires à celles des systèmes alternatifs présentés ci-dessus; un accroissement des précipitations moyennes et extrêmes augmenterait les risques de percolation profonde et la génération d'un drainage contaminé.

Les autres sources de risques concernent essentiellement l'intégrité à plus ou moins long terme de certaines de leurs composantes principales (p. ex. : couche d'argile compactée, géomembrane, GCB). En effet, il est bien connu que la durabilité des géomembranes peut être affectée par la température, des attaques chimiques ou biologiques, des effets de rayonnement ou des cycles de gel/dégel (e.g., Take *et al.*, 2007; Brachman, 2011; Koerner, 2012; Rowe *et al.*, 2012, 2014, 2015).

¹⁴ Il est à noter que, pour ces conditions, les faibles taux d'évapotranspiration potentielle (ETP entre 125 et 475 mm/an – MEND 2012) peuvent indubitablement remettre en question cette utilisation, d'autant plus lors d'événements de précipitations extrêmes. En climats semi-aride à aride, où ces systèmes sont généralement préconisés, l'ETP est nettement supérieure à 500 mm/an (Bossé, 2014).

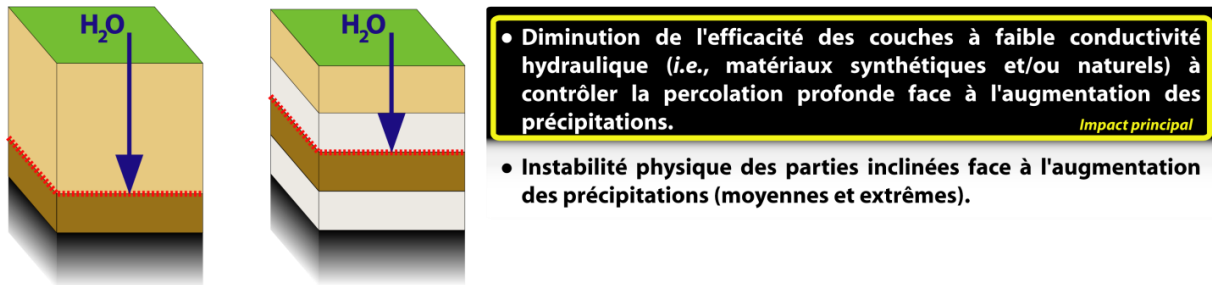


Figure 19 : Sources de risques pour les systèmes conventionnels face aux changements climatiques

Généralement, l'évaluation de la performance de ces systèmes de recouvrement assume une fréquence typique de défauts par hectare (pour plus d'information, voir Giroud, 1984; Giroud et Bonaparte, 1989; Giroud *et al.*, 1997). Il est à noter que cette évaluation est fonction de la charge hydraulique appliquée sur la géomembrane. Le taux de percolation d'un recouvrement peut notamment être estimé à partir de l'équation ci-dessous :

$$Q = 0,6a\sqrt{2gh} \quad [1]$$

Où : Q , taux de percolation (m^3/s); a , surface d'un défaut (m^2); g , accélération de la pesanteur ($9,8 \text{ m/s}^2$); h , charge hydraulique (m).

Toutefois, Albright *et al.* (2012) ont récemment proposé une équation¹⁵ (2) permettant d'estimer directement la percolation annuelle de ces systèmes (à double protection) à partir des précipitations annuelles.

$$P_r = 0,01(P - 400) \quad [2]$$

Où : P_r , percolation (mm/an); P , précipitations (mm/an).

Bien que le maintien de l'intégrité physique à long terme de ce type de barrières soit un défi important (p. ex. : retrait attribuable aux cycles de mouillage/séchage, effets des cycles gel/dégel, subsidence), on ne prévoit pas que les changements climatiques aggraveront cette situation. Cependant, en comparaison avec les systèmes alternatifs constitués uniquement de matériaux naturels et face à une augmentation des précipitations (moyennes et extrêmes), on pourrait constater une augmentation de l'instabilité physique des systèmes de recouvrement sur les parties inclinées (pour plus d'information, voir Aubertin *et al.*, 1995, 2002, 2015; Daniel and Koerner, 1998; Albright *et al.*, 2004, 2006, 2012; Rowe, 2005; Rowe *et al.*, 2012).

6.2.2 Recouvrements en eau

Dans le cas des recouvrements en eau (*figure 20*), permettant la réduction du flux d'oxygène jusqu'aux rejets générateurs d'un drainage contaminé, les sources principales de risques

¹⁵ Cette équation est plus particulièrement proposée pour des climats humides, où les précipitations sont supérieures à 400 mm.

concernent essentiellement la stabilité de la couche aqueuse et l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes.



Figure 20 : Sources de risques pour les recouvrements en eau face aux changements climatiques

En effet, une diminution temporaire de l'épaisseur de la couche aqueuse (généralement de 1 m), en raison d'une augmentation des températures en périodes sèches, favoriserait la remise en suspension des résidus miniers réactifs en l'absence d'une couche de protection et, par conséquent, la génération d'un drainage contaminé (figure 21). De plus, une augmentation de la fréquence des événements extrêmes (p. ex. : précipitations et vents violents) pourrait également permettre cette remise en suspension, notamment sous l'action des vagues et des mouvements de l'eau (Adu-Wusu *et al.*, 2001; Catalan and Yanful, 2002; Mian and Yanful, 2003).

Concernant les ouvrages de rétention associés à cette méthode de restauration, et ce, bien que la revanche minimale d'une digue de rétention soit généralement fixée à 1,5 m (MDDEP, 2012), l'augmentation des précipitations dans le contexte des changements climatiques au Québec pourrait accroître les risques de débordement ou de rupture de digues en raison de pressions interstitielles plus élevées et, donc, affecter la stabilité physique de ces ouvrages. Il est à noter que, dans le cas de la technique de déposition subaquatique dans des carrières ou des cavités souterraines, les risques d'instabilités physiques sont moindres.

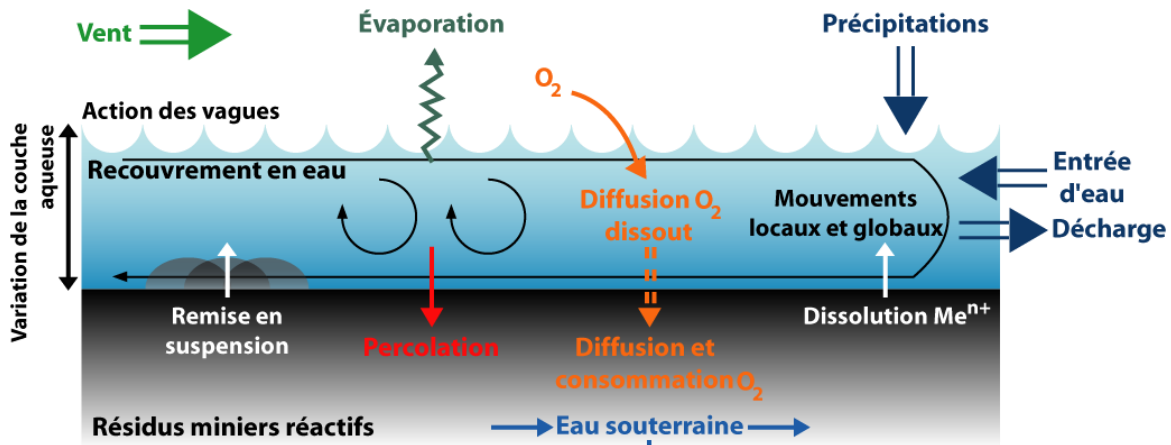


Figure 21 : Processus affectant l'efficacité des recouvrements en eau (Li *et al.* 1997)

Face à une diminution généralisée des périodes de récurrence des événements de précipitations dans les années à venir¹⁶, et sachant que les réseaux de drainage sont actuellement conçus en considérant des événements extrêmes avec des périodes de retour basées sur le climat actuel, les quantités d'eau à gérer pourraient devenir problématiques dans le contexte des changements climatiques.

6.2.2.1 Recouvrements avec nappe surélevée

Dans le cas des systèmes de recouvrement avec nappe surélevée (figure 22), permettant la réduction du flux d'oxygène vers les rejets générateurs d'un drainage contaminé, les sources de risques sont relativement similaires à celles des recouvrements en eau. À ces préoccupations s'ajoutent la stabilité de la nappe phréatique et les taux de saturation des résidus miniers.

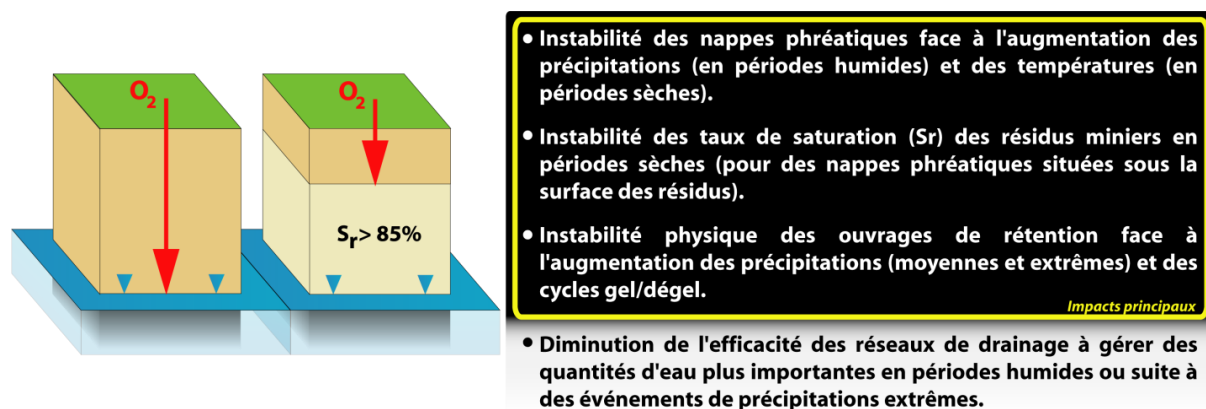
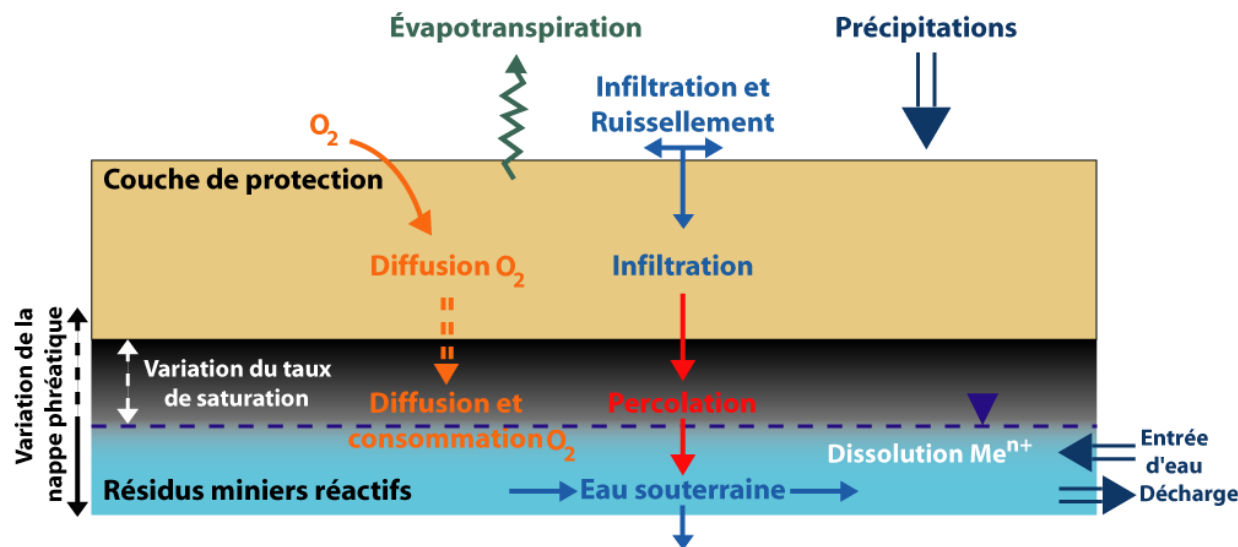


Figure 22 : Sources de risques pour les recouvrements avec nappe surélevée face aux changements climatiques

Même si l'augmentation des précipitations moyennes aura un impact favorable sur la performance de cette technique, il se peut que les périodes de sécheresse plus longues et l'évapotranspiration plus importante l'été affectent la performance durant cette période. En effet, un abaissement de la nappe phréatique située sous la surface des résidus (si la profondeur de la nappe est supérieure à l'AEV des résidus), en raison de l'augmentation des températures en périodes sèches (taux d'évaporation plus élevé), provoquerait une diminution de la saturation (figure 23) (Ouangrawa, 2007, Demers, 2008). Cette diminution de la saturation des résidus réactifs favoriserait alors l'oxydation des minéraux sulfureux et, par conséquent, la formation d'un drainage contaminé.

¹⁶ Pour un événement de précipitation actuel qui reviendrait tous les 20 ans, sa période de retour pourrait chuter jusqu'à 12,5 ans (Ouranos, 2014).



Toujours dans le contexte des changements climatiques au Québec, et comme pour les recouvrements en eau, une augmentation des précipitations et de la fréquence des événements extrêmes pourrait également affecter la stabilité des ouvrages de rétention (à un degré moindre) en raison de pressions interstitielles potentiellement plus élevées, ainsi que l'efficacité des réseaux de drainage à gérer des quantités d'eau plus importantes.

6.2.3 Couvertures avec effets de barrière capillaire (CBEC)

Dans le cas des couvertures avec effets de barrière capillaire (figure 24), permettant la réduction du flux d'oxygène jusqu'aux rejets réactifs, les sources de risques concernent l'intégrité de la couche à granulométrie fine et du bris capillaire. En effet, la performance de ces systèmes de recouvrement à long terme est fonction du taux de saturation du matériau fin, permettant la réduction du flux d'oxygène (Nicholson *et al.*, 1989; Bussière *et al.*, 2003, 2007).

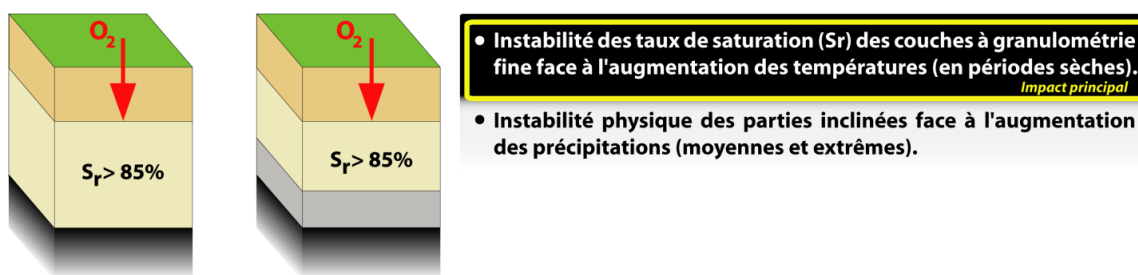


Figure 24 : Sources de risques des couvertures avec effets de barrière capillaire face aux changements climatiques

Dans le contexte des changements climatiques au Québec et indépendamment de la couche de protection, une augmentation des températures en périodes sèches (taux d'évaporation plus élevé) risquerait de diminuer temporairement le taux de saturation de la couche à granulométrie fine et pourrait affecter l'efficacité du système à contrôler la production de drainage contaminé. À l'inverse, une augmentation des précipitations en périodes humides garantirait un taux de

saturation élevé. Il est à noter qu'un accroissement des cycles mouillage/séchage et des précipitations (moyennes et extrêmes) pourrait toutefois nuire à la stabilité physique des parties inclinées des ouvrages.

6.2.4 Recouvrements isolants

Dans le cas des recouvrements isolants (figure 25), et ce, en regard du réchauffement climatique global, les sources de risques concernent la zone active sujette aux interactions sol/atmosphère et la stabilité du pergélisol.

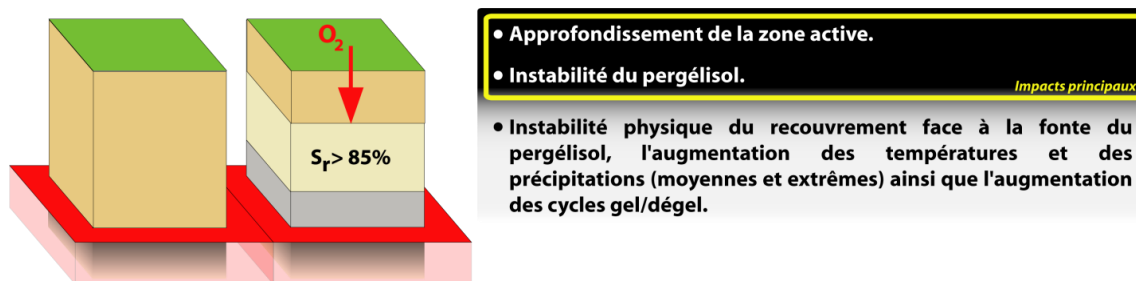


Figure 25 : Sources de risques pour les recouvrements isolants face aux changements climatiques

En effet, indépendamment de la couche superficielle, une augmentation des températures de l'air et un accroissement des précipitations favoriseraient un approfondissement progressif de la zone active et la fonte du pergélisol (Coulombe, 2012; Boulanger-Martel, 2015). Cet approfondissement exposerait alors les résidus réactifs à des températures plus élevées, favorables à l'oxydation des minéraux sulfureux et, par conséquent, à la formation d'un drainage minier contaminé, dont le volume serait augmenté par les précipitations. De plus, la fonte du pergélisol augmenterait également les écoulements d'eau vers les résidus réactifs.

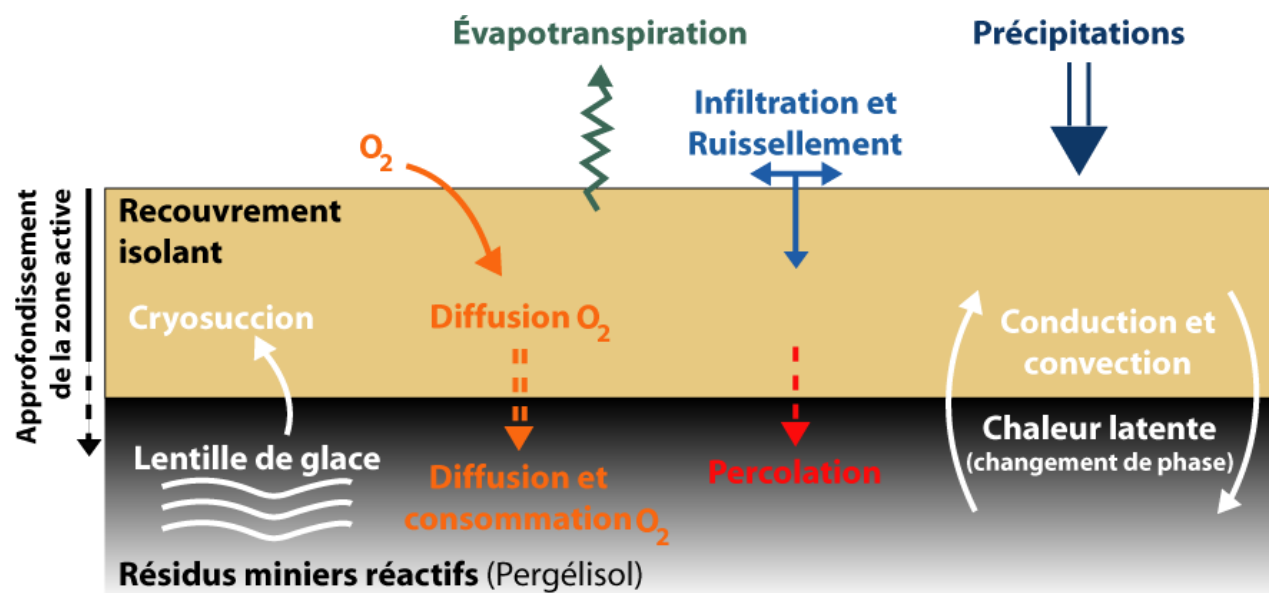


Figure 26 : Processus affectant l'efficacité des recouvrements isolants (adaptée de Coulombe, 2012)

Dans le contexte des changements climatiques au Québec, c'est-à-dire avec des variations annuelles de la température de l'air et des précipitations plus importantes, des instabilités physiques de premier ordre pourraient également avoir lieu (tassement, consolidation, fissuration, soulèvement) et réduiraient considérablement l'efficacité du recouvrement.

6.2.5 Autres sources de risques

D'autres sources de risques concernant les méthodes de restauration des sites miniers pourraient également être citées. Dans le cas des recouvrements, la mise en végétation est un facteur important, permettant généralement de contrôler l'érosion (hydrique et éolienne), mais également de redonner au site minier son aspect naturel. En effet, la restauration des sites miniers doit répondre aux exigences du guide proposé par MERN (2016). Cependant, dans le contexte des changements climatiques, une modification des espèces végétales pourrait être constatée. Dans certains cas, l'apparition et la multiplication de nouvelles espèces pourraient affecter la performance à long terme des recouvrements (bio-intrusions).

6.3 Analyse qualitative des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques pour la restauration des sites miniers

Tel que décrit au chapitre 4, une enquête portant sur le niveau de risque associé aux principaux impacts anticipés des changements climatiques pour le secteur minier a été réalisée auprès d'experts du secteur. En ce qui concerne spécifiquement la restauration des sites miniers, quatorze experts de ce domaine ont participé à cette enquête. Les questionnaires qui ont été soumis aux participants les ont amenés à se prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci. L'analyse de leurs réponses a donc permis d'évaluer qualitativement le niveau de risque associé aux principaux impacts des changements climatiques en se basant sur la matrice présentée précédemment (*figure 3*).

Un comité d'experts a par la suite évalué le niveau de vulnérabilité du secteur minier par rapport à ces principaux impacts, c'est-à-dire qu'ils ont évalué la propension du secteur minier à être affecté de manière négative par les impacts des changements climatiques ainsi que sa capacité à réagir ou à s'adapter à ceux-ci.

Les résultats de l'analyse qualitative des principaux risques des impacts des changements climatiques et la vulnérabilité du secteur minier face à ceux-ci sont présentés dans la prochaine section.

6.3.1 Diminution de la performance des recouvrements isolants

Mise en contexte

L'augmentation des températures moyennes, le raccourcissement de la durée de l'hiver et la diminution du nombre de jours de gel pourraient mener à la fonte du pergélisol dans certaines régions et à l'augmentation des zones actives. Cela pourrait mener au dégel et à l'exposition des résidus entreposés dans le pergélisol, provoquant ainsi la génération de drainage minier contaminé (acide ou neutre) dans un environnement particulièrement sensible. Ce phénomène

s'applique seulement à la région où l'entreposage des résidus dans le pergélisol est continu et l'utilisation d'un recouvrement isolant est de mise, soit le Grand-Nord.

6.3.1.1 Niveau de risque

Sur une période d'une soixantaine d'années (2020-2080), le consensus des participants place le niveau de risque à **élevé** en ce qui concerne le risque de perte de performance des recouvrements isolants.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		GN		
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

GN : Grand Nord

Probabilité d'occurrence

- **Probable** : Plus de chances de se produire que de ne pas se produire.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation seront affectées.

Vulnérabilité

Le recouvrement isolant est utilisé exclusivement dans le Grand-Nord où, dans un contexte de changement climatique, l'augmentation des températures moyennes annuelles est la plus importante. Beaucoup d'incertitudes règnent donc sur la performance à moyen et long termes de cette technique. Cela laisse présager que, si des mesures correctives ne sont pas apportées, des sites restaurés avec cette méthode risqueraient de perdre significativement de leur efficacité et, ainsi, de générer de graves impacts environnementaux.

Afin d'adapter cette technique au réchauffement du climat, l'épaisseur du recouvrement isolant devrait être augmentée significativement. Étant donné l'étendue des parcs à résidus, cela pourrait représenter des coûts importants, sans compter que, dans le Grand-Nord, il est souvent difficile d'avoir accès aux matériaux nécessaires pour cette augmentation de l'épaisseur du recouvrement. Il est possible de croire qu'il faudrait ultimement recourir carrément à une autre méthode de restauration ou encore à l'ajout d'une méthode complémentaire pour arriver aux performances voulues. De tels travaux représenteraient également des coûts supplémentaires pour les responsables du site. Pour toutes ces raisons, la vulnérabilité de cette méthode est donc jugée **très élevée** par rapport aux changements climatiques.

6.3.2 Dommages aux matériaux de recouvrement attribuables à la fonte du pergélisol

Mise en contexte

L'augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de mouvements de terrain qui pourraient entraîner des dommages aux matériaux de recouvrement (p. ex. : géomembranes, couche d'argile), provoquant des infiltrations et exposant les résidus miniers qui, ultimement, pourraient générer des problèmes de drainage minier contaminé. Cette situation s'applique seulement aux régions où on retrouve du pergélisol, soit le Grand-Nord et la Fosse du Labrador.

Niveau de risque

Sur une période d'une soixantaine d'années (2020-2080), le consensus des participants place le niveau de risque à **modéré** pour les deux régions concernées, en ce qui a trait aux risques de dommages aux matériaux de recouvrement attribuables à la fonte du pergélisol.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable		GN - FL		
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
Gravité des conséquences					

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : possibilité que quelques sites restaurés subissent une défaillance des matériaux de recouvrement.

Gravité des conséquences

- *Modérée* : réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation seraient affectées.

Vulnérabilité

Même sous les conditions climatiques actuelles, sans considération des changements climatiques, les résidus miniers subissent des tassements, ce qui peut entraîner des dommages aux matériaux de recouvrement et, par conséquent, des pertes de performance de ceux-ci. Il s'agit donc d'une situation avec laquelle le secteur compose déjà. Néanmoins, la fonte du pergélisol et l'augmentation des zones actives amplifieront davantage ce phénomène. Dans certains cas, les techniques de recouvrement utilisées pourraient ne pas fonctionner tel que prévu au moment de la conception de la restauration du site. Dans un contexte de restauration, le suivi et la supervision sont moins réguliers, comparativement à la période d'exploitation du site. La vulnérabilité du secteur minier par rapport aux risques de dommages aux matériaux de recouvrement attribuables à la fonte du pergélisol est donc évaluée à **modérée**.

6.3.3 Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

Dans la région du Grand-Nord et au nord de la fosse du Labrador, l'augmentation des températures moyennes provoquera, à certains endroits, la fonte d'une partie du pergélisol et l'augmentation des zones actives. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de rétention.

Niveau de risque

Sur une période d'une soixantaine d'années (2020-2080), le consensus des participants place le niveau de risque à **élevé** pour les deux régions concernées.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable			GN	
	Rare			FL	
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : Possibilité de défaillances (p. ex. : pourrait se produire à une fréquence d'une fois aux 50 ans);
- *Probable* : Plusieurs ouvrages de rétention ne seront pas en mesure de maintenir leur stabilité; plusieurs subiront une défaillance (p. ex. : pourrait se produire à une fréquence d'une fois aux 10 ans).

Gravité des conséquences

- *Élevée* : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus).

Vulnérabilité

Lors de la déposition des résidus dans les aires d'accumulation, un certain dégel du pergélisol se produit généralement, en raison du contact entre ce pergélisol et les résidus non gelés. Cependant, en période post-opération, le pergélisol reprend graduellement sa place, ce qui devrait limiter le risque à long terme. Si de l'eau, qui est une source de chaleur qui peut dégrader le pergélisol, doit être stockée dans des bassins utilisant le pergélisol comme structure imperméable, il est possible que les changements climatiques accélèrent cette dégradation. Puisque l'industrie minière doit construire des ouvrages qui tiennent compte de cette dégradation temporaire du pergélisol, elle est en mesure de faire un suivi adapté de ses ouvrages (durant et après l'exploitation) et, ainsi, procéder à des correctifs en cas de besoin. Cependant, l'incertitude liée aux changements climatiques rend difficile la prédiction du phénomène. Suite à cette analyse, il est jugé que le niveau de vulnérabilité en lien avec l'instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol est **modéré**.

6.3.4 Capacité insuffisante des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue

Mise en contexte

Les projections climatiques prévoient que l'intensité et la fréquence des précipitations abondantes et extrêmes augmenteront pour toutes les régions minières, tout comme les précipitations annuelles moyennes. Certains modes de restauration exigent l'entreposage de volumes d'eau, tels que le recouvrement en eau ou la méthode de la nappe surélevée. Ces méthodes impliquent la présence de déversoir et/ou d'évacuateurs de crue. Or, dans un contexte de changements climatiques, il serait possible que des déversoirs et des évacuateurs de crue opèrent à leur capacité maximale et même plus. De telles situations génèreraient des risques environnementaux par rapport aux probabilités qu'il y ait des débordements et des relargages de rejets liquides et solides dans l'environnement. Il faut considérer que, pour les sites déjà restaurés, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques.

Niveau de risque

Pour les régions de la Côte-Nord, de Matagami-Chibougamau et de la Baie-James, il n'y a pas eu de consensus sur la gravité des conséquences, qui varie entre *modérée* et *élevée*. Par contre, un consensus a été établi sur la probabilité d'occurrence, qui est jugée *probable*. Le risque est donc jugé *élevé* pour toutes les régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		GN	A-FL	
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			
A : Abitibi		FL : Fosse du Labrador		GN : Grand-Nord	

Probabilité d'occurrence

- *Probable* : Plusieurs sites restaurés n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.

Gravité des conséquences

- *Modérée* : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.
- *Élevée* : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus).

Vulnérabilité

Les ouvrages existants ont été conçus avec des critères qui ne tiennent pas compte des changements climatiques. Néanmoins, il est toujours possible d'apporter des correctifs à la

conception originale, mais une fois déjà construits, il est difficile et coûteux de réaliser de tels travaux. De plus, il est difficile de prévoir comment évoluera dans le temps l'ampleur des événements extrêmes, et aucun critère de conception tenant compte des changements climatiques n'est présentement disponible. Pour ces raisons, la vulnérabilité du secteur minier, quant aux risques associés à l'insuffisance des capacités des déversoirs et/ou d'évacuateurs de crue, est évaluée à **élevée**.

6.3.5 Défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés

Mise en contexte

Certains modes de restauration exigent la présence de digues de retenue, notamment le recouvrement en eau et la nappe surélevée. L'augmentation des précipitations moyennes, et surtout des événements extrêmes de précipitations, pourrait générer des pressions sur les ouvrages de retenue tels que les digues des parcs à résidus. Il faut également considérer que, pour les sites déjà restaurés, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Cela génère des risques environnementaux par rapport aux probabilités qu'il y ait des défaillances des ouvrages de retenue et, par conséquent, des relargages de rejets liquides et solides dans l'environnement. On entend par défaillance tout bris qui entraîne une fuite plus ou moins importante de liquide et/ou de matériel solide.

Niveau de risque

Le niveau de risque est jugé **élevé** pour toutes les régions. Cependant, les réponses des participants n'ont pas permis d'établir un consensus sur la probabilité d'occurrence pour la région de la fosse du Labrador. Néanmoins, comme les réponses pour cette région variaient toutes entre *peu probable* et *probable* et que la gravité des conséquences est jugée *élevée*, le risque est jugé également **élevé** pour la région de la fosse du Labrador.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable			A-BJ-MC- GN-CN	
	Peu Probable				
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			
A : Abitibi BJ : Baie-James		CN : Côte-Nord GN : Grand-Nord		MC : Matagami-Chibougamau	

Probabilité d'occurrence

- *Probable* : Plusieurs sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de défaillances d'ouvrages sur plusieurs sites.

Gravité des conséquences

- *Élevée* : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus).

Vulnérabilité

Parce que les ouvrages ont été construits avec des critères qui ne prennent pas toujours en compte les changements climatiques et que l'ampleur des événements extrêmes est difficile à évaluer dans ce contexte, il serait complexe et coûteux de procéder à des modifications aux infrastructures afin de les rendre moins vulnérables. Pour ces raisons, la vulnérabilité du secteur minier par rapport aux risques de défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés est évaluée à **élevée**.

6.3.6 Diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau

Mise en contexte

Le contrôle de drainage contaminé par réduction des infiltrations d'eau est réalisé à partir de systèmes de recouvrement (voir 7.2.1). Deux catégories principales de recouvrement sont utilisées : les systèmes conventionnels faisant intervenir des matériaux naturels (p. ex. : couverture d'argile) et ceux utilisant des matériaux géosynthétiques (p. ex. : géomembrane).

L'augmentation des précipitations moyennes et extrêmes pourrait également diminuer la performance de ces barrières à l'infiltration d'eau, provoquant ainsi des infiltrations et exposant les résidus miniers qui, ultimement, pourraient générer des problèmes de drainage minier contaminé.

6.3.6.1 Niveau de risque

Pour les régions de l'Abitibi et de Matagami-Chibougamau, le risque est jugé *modéré*. Pour les autres régions, il n'y a pas eu de consensus sur la probabilité d'occurrence, qui varie entre *peu probable* et *probable*. Par contre, un consensus est intervenu sur la gravité des conséquences, qui est également jugée *modérée* pour ces régions. Le risque varie donc entre **modéré** et **élevé** pour ces autres régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable				
	Peu Probable		A-MC		
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : Possibilité que quelques sites restaurés subissent des infiltrations d'eau à travers le recouvrement et produisent des effluents contaminés.
- *Probable* : Plusieurs barrières à l'eau n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; plusieurs sites sont susceptibles de subir des infiltrations à travers le recouvrement et de produire des effluents contaminés.

Gravité des conséquences

- **Modérée** : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.

Vulnérabilité

La perte de performance dans le temps des barrières à l'infiltration d'eau est un phénomène connu (Rowe *et al.*, 2005), et ce, avec ou sans la considération des changements climatiques. Bien que ces derniers puissent accentuer ce phénomène, le secteur minier n'est pas jugé vulnérable face à cet impact, car la dégradation se fera de façon progressive et qu'il sera possible d'apporter des correctifs au besoin, et ce, à des coûts raisonnables. La vulnérabilité du secteur minier quant aux risques associés à la diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau est donc évaluée **faible**.

6.3.7 Diminution de la performance des barrières à l'oxygène

Mise en contexte

En climat humide, où les précipitations annuelles sont importantes et l'évaporation potentielle relativement faible, le contrôle du drainage contaminé peut être effectué à partir de systèmes de recouvrement qui réduisent le flux d'oxygène (voir 7.2.2 et 7.2.3). Cette approche implique l'utilisation de techniques qui permettent le maintien d'un haut degré de saturation au sein d'une des composantes des systèmes (p. ex. : les recouvrements avec nappe surélevée, les CEBC ou le recouvrement en eau).

L'augmentation des températures moyennes ainsi que l'allongement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitation durant la saison estivale pourraient diminuer la performance des barrières à l'oxygène. Une telle situation pourrait occasionner des flux d'oxygène plus importants, provoquant ainsi l'oxydation des résidus miniers et l'exfiltration d'un effluent contaminé.

Toutefois, il faut également considérer que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations annuelles moyennes pour toutes les régions du Québec, ce qui pourrait compenser en partie le bilan hydrique annuel.

Niveau de risque

Le niveau de risque varie entre **modéré** et **élevé**, selon les régions.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable		A-MC-BJ		
	Peu Probable		CN-FL-GN		
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi
BJ : Baie James

CN : Côte-Nord
FL : Fosse du Labrador

GN : Grand-Nord
MC : Matagami-Chibougamau

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : La majorité des sites utilisant une barrière à l'oxygène ne subiront pas de diminution du degré de saturation de celle-ci ou une diminution de l'épaisseur du couvert aqueux;
- *Probable* : Plusieurs sites utilisant une barrière à l'oxygène ne seront pas en mesure de maintenir leur performance; plusieurs sites restaurés subiront une diminution du degré de saturation de la barrière ou de l'épaisseur du couvert aqueux résultant en la production d'effluent contaminé.

Gravité des conséquences

- *Modérée*: Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.

Vulnérabilité

La performance des techniques de type barrière à l'oxygène est fonction du bilan hydrique. Dans le contexte des changements climatiques, on note beaucoup d'incertitudes liées aux précipitations et à l'évaporation, ce qui rend difficile l'évaluation de la performance à long terme de cette technique.

Les techniques du recouvrement en eau et de la nappe surélevée sont fortement dépendantes des conditions locales, puisque l'hydrologie et l'hydrogéologie locales contrôlent la performance de ces techniques. Quant à la technique de la CEBC, elle est plus robuste face aux changements du bilan hydrique. La dégradation de la performance des barrières à l'oxygène se fera de façon progressive, et on considère qu'il sera possible d'apporter des correctifs au besoin, à des coûts raisonnables (p. ex. : augmentation de l'épaisseur de la couche de protection, modification de la gestion des eaux de surfaces, ajouts de bris de succion dans les pentes).

De plus, ces techniques sont très dépendantes des conditions locales. Elles sont relativement nouvelles (CEBC et nappe surélevée) et sont de plus en plus suggérées comme mode de restauration.

Pour ces raisons, on considère que la vulnérabilité du secteur minier par rapport aux risques de diminution de la performance des barrières à l'oxygène est **modérée**.

6.3.8 Perte d'accessibilité aux sites restaurés

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes, et surtout des événements extrêmes de précipitations, pourrait générer des pressions sur l'entretien des chemins d'accès et même aller jusqu'à entraîner la fermeture temporaire de routes donnant accès aux sites miniers restaurés. En plus de générer des coûts d'entretien supplémentaires, la perte d'accès à ces sites pourrait rendre le suivi de ces derniers plus difficile.

Niveau de risque

Le niveau de risque est jugé **faible**, sauf pour la région de la Fosse du Labrador, où il est jugé **modéré**. En ce qui concerne le Grand-Nord, les réponses des participants variaient énormément quant à la probabilité d'occurrence. La gravité des conséquences y est jugée modérée.

Néanmoins, l'absence de consensus concernant la probabilité d'occurrence dans le Grand-Nord ne nous permet pas d'évaluer le niveau de risque de cet impact pour cette région.

Probabilité d'occurrence	Très probable				
	Probable	FL			
	Peu Probable	A-MC-BJ-CN			
	Rare				
		Faible	Modérée	Élevée	Très élevée
		Gravité des conséquences			

A : Abitibi

CN : Côte-Nord

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

Probabilité d'occurrence

- *Peu probable* : La majorité des sites restaurés seront accessibles par la route à long terme; quelques sites pourraient être temporairement inaccessibles.
- *Probable* : Plusieurs sites restaurés seront temporairement inaccessibles par la route.

Gravité des conséquences :

- *Faible* : Légère augmentation des coûts et des efforts d'entretien des infrastructures; faibles investissements requis de façon préventive.

Vulnérabilité

On considère que les entreprises pourront s'adapter facilement à de telles situations, qui devraient être temporaires dans la majorité des cas, sans compter que d'autres moyens peuvent être utilisés pour se rendre sur les sites restaurés. De plus, dans les cas où l'accès terrestre est interrompu, les travaux pour remédier à la situation sont relativement simples. La vulnérabilité du secteur minier par rapport à d'éventuelles pertes d'accessibilité des sites restaurés est donc **faible**.

6.4 Résumé des principaux risques et vulnérabilités face aux changements climatiques

Le *tableau 21* résume le niveau de vulnérabilité par rapport aux principaux impacts des changements climatiques en lien avec la restauration des sites miniers. On remarque que la vulnérabilité par rapport à un impact est considérée très élevée (diminution de la performance des recouvrements isolants) et que deux autres vulnérabilités sont considérées élevées (capacité insuffisante des déversoirs et/ou d'évacuateurs de crue; défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés). Il est important pour l'industrie minière et le gouvernement de trouver des façons de réduire le niveau de vulnérabilité par rapport à ces impacts possibles des changements climatiques. Ces derniers devraient donc être considérés par les concepteurs des plans de restauration ainsi que par le ministère responsable de leur autorisation.

Tableau 21 : Niveau de vulnérabilité des principaux impacts liés à la restauration des sites miniers

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

6.5 Conclusions et recommandations

La performance à long terme des méthodes de restauration et l'intégrité des ouvrages de confinement des résidus après exploitation représentent clairement les plus grandes vulnérabilités du secteur minier québécois face aux changements climatiques. En effet, contrairement aux activités d'exploration et d'exploitation minières, les infrastructures utilisées pour la restauration doivent durer de nombreuses années (plusieurs centaines d'années) après la fermeture des mines. Les méthodes de restauration doivent donc être en mesure de jouer leur rôle à perpétuité. Cette longue durée de vie fait en sorte que les infrastructures utilisées pour la restauration seront beaucoup plus exposées à l'évolution du climat.

Afin de réduire la vulnérabilité du secteur minier face aux changements climatiques, quelques pistes de solution et des recommandations sont présentées dans cette section.

Piste de solution n° 1 : Identifier les conditions météorologiques extrêmes pour permettre une intégration adéquate des changements climatiques dans la conception des ouvrages de rétention et des méthodes de restauration.

Lors de la phase de conception d'un ouvrage minier, les conditions météorologiques extrêmes doivent être prises en considération. Par conséquent, de nouvelles approches méthodologiques considérant les changements climatiques doivent être développées. Elles permettront l'estimation de futures CMP et PMP, qui tiendront compte de l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des événements extrêmes de précipitations. De plus, pour certains modes de restauration tels que les barrières à l'oxygène, les conditions climatiques critiques sont plutôt liées aux sécheresses extrêmes. Il faudra donc développer des critères ou des approches visant à mieux les définir afin de bien concevoir ces méthodes de contrôle de la qualité du drainage minier.

Recommandations :

- **Supporter la recherche visant à mieux estimer les conditions climatiques futures;**
- **Développer des approches méthodologiques et des critères de conception des ouvrages de rétention et des méthodes de restauration qui considèrent les changements climatiques.**

Piste de solution n° 2 : Adopter des méthodes de restauration plus robustes et/ou ayant une capacité d'adaptation aux changements climatiques.

Certaines méthodes de restauration sont plus vulnérables que d'autres face aux différents changements climatiques. Par conséquent, la vulnérabilité de ces méthodes devrait être prise en compte dès la conception des plans de restauration.

Par exemple, la technique des recouvrements isolants est une méthode de plus en plus vulnérable, en raison de l'accroissement rapide des températures moyennes dans le nord québécois, qui entraîne une augmentation de l'épaisseur de la zone active du pergélisol. L'utilisation du recouvrement isolant représente une solution beaucoup moins attrayante, en raison des coûts supplémentaires importants engendrés par le besoin de hausser l'épaisseur de ces recouvrements pour protéger les résidus du dégel.

Recommandation :

- **Dans les cas où la technique de recouvrements isolants est envisagée comme méthode de restauration, elle devra faire l'objet d'une démonstration scientifique solide qui inclut l'impact des changements climatiques sur sa performance à long terme.**

Les techniques de restauration nécessitant l'utilisation de digues retenant des quantités d'eau importantes sont clairement plus vulnérables. L'utilisation de techniques qui réduisent la nécessité de ces ouvrages, ou du moins qui réduisent la pression sur ceux-ci, devrait être considérée. Par exemple, les technologies qui auraient avantage à être favorisées sont les résidus épaissis ou filtrés, les inclusions de roche stérile à l'intérieur des parcs à résidus ou encore la réutilisation des ouvertures minières de surface pour entreposer les résidus.

Recommandation :

- **Considérer (favoriser ou adopter) les modes de gestion des rejets qui rendent moins vulnérables à long terme les aires d'entreposage des rejets face aux risques géotechniques associés aux digues.**

Afin de réduire la vulnérabilité des plans de restauration aux changements climatiques, il serait possible de concevoir des méthodes de restauration pouvant être modulées (ou ajustées) au fil du temps, ce qui permettrait de maintenir l'efficacité de la restauration malgré l'évolution du climat. De plus, pour un site donné, les techniques dont la performance est moins influencée par les changements climatiques devraient être favorisées.

Recommandation :

- À performance égale, les concepts de restauration les moins vulnérables face aux changements climatiques devraient être favorisés ainsi que ceux qui offrent la possibilité d’être ajustés au fur et à mesure de l’évolution du climat.

De plus, il est nécessaire d’améliorer dès que possible les connaissances sur le comportement des méthodes de restauration à long terme et d’en proposer de nouvelles plus adaptées. Des travaux de recherche sont nécessaires pour comprendre plus spécifiquement comment les changements climatiques influenceront la performance des différentes méthodes de restauration.

Recommandation :

- Financer des projets de recherche portant sur les impacts des changements climatiques sur la performance des méthodes de restauration

Piste de solution n° 3 : Mieux intégrer les changements climatiques dans l’encadrement réglementaire de la restauration des sites miniers et leurs considérations quant à la responsabilité à long terme des sites.

Présentement, les garanties financières liées à la restauration des sites miniers sont calculées en fonction des conditions climatiques actuelles. Cependant, certaines techniques pourraient voir leur performance être affectée à long terme par les changements climatiques. Il serait donc important d’intégrer cet aspect évolutif de la performance dans le calcul de la garantie financière. De plus, la réglementation actuelle prévoit une réduction de la fréquence de suivi des sites restaurés avec le temps (peut cependant être modifiée par le MDDELCC, au besoin). Considérant que la performance de la restauration pourrait être affectée par le temps, il faudrait ajuster la fréquence des suivis en fonction de la vulnérabilité de la méthode de restauration par rapport aux changements climatiques.

Un autre élément, qui doit être considéré par rapport à l’encadrement réglementaire des sites miniers, est que les impacts des changements climatiques ajoutent aux difficultés d’obtenir le certificat de libération du gouvernement, qui implique que les sites restaurés ne comportent aucun risque pour l’environnement ainsi que pour la santé et la sécurité des personnes (voir section 3.8 du guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec; MERN, 2016).

Recommandations :

- S’assurer que les garanties financières soient modulées pour tenir compte des effets des changements climatiques sur la performance à long terme des méthodes de restauration;
- S’assurer que la fréquence de suivi des sites restaurés soit adaptée afin de ne pas être confrontés à la dégradation de la performance des modes de restauration dans le temps attribuable aux changements climatiques et/ou à d’autres phénomènes;
- S’assurer que la performance de la technique de restauration soit robuste face aux changements climatiques avant d’émettre un certificat de libération.

7. Conclusions et recommandations générales

Cette étude avait pour objectif principal d'identifier les principales vulnérabilités aux changements climatiques des activités minières au Québec. À partir de la synthèse des scénarios climatiques pour le secteur minier effectuée par le consortium Ouranos, plusieurs impacts potentiels des changements climatiques ont été répertoriés. Par la suite, le niveau de risque associé aux impacts jugés les plus importants a été évalué de façon qualitative à l'échelle des régions minières du Québec. Finalement, la vulnérabilité du secteur minier face à ces impacts a été estimée; plus précisément, l'on a évalué sa capacité à résister, à réagir et à s'adapter aux changements climatiques.

Basés sur la consultation de nombreux experts du secteur minier, les résultats de ces travaux suggèrent que l'industrie minière québécoise sera affectée directement et indirectement par les changements climatiques, et ce, tout au long du cycle de vie d'une mine. Dans certains cas, les impacts des changements climatiques génèreront de nouvelles situations problématiques ou encore des opportunités pour le secteur minier. Par exemple, les problématiques associées à la fonte du pergélisol ou encore les opportunités reliées au transport facilité par l'ouverture prolongée des voies maritimes dans le Nord. Toutefois, dans bien des cas, les impacts des changements climatiques auront plutôt pour effet d'accélérer ou d'amplifier des problématiques du secteur minier déjà existantes. Par exemple, les risques associés aux défaillances des ouvrages de rétention sont une réalité, même dans le climat actuel. Néanmoins, les changements climatiques pourraient avoir pour effet d'accentuer ce niveau de risque.

Bien que l'ensemble du processus de développement minier sera probablement affecté par les impacts des changements climatiques, certaines phases présentent des vulnérabilités plus significatives. Il est clair que les principales vulnérabilités du secteur minier par rapport aux changements climatiques se retrouvent au niveau de la restauration des sites. La performance à long terme des méthodes de restauration et l'intégrité des ouvrages de confinement des résidus après exploitation représentent les plus grandes vulnérabilités du secteur minier québécois. Contrairement aux activités d'exploration et d'exploitation minières, les infrastructures utilisées pour la restauration des sites miniers doivent être efficaces pour plusieurs centaines d'années après la fermeture de la mine. Les méthodes de restauration doivent donc être en mesure de jouer leur rôle à perpétuité. Cette longue durée de vie utile fait en sorte que les infrastructures utilisées pour la restauration seront beaucoup plus exposées à l'évolution du climat et aux impacts des changements climatiques.

On retrouve aussi des vulnérabilités importantes aux changements climatiques en phase d'exploitation des mines. Celles-ci se situent principalement au niveau de la gestion des résidus et de l'eau, dans un contexte de variabilité du régime de précipitations et d'une augmentation des volumes à gérer de façon ponctuelle. En effet, au moment de l'exploitation, ce n'est pas tant l'évolution du climat qui est problématique, mais plutôt la variabilité des extrêmes qui est la source des plus grandes préoccupations. Un tel contexte est à même de rendre plus à risque la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crue ainsi que l'intégrité structurale des ouvrages de retenue. Bien que les vulnérabilités en phase d'exploitation soient importantes et qu'elles doivent être considérées, elles sont jugées un peu moins critiques qu'en phase de restauration.

Cela s'explique principalement du fait que les mines en opération ont des durées de vie limitée. Par conséquent, les infrastructures seront généralement moins exposées à l'évolution du climat. De plus, en phase d'exploitation, l'industrie minière est en mesure de s'adapter plus facilement aux changements climatiques. En effet, la présence des opérateurs miniers sur les sites fait en sorte que les ouvrages font normalement l'objet d'une surveillance régulière. De même, les ressources humaines et financières sont généralement disponibles pour apporter les modifications devenues nécessaires.

De manière générale, la phase d'exploration minérale est peu vulnérable aux changements climatiques. Ce constat vient du fait que les activités d'exploration se déroulent sur de courtes périodes et que les interventions sur le territoire sont peu intrusives et souvent ponctuelles. Comme les changements climatiques se feront sentir de manière progressive au fil des ans, les entreprises d'exploration seront en mesure de s'adapter graduellement aux nouvelles conditions climatiques. D'ailleurs, toutes les conditions climatiques envisagées ont déjà été vécues (ailleurs au Québec ou sur la planète) pour l'une ou l'autre des entreprises œuvrant dans le domaine de l'exploration. Ainsi, les experts considèrent qu'elles seront en mesure de s'adapter, comme elles l'ont toujours fait. L'exploration minière sera probablement influencée plus indirectement par les changements climatiques, par exemple par les impacts qu'ils auront sur les marchés et la demande pour certains minéraux ainsi que l'ouverture de nouvelles voies maritimes.

L'identification des vulnérabilités du secteur minier face aux changements climatiques est difficile à effectuer de façon générale à une échelle régionale. Chaque projet ou site minier présente des caractéristiques physiques, économiques et environnementales qui lui sont propres et qui font en sorte qu'il est très difficile de faire des constats généraux. Ainsi, un risque qualifié de faible pour un projet minier donné pourrait être qualifié d'important pour un autre projet pourtant situé dans la même région. À titre d'exemple, des facteurs tels que la topographie, l'hydrogéologie, la proximité de milieux naturels fragiles ou de zones habitées, l'isolement, l'envergure de l'exploitation, etc. peuvent grandement influencer les risques associés aux impacts des changements climatiques. Il est important de considérer cet aspect à la lecture de ce rapport, car les risques et les vulnérabilités associés aux changements climatiques devraient ultimement être étudiés au cas par cas.

Il est fort probable que le développement des mines se produira de plus en plus dans des régions isolées, loin des populations. Ces environnements peuvent à la fois être fragiles et sensibles aux changements climatiques. À cela s'ajoutent les considérations relatives à l'acceptabilité sociale, qui risquent d'être accentuées par l'incertitude supplémentaire qu'apportent les changements climatiques. L'adaptation du secteur minier aux changements climatiques représente donc un défi. L'industrie et les gouvernements en sont conscients depuis plusieurs années, mais il s'agit d'une problématique à moyen/long terme qui n'a pas encore reçu une attention suffisante.

Pour permettre l'adaptation du secteur minier, il faudra mettre au point de nouvelles approches et développer des outils pour intégrer les changements climatiques à la planification, à la conception et à la gestion des activités minières. Pour ce faire, il est nécessaire d'accroître les connaissances sur les changements climatiques ainsi que leurs impacts sur les activités minières,

notamment sur la performance des méthodes de restauration. La mise sur pied d'un programme de recherche à cet effet fournirait, au fil du temps, les renseignements et les outils nécessaires pour que le secteur minier québécois soit plus robuste et compétitif dans le contexte des changements climatiques.

Finalement, les recommandations émises dans ce rapport visent à réduire la vulnérabilité du secteur minier québécois face aux principaux impacts des changements climatiques. Les chapitres 5, 6 et 7 ont présenté des conclusions et des recommandations spécifiques aux différentes phases du développement minéral. Les recommandations finales de ce rapport sont rassemblées par ordre d'importance dans le *tableau 22* selon leur contribution à l'adaptation du secteur minier aux changements climatiques.

Tableau 22 : Sommaire des recommandations par ordre d'importance

Recommandation		Phase du processus de développement minéral
1	Développer une approche méthodologique et des critères de conception visant à intégrer les changements climatiques dans la conception des ouvrages de rétention des résidus miniers et des méthodes de restauration.	Exploitation Restauration
2	Considérer, voire même encourager, l'utilisation des modes de gestion des rejets qui rendent moins vulnérables à long terme les aires d'entreposage des rejets face aux risques géotechniques associés aux digues.	Restauration
3	Favoriser les concepts de restauration les moins vulnérables aux changements climatiques ainsi que ceux qui offrent la possibilité d'être ajustés au fur et à mesure de l'évolution du climat.	Restauration
4	Considérer que, dans les cas où la technique de recouvrements isolants sera envisagée comme méthode de restauration, elle devra faire l'objet d'une démonstration scientifique solide, qui inclut l'impact des changements climatiques sur sa performance à long terme.	Restauration
5	Supporter la recherche en lien avec la réduction de la vulnérabilité du secteur minier par rapport aux changements climatiques, notamment sur : • la performance des méthodes de restauration à long terme; • les méthodes visant à réduire les risques d'instabilités géotechniques (p. ex : résidus épaissis ou filtrés; inclusions de stérile); • l'amélioration des modèles visant l'estimation des conditions climatiques futures ; • l'adaptation des technologies de l'exploration minérale dans le contexte des changements climatiques.	Exploration Exploitation Restauration
6	Ajuster la fréquence de suivi des sites restaurés afin d'éviter la dégradation de la performance des modes de restauration dans le temps attribuable aux changements climatiques et/ou à d'autres phénomènes.	Restauration
7	S'assurer que les garanties financières soient modulées pour tenir compte des effets des changements climatiques sur la performance à long terme des méthodes de restauration.	Restauration
8	S'assurer que, dans le contexte des changements climatiques la protection du territoire n'empêche pas l'accès pour l'exploration minière.	Exploration
9	S'assurer que la performance de la technique de restauration soit robuste face aux changements climatiques avant d'émettre un certificat de libération.	Restauration
10	Produire un guide visant à établir des façons de faire pour mieux intégrer les changements climatiques dans les études techniques.	Exploitation Restauration
11	Utiliser les connaissances des communautés locales, notamment des communautés autochtones, pour mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur les milieux et les impliquer dans le suivi local des changements climatiques.	Exploration Exploitation Restauration
12	Utiliser les données météorologiques existantes recueillies sur les sites miniers actifs pour le développement de scénarios climatiques adaptés au secteur minier.	Exploitation Restauration

8. Références

- ACB, 2013. Recommandations de sécurité des barrages, révisé en 2013. Association canadienne des barrages.
- ACB, 2014. Application des recommandations de sécurité des barrages aux barrages miniers. Association Canadienne des Barrages.
- Adu-Wusu, C., Yanful, E.K., Mian, M.H., 2001. Field evidence of resuspension in a mine tailings pond. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 796-808.
- Albright, W.H., Benson, C.H., Apiwantragoon, P., 2012. Field hydrology of landfill final covers with composite barrier layers. *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 139(1), 1-12.
- Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Abichou, T., Tyler, S.W., Rock, S.A., 2006. Field performance of three compacted clay landfill covers. *Vadose Zone J.*, 5, 1157-1171.
- Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Roesler, A.C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B.F., Rock, S.A., 2004. Field water balance of landfill final covers; *J. Environ. Qual.* 33(6): 2317-2332.
- Allard, M., Sarrasin, D., Marchildon, C., 2008. Evidences of impacts of climate warming on permafrost in Nunavik, Symposium 2008 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, 16 pp.
- AMC, 1998. Guide de gestion des parcs à résidus miniers. Association minière du Canada. 1998
- Andersland, O., Ladanyi, B., 2004. *Frozen ground engineering* (2nd ed.) Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.
- Arenson, L.U., Sego, D.C., 2007. Protection of mine waste tailing ponds using cold air convection. *Assessment and Remediation of Contaminated Sites in the Arctic and Cold Climates (ARCSACC)*. Edited by K. Biggar, G. Cotta, M. Nahir, A. Mullick, J. Buchko, A. Ho, S. Guigard. Edmonton, AB, Canada, 256-264.
- Atkins, R.J., Hay, D., Robertson, J., 1997. Shallow water cover design methodology and field verification. In *Proceedings 1, Fourth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 211-228).
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., 2002. *Environnement et gestion des résidus miniers*. Presses Internationales de Polytechnique, Corporation de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E.M., Martin, V., Pépin, N., Mbonimpa, M., Chapuis, R.P., 2011. Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. *Symposium 2011 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec, Canada*.
- Aubertin, M., Bussière, B., Monzon, M., Joanès, A.M., Gagnon, D., Barbera, J.M., Bernier, L., 1999. Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Phase II: Essais en place. Report CDT P, 1899.

- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F., Tremblay, L., 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Rapport MEND/NEDEM, 2.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, Maqsoud, A., 2015. Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symposium 2015 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.
- Awoh, A.S., 2012. Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sous un recouvrement en eau. Ph.D. Diss. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada. <http://depositum.uqat.ca/447/>
- Baker, B.J., Banfield, J.F., 2003. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 44(2), 139-152.
- Belem, T., Benzaazoua M., 2007. Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotech Geol Eng* 2007; 26(2):147–74.
- Benson, C.H., Scaliar, J., 2008. Field performance of GCLs used as hydraulic barriers in caps. Symposium 2008 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Québec, Canada.
- Blight, G., 2010. *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press, Balkema, Netherlands, 634 p.
- Bossé, B., 2014. Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride. Ph.D. Diss. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada. <http://depositum.uqat.ca/576/>
- Boukachabia, M. et Jébrak., M. 2015. Le processus de découverte des grands projets miniers : du modèle focalisé des espaces vierges au modèle ponctué des pays miniers; in Lehman, V., Motulski, B., et Colomb, V. *Changement et grands projets; des choix engagés*, partie 3. Presse de l'Université du Québec, p.43-55
- Boulanger-Martel, V., 2015. Performance d'une couverture avec effets de barrière capillaire faite de mélanges gravier-bentonite pour contrôler la migration d'oxygène en conditions nordiques. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Brachman, R.W.I., 2011. Lessons learned from geomembranes in MSW landfills. C.R. Symposium 2011 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, QC, 8p.
- Bussière, B., 1999. Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Ph.D. Diss. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Bussière, B., 2007. Colloquium 2004: hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geo-environmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal* 44:1019–1052.

- Bussière, B., Aubertin, M., Benzaazoua, M., Gagnon, D., 1999. Modèle d'estimation des coûts de restauration de sites miniers générateurs de DMA. Mines Ecologiques, Congrès APGGQ, Rouyn-Noranda, Canada.
- Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R.P., 2003. "The behavior of inclined covers used as oxygen barriers." *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), 512-535.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J.W., Chapuis, R.P., 2007. Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 245-265.
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, R., Benzaazoua, M., 2005. Principaux défis et pistes de solutions pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnés. Symposium 2005 sur l'environnement et les mines. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada, 50 pp.
- Bussière, B., Hayley, W., 2010. Effects of climate change on mine waste disposal in the arctic. *Geo-Strata – Geo Institute of ASCE*, 14(5), 44-46.
- Catalan, L.J.J., Yanful, E.K., 2002. "Sediment-trap measurements of suspended mine tailings in shallow water cover." *Journal of environmental engineering*, 128(1), 19-30.
- CEHQ, 2010 Règlement sur la sécurité des barrages (S-3.1.01, r.1). Centre d'Expertise Hydrique du Québec. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/guides/guide-fiabilite-appareils-evacuation.pdf>
- CEMI, 2012. Weather Variability and Climate Change: Challenges and solutions for the Mining Sector Mining and Climate Change workshop. <https://www.miningexcellence.ca/?p=2453>
- CIGB, 2011. Bulletin 139. Améliorer la sécurité des barrages de stériles miniers. Aspects critiques de leur gestion, conception, exploitation et fermeture. Commission Internationale des Grands Barrages. 2011.
- CIGB, 2013. Bulletin 153. Conception durable et performances après fermeture des barrages de stériles. Commission Internationale des Grands Barrages. 2013.
- Collin, M., Rasmuson, A., 1988. A comparison of gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science Society of America Journal*, 52(6), 1559-1565.
- Collin, M., 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. p. 311-333.
- Cosset, G., 2009. Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux: essais en colonne et simulations numériques. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada. <http://publications.polymtl.ca/230/>
- Coulombe, V., 2012. Performance de recouvrements isolants partiels pour contrôler l'oxydation de résidus miniers sulfureux. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada. <http://publications.polymtl.ca/1050/>
- Cravotta, C.A., 2008. Dissolved metals and associated constituents in abandoned coal-mine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: geochemical controls on constituent concentrations. *Applied Geochemistry*, 23(2), 203-226.

- Cubasch, U. et al., 2013. Introduction. In T. F. Stocker et al., eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 119–158.
- Dagenais, A. M., Aubertin, M., 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 ICARD* (pp. 26-30).
- Dagenais, A.M., 2005. *Techniques de contrôle du drainage minier acide basées sur les effets capillaires*. Ph.D. Diss. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Daniel, D.E., Koerner, R.M., 2007. *Waste containment facilities: guidance for construction quality assurance and construction quality control of liner and cover systems*. 2nd ed., ASCE Press.
- Daniel, D.E., Koerner, R.M., Bonaparte, R., Landreth, R.E., Carson, D.A., Scranton, H.B., 1998. Slope stability of geosynthetic clay liner test plots. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(7), 628-637.
- Davé, N. K., Krishnappan, B. G., Davies, M., Reid, I., & Lanteigne, L., 2003. *Erosion characteristics of underwater deposited mine tailings*. Mining and the Environment, Canada Natural Resources, Sudbury, Ont.
- Dawson, R.F., Morin, K.A., 1996. *Acid mine drainage in permafrost regions: issues, control strategies and research requirements*. CANMET.
- Day, S.D., Higgs, T., Paine, M., 1996. *Guide for Predicting Water Chemistry from Waste Rock Piles*. Canadian MEND Report 1.27.1a.
- DesJarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A.T., Roy, R., Savard, J.P., Turcotte, R., Villeneuve, C., 2010. *S'avoier s'adapter aux changements climatiques*. Ouranos. Montréal, Québec, Canada, 128 pp. http://www.ouranos.ca/fr/pdf/53_ssc_21_06_lr.pdf
- Demers, I., 2008. *Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide*. Ph.D. Diss. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada. <http://depositum.uqat.ca/116/>
- Doré, G., Zubeck, H., 2008. *Cold Regions Pavement Engineering*. McGraw-Hill Professional.
- Duerden, F., Pearce, T., Ford, J., Pittman, J., 2014. *Case studies of adaptation to climate change in the Yukon mining sector: From planning and operation to remediation and restoration*. Ottawa, Ontario: Report submitted to Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada, 23pp. <http://testing.arctic-north.com/wp-content/uploads/2012/09/yukon-web.pdf>
- Dwyer, S.F., 2003. *Water balance measurements and computer simulations of landfill cover*. Ph.D. Diss. Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM, USA.
- Elberling, B., 2001. Environmental controls of the seasonal variation in oxygen uptake in sulfidic tailings deposited in a permafrost-affected area. *Water Resources Research*, 37(1), 99-107.
- Elberling, B., 2005. Temperature and oxygen control on pyrite oxydation in frozen mine tailings. *Cold Regions Science and Technology*, 41, 121-133.

- EPA, 2011. Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment. US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
<http://www.epa.gov/tio/download/remed/epa542f11001.pdf>
- Éthier, M.P., 2011. Évaluation du comportement géochimique en conditions normale et froides de différents stériles présents sur le site de la mine Raglan. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada. <http://publications.polymtl.ca/553/>
- Evangelou, V.P., Zhang, Y.L., 1995. A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. Environ. Sci. Tech., 25, 141-199.
- Foucault A. et Raoult, J.F., 2010. Dictionnaire de Géologie - 7^e édition, Dunod, 416 p.
- Harris, J.M., Roach, B., et Codur, A.M. (2015) The economics of global climate change. A GDAE Teaching module on social and environmental issues in economics. GDAE, Tufts Univ.
- Hershfield, D.M., 1965. Method for estimating probable maximum rainfall. J. of the Am. Waterworks Ass. 57, 965-972.
- Holubec, I., 2007. Design requirements for climate warming in permafrost. Paper presented at the Canadian National Committee for the International Permafrost Association 2007 Symposium, Yellowknife, 23–25 May 2007.
- Hutchinson, M.F. et al., 2009. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), pp.725–741. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/2008JAMC1979.1>.
- INAP, 2003. Evaluation of the long-term performance of dry cover systems. Report 684-02. Prepared by O’Kane Consultants Inc. International Network for Acid Prevention.
http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Evaluation_of_the_Long-Term_Performance_of_Dry_Cover_Systems.pdf
- Jébrak, M and Marcoux, E., 2015. Geology of Mineral Resources. Geological Association of Canada, 662 p. ISBN : 978-1-897095-73-7;
- Jébrak, M., 2015. Quels métaux pour demain ? Les enjeux des ressources minérales. Dunod, Paris. EAN13 : 9782100726110; 252 p.
- Boukachabia, M. et Jébrak, M. 2015. Le processus de découverte des grands projets miniers : du modèle focalisé des espaces vierges au modèle ponctué des pays miniers ; in Lehman, V., Motulski, B., et Colomb, V. Changement et grands projets ; des choix engagés, partie 3. Presse de l’Univ. Du Québec, p.43-55.
- Johnson, D.B., Hallberg, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Sci. Total Environ., 338, 3-14.
- Kachhwal, L.K., Yanful, E.K., Lantaigne, L., 2011. Water Cover Technology for Reactive Tailings Management: A Case Study of Field Measurement and Model Predictions. Water, Air, & Soil Pollution, 214(1-4), 357-382.
- Kleinmann, R.L.P., Crerar, D.A., Pacelli, R.R., 1981. Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. Mining Eng., 300-304.

- Koerner, R. M., 2012. Designing with geosynthetics, 6th Edition. Vol 1 &2. WordPress ebooks.
- Koutsoyiannis, D., 1999. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resour. Res.* 35(4), 1313-1322.
- Koutsoyiannis, D., 2003. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In *Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna* (pp. 24-25).
- Koutsoyiannis, D., 2004a. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation/Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique. *Hydrological sciences journal*, 49(4).
- Koutsoyiannis, D., 2004b. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records/Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: II. Recherche empirique sur de longues séries de précipitations. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4).
- Koutsoyiannis, D., 2007. A critical review of probability of extreme rainfall: principles and models. *Advances in Urban Flood Management*, 139-166.
- Kyhn, C., Elberling, B., 2001. Frozen cover actions limiting AMD from mine waste deposited on land in Arctic Canada. *Cold regions science and technology*, 32(2), 133-142.
- Li, M.G., Aube, B., St-Arnaud, L., 1997. Considerations in the use of shallow water covers for decommissioning reactive tailings. In *Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC (Vol. 31, pp. 115-130).
- Lowson, R.T., 1982. Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. *Chemical Reviews*, 82(5), 461-497.
- MacKay, M. & Seglenieks, F., 2013. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Climatic Change*, 117(1-2), pp.55–67. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0560-z>.
- Mbonimpa, M., Awoh, A.S., Beaud, V., Bussière, B., 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 the 61th Canadian Geotechnical Conference and the 9th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference* (pp. 21-24).
- McKinsey & Company, 2009. *Pathways to a Low-Carbon Economy*.
- MDDEP, 2012. *Directive 019 sur l'industrie minière. Développement Durable, Environnement et Parcs, Québec*. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf
- Meldrum, J.L., Jamieson, H.E., Dyke, L.D., 2001. Oxidation of mine tailings from Rankin Inlet, Nunavut, at subzero temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 957-966.
- MEND, 1991. Acid rock drainage prediction manual: A manual of chemical evaluation procedures for the prediction of acid generation from mine wastes. Report 1.16.1b. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada.
<http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.16.1b.pdf>

- MEND, 1993a. Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. Report 1.32.1. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.32.1.pdf>
- MEND, 1993b. Preventing AMD by Disposing of Reactive Tailings in Permafrost. Report 6.1. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/mend-report/preventing-amd-by-disposing-reactive-tailings-in-permafrost/>
- MEND, 1996. Review of use an elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage from tailings. Report 2.17.1. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/2.17.1.pdf>
- MEND, 2001. MEND Manual, Volume 4 – Prevention and Control. Report 5.4.2d. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/5-4-2dVolume4_PreventionControlL.pdf
- MEND, 2000. MEND Manual, Volume 5 – Treatment, active and passive. Report 5.4.2e. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/5.4.2e.pdf>
- MEND, 2004a. Review of water quality issues in neutral pH drainage: examples and emerging priorities for the mining industry in Canada. Report 10.1. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://www.mend-nedem.org/reports/files/10.1.pdf>
- MEND, 2004b. Covers for reactive tailings located in permafrost regions review. Report 1.61.4. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/1.61.4CoversPermafrostRegions.pdf>
- MEND, 2009. Mine waste covers in cold region. Report 1.61.5a. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.61.5a.pdf>
- MEND, 2012. Cold regions cover system design technical guidance document. Report 1.61.5c. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.61.5c.pdf>
- MERN, 2015. Le processus de développement minéral. <https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/processus-developpement-mineral.pdf>
- Mian, M.H., Yanful, E.K., 2003. Tailings erosion and resuspension in two mine tailings ponds due to wind waves. *Advances in Environmental Research*, 7(4), 745-765.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Lindsay, M.B., Blowes, D.W., Jambor, J.L., 2015. Long-term mineralogical and geochemical evolution of sulfide mine tailings under a shallow water cover. *Applied Geochemistry*.
- Monette, A., 2012. L'étude des changements appréhendés des précipitations extrêmes sur la province du québec en utilisant un ensemble de multi-MRC. Mémoire de maîtrise, UQAM, p. 90. <http://www.archipel.uqam.ca/5090/1/M12583.pdf>
- Moss, R.H. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), pp.747–756. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>

- MRN, 1997. Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec. Ministère des Ressources Naturelles & Ministère de l'Environnement et de la Faune.
<https://www.mern.gouv.qc.ca/publications/mines/restauration/restauration-guifmin.pdf>
- Music, B. et al., 2015. Present and future Laurentian Great Lakes hydroclimatic conditions as simulated by regional climate models with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Climatic Change*, 130(4), pp.603–618. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1348-8>.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W., Cherry, J.A., Reardon, E.J., 1989. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(1), 1-8.
- Nicholson, R.V., Tibble, P.A., 1995. Review of the use of elevated water table as a method to control and reduce acidic drainage in tailings. Report to *SENES Consultants* for project 31706, 35p.
- Nordstrom, D.K., 2000. Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters. *Inter. Geology Review*, 42(6), 499-515.
- Okoli, C. et Pawlowski, S. D., 2004. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42 (1), 15-29.
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., & Zagury, G.J., 2010. Preventing acid mine drainage with an elevated water table: Long-term column experiments and parameter analysis. *Water, Air and Soil Pollution* 213, 437–458.
- Ouangrawa, M., 2007. Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement submergés. Ph.D. Diss. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G., Bussière, B., 2006. The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings, a laboratory and numerical modelling study. In *Proceedings of the 7th ICARD*, 1473-1482, March 26-30, (2006), St. Louis, MI.
- Ouranos, 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1: Évolution climatique au Québec., 114 (Ouranos, Montréal, Québec).
- Ouranos, 2014. Synthèse des changements climatiques et de leurs impacts sur le secteur minier. Dans «*Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatique pour le secteur minier québécois*», synthèse bibliographique, Étape 1, URSTM, 138 pp.
- Ovara, A.D., Tremblay, G.A., Tibble, P.A., Nicholson, R.V., 1997. Prevention of acid rock drainage through the application of in-pit disposal and elevated water table concepts. *Proc. 4th ICARD*, Vol.3, Vancouver, p.973-983.
- Pabst, T., Aubertin, M., Bussière, B., Molson, J., 2014. Column Tests to Characterise the Hydrogeochemical Response of Pre-oxidised Acid-Generating Tailings with a Monolayer Cover. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(2), 1-21.

- Papalexiou, S.M., Koutsoyiannis, D., 2006. A probabilistic approach to the concept of Probable Maximum Precipitation. *Advances in Geosciences*, 7(7), 51-54.
- Pearce, T., Ford, J., Prno, J. and Duerden, F., 2009. Climate change impacts and adaptations in the Canadian mining sector. Prepared for: David Suzuki Foundation Climate Change Program. Guelph, Ontario, Canada: 159pp.
- Pearce, T., Ford, J., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., Berrang-Ford, L., Smit, B., 2011. Climate change and mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16, 347-368.
- Pearce, T.D., Ford, J.D., Prno, J., Duerden, F., Berrang-Ford, L., Smith, T., Marshall, M., 2009. Climate change and Canadian mining. Opportunities for Adaptation. David Suzuki Foundation, p. 160. http://www.davidsuzuki.org/publications/downloads/2009/Climate_Change_And_Canadian_Mining.pdf
- Pham, N., Sego, D.C., Arenson, L., Blowes, D., Smith, L., Neuner, M.G.M., Amos, R., 2009. Diavik waste rock project: heat transfer in experimental waste rock piles at Diavik under permafrost environment. Paper presented at the 8th ICARD International Conference on acid Rock Drainage, Skelleftea, Sweden.
- Plante, B., 2010. Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé. Ph.D. Diss. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada. <http://depositum.uqat.ca/31/>
- Reinecke, S., Brodie, J., 2012. Climate change impacts on metal leaching and acid rock drainage at Canadian mines – risks for operation and closure. In *Proceedings of the 9th ICARD*, Ottawa, Canada.
- Rousseau, L., 1996. La méthode Delphi : une liaison heureuse entre la pratique et la recherche en gestion. *Revue Organisation*, 5 (2), 27-48.
- Rousseau, A.N., Klein, I.M., Freudiger, D., Gagnon, P., Frigon, A., Ratté-Fortin, C., 2014. Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, 519, 3094-3109.
- Rowe, R.K., 2005. Long-term performance of contaminant barrier systems. *Geotechnique*, 55(9), 631-678.
- Rowe, R.K., Abdelaal, F.B., Islam, Z., 2014. Ageing of high-density polyethylene geomembranes of three different thicknesses. *J. Geotech. Geoenviron. Engng, ASCE*, 11 pages.
- Rowe, R.K., and Ewais, A.M.R., 2015. Ageing of exposed geomembranes at locations with different climatological conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(3): 326-343.
- Rowe, R.K., Yang, P., Chappel, M.J., Brachman, R.W.I., Take, W.A., 2012. Wrinkling of a geomembrane on a compacted clay liner on a slope. *Geotech. Eng. J. of the SEAGS & AGSSEA*, 43(3): 11-18.
- Samad, M.A., 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(1), 207-228.

- Sherlock, E.J., Lawrence, R.W., Poulin, R., 1995. On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environ. Geol.*, 25(1), 43-54.
- Simms, P.H., Yanful, E.K., St-Arnaud, L., Aubé, B.C. 2000. "A laboratory evaluation of metal release and transport in flooded pre-oxidized mine tailings". *Applied Geochemistry*, 15: 1245-1263.
- St-Arnaud, L. 1994. "Water covers for decommissioning of sulfidic mine tailings impoundments". International Land Reclamation and Mine Drainage and third International Conference on the abatement of acidic drainage, April, 24-29, Pittsburgh, USA, 279-287.
- St-Arnaud, L.C., Yanful, E.K., 1993. Recouvrements d'eau pour la fermeture de parcs à résidus miniers sulfureux : Études de cas de Mattabi Mines. In Colloque sur le programme de Neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier. Val d'Or, Québec (Vol. 3, pp. 67-86).
- Stern, N., 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. New York and Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Take W. A., Chappel, M. J., Brachman R. W. I. and Rowe, R. K., 2007. Quantifying geomembrane wrinkles using aerial photography and digital image processing, *Geosynthetics International*, 14(4), 219-227.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), pp.485–498. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- Tibble, P.A., Nicholson, R.V., 1997. Oxygen consumption on sulphide tailings and tailings covers: measured rates and applications. In *Proceedings of the 4th ICARD*, Vancouver, BC (Vol. 31, pp. 647-661).
- TRNEE (2011) Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada, Ottawa. <http://nrt-trn.ca/wp-content/uploads/2011/09/prix-a-payer.pdf>
- Vick, S.G., 1990. *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd. Vancouver, B.C.
- Vidal, O., Goffé, B., et Arndt, N., 2013. Metal for a low-carbon society. *Nature Geoscience* 6 : 894-896.
- Vigneault, B., Campbell, P.G.C., Tessier, A, De Vitre, R., 2001. "Geochemical changes in sulfidic mine tailings stored under a shallow water cover". *Water Research*, 35:1066-1076.
- Villeneuve, M., 2004. Évaluation du comportement géochimique à long terme de rejets miniers à faible potentiel de génération d'acide à l'aide d'essais cinétiques. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Wilson, G.W., Williams, D.J., Rykaart, E.M., 2003. The integrity of cover systems – an update. *Proceedings of the 6th ICARD*, Cairns, Australia, 3, 14-17.
- Yanful, E.K., 1993. Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1207-1228.

- Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, H., McMullen, J., 2001. Capillary cover design for leach pad closure. SME Annual Mtg, Denver, 1-9.
- Zhan, G., Keller, J., Milczarek, M., Giraudo, J., 2014. 11 years of evapotranspiration cover performance at the AA leach pad at Barrick Goldstrike Mines. Mine Water and the Environment, 33(3): 195-205.

Annexe 1

Synthèse bibliographique

Financé par



**Rapport de synthèse bibliographique
Projet PU-2014-06-913
Étape 1**

***Analyse de risques et de
vulnérabilité liés aux
changements climatiques
pour le secteur minier
québécois***

Pour :

**Madame Renée Garon
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
Direction générale du développement
de l'industrie minière
5700, 4^e Avenue Ouest
Québec (Québec) G1H 6R1**



**INSTITUT DE RECHERCHE EN
MINES ET EN ENVIRONNEMENT**



**Unité de recherche et de service
en technologie minière
de l'Abitibi-Témiscamingue**

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971, poste 2558 Télécopieur : 819 797-6672

OCTOBRE 2014

Table des matières

	Page
1. Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte de la problématique.....	1
1.2 Mise en contexte du projet	1
2. Faits saillants des scénarios de changements climatiques pour le Québec.....	2
3. Faits saillants de la synthèse de la littérature	4
3.1 Synthèse des impacts des changements climatiques sur les activités minières.....	5
3.2 Impacts indirects.....	11
3.3 Initiatives d'évaluation de la vulnérabilité du secteur minier aux changements climatiques et mesures d'adaptation.....	12
3.3.1 Climate Change and Canadian Mining: Opportunities for Adaptation	12
3.3.2 Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry	13
3.3.3 Weather Variability and Climate Change: Challenges and Solutions for the Mining Sector Mining and Climate Change workshop	15
3.3.4 Adapting to Climate Change: Canada's First National Engineering Vulnerability Assessment of Public Infrastructure	15
3.3.5 Climate change and acid rock drainage: risks for the Canadian mining sector	15
3.3.6 Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale du Nunavut.....	16
3.3.7 True North: Adapting Infrastructure to Climate Change in Northern Canada	17
3.3.8 Understanding Mining Policy Drivers and Barriers in the context of Climate Change Impacts and Adaptation.....	18
3.3.9 Policy Issues as Barriers to Climate Changes Adaptation for the BC Mining Sector	19
4. Groupe de travail sur la Plate-forme d'adaptation du secteur minier.....	22
5. Étude de cas.....	23
5.1 A Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector - Enhancing Weather Resiliency at Nyrstar Myra Falls	23
5.2 Climate Change Planning at Glencore in Sudbury, Ontario	24

5.3	Case Studies Of Adaptation To Climate Change In The Yukon Mining Sector: From Planning And Operation To Remediation And Restoration	25
5.4	Adaptation To Climate Change And Potash Mining In Saskatchewan: Case study from the Qu'Appelle River Watershed	27
6.	Conclusion.....	29
7.	Références.....	31

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Sommaire des risques reliés aux changements climatiques	7
Tableau 2 :	Sommaire des opportunités reliées aux changements climatiques	10

1. Introduction

1.1 Mise en contexte de la problématique

Les données scientifiques qui démontrent le réchauffement du climat mondial sont bien établies. De nombreuses évidences soulignent que les changements climatiques ont déjà des impacts sur l'environnement et qu'ils seront encore plus importants dans le futur. Bien entendu, ces changements ont et auront des conséquences sur les écosystèmes, mais également sur les activités industrielles et la société en général. Ainsi, tous les secteurs d'activités économiques, sans égard à leur localisation géographique, devront faire face à des impacts directs et indirects des changements climatiques.

Étant donné ses constantes interactions avec le milieu naturel environnant, le secteur minier est particulièrement vulnérable aux changements climatiques. De plus, les activités minières reposent sur des infrastructures qui doivent avoir une certaine longévité, particulièrement les ouvrages de stockage des résidus. Ces derniers demeureront bien longtemps après que les exploitations seront terminées. Ainsi, ces infrastructures doivent performer durant plusieurs années et, par conséquent, leur design doit tenir compte des changements climatiques. En effet, la hausse de la température, les modifications aux régimes de précipitations et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes sont des exemples bien documentés de changements climatiques pouvant avoir des conséquences importantes sur les activités minières. Le secteur minier est donc à la fois exposé à des risques élevés mais aussi à de nouvelles opportunités en lien avec les changements climatiques. Par conséquent, le succès à long terme du secteur minier sera influencé par son habileté à s'adapter à ces changements.

Plusieurs rapports font état de la vulnérabilité de l'industrie minière par rapport aux changements climatiques et aux nombreux impacts qu'ils pourraient avoir sur ses activités. Toutefois, aucune étude n'a approfondi ce phénomène spécifiquement pour le secteur minier du Québec.

1.2 Mise en contexte du projet

C'est devant ces constats que le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) souhaite qu'une analyse des risques et vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier soit réalisée. Cette action s'inscrit dans le processus d'élaboration de la Stratégie d'adaptation aux changements climatiques du Québec. Le MERN désire agir de manière proactive pour réduire les vulnérabilités face aux changements climatiques dont les impacts comporteront des coûts importants et qu'il importe de minimiser.

L'Institut de recherche en mines et en environnement de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (IRME-UQAT et URSTM), a été sollicité pour réaliser une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois, dont la réalisation d'une synthèse bibliographique.

Ce document présente donc une synthèse des impacts actuels et anticipés des changements climatiques spécifiques au secteur minier qui sont recensés dans la littérature scientifique, dans la littérature spécialisée du secteur minier ainsi que dans les rapports produits par les instances gouvernementales et les organismes d'intérêt.

Ce rapport comprend également une synthèse des informations disponibles sur les scénarios de changements climatiques pour le Québec et leurs impacts sur le milieu. Cette section présente des prévisions des changements pour les paramètres climatiques d'intérêt pour le secteur minier; elle a été réalisée par Ouranos.

2. Faits saillants des scénarios de changements climatiques pour le Québec

Les faits saillants décrits dans cette section sont issus des travaux d'Ouranos^a (DesJarlais et al., 2010).

- D'après les modèles de climat, les changements climatiques se traduiront à la fois par des changements dans les moyennes de températures et de précipitations et par des modifications dans leur distribution, notamment pour certaines valeurs extrêmes.
- D'une façon générale, les températures sur l'ensemble du territoire québécois s'élèveront, de façon plus marquée en hiver qu'en été (Plummer et al., 2006). Ainsi, en hiver à l'horizon 2050, les températures augmenteraient de 2,5 à 3,8 °C dans le Sud du Québec et de 4,5 à 6,5 °C dans le Nord. En été, les hausses de température se situeraient entre 1,9 et 3,0 °C au Sud et entre 1,6 et 2,8 °C au Nord.
- Des augmentations de précipitations de 16,8 à 29,4 % au Nord et de 8,6 à 18,1 % au Sud sont attendues en saison hivernale à l'horizon 2050. La hausse des précipitations hivernales entraînera une augmentation de l'accumulation de neige au sol dans le Nord, alors que le Centre et le Sud du Québec verront une diminution. En saison estivale, la hausse des précipitations serait de 3,0 à 12,1 % dans le Nord alors que, dans le Sud, aucun changement significatif dans les précipitations n'est attendu.

^a Ouranos est un consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, qui a pour mission l'acquisition et le développement de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts ainsi que sur les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales.

- Le climat de la décennie 2050 serait caractérisé par un cumul de précipitations estivales de 150 mm dans le Nord, alors qu'il se maintiendrait à environ 450 mm dans les régions montagneuses les plus humides au Sud. En hiver, l'extrême nord du Québec recevrait 65 mm d'équivalent en eau de la neige, et le sud cumulerait 380 mm de précipitations.
- Malgré la hausse des précipitations hivernales sur tout le territoire, une diminution du cumul de neige au sol est projetée à l'horizon 2050 dans l'extrême sud du Québec en raison du raccourcissement de la saison froide. Dans le Nord, l'importante hausse projetée des précipitations hivernales amènera une augmentation du cumul de neige au sol malgré la hausse des températures.
- D'une façon générale, lorsque survient un changement, celui-ci s'accroît avec le temps, tout comme la plage de l'incertitude qui y est associée. Par contre, lorsque le changement se situe autour de zéro, cela se maintient jusqu'à l'horizon 2080.
- On note une prolongation de la saison propice aux orages de même qu'une augmentation des événements de pluie intense. Ces changements sont également projetés dans les régions où la moyenne des précipitations ne change pas.
- La température du pergélisol à 4 et à 20 m de profondeur sur l'ensemble du territoire s'est élevée en moyenne respectivement de 1,9 °C et de près de 1,1 °C entre 1994 et 2007 (Allard *et al.*, 2008). On constate un approfondissement notable de la couche active, c'est-à-dire la partie superficielle du terrain qui dégèle en été. On note également des tassements et des déformations du sol (pergélisol).
- L'augmentation de la fréquence des cycles de gel/dégel dans certaines régions est constatée.
- L'assèchement des sols, attribuable aux températures plus élevées et aux périodes sans pluie, particulièrement dans les zones argileuses, est rapporté.
- Les précipitations plus abondantes pourront provoquer des inondations, des glissements de terrain et des avalanches.
- Différentes projections climatiques laissent penser que la fréquence d'apparition et l'amplitude des crues d'été et d'automne pourraient se modifier. Les crues produites par la fonte des neiges pourraient, quant à elles, être devancées, et les débits maximums, atteints au moment de ces crues, auraient tendance à diminuer.

- Les étiages estivaux pourraient être plus sévères et de plus longue durée.
- Les écosystèmes seront fortement perturbés.
- Les populations arbustives seront en expansion.
- L'aire de répartition de certaines espèces animales vivant normalement plus au sud est aussi appelée à progresser vers le nord.
- Dans la mesure où le régime des précipitations, de l'évapotranspiration et de l'écoulement souterrain sera touché, le régime hydrologique des rivières évoluera et les températures de l'eau se réchaufferont.
- Des apports sédimentaires pourraient résulter de la détérioration du pergélisol, bien que leur ampleur reste à évaluer.
- On prévoit un impact non négligeable sur la faune aquatique régionale.

3. Faits saillants de la synthèse de la littérature

Une revue de la littérature scientifique et de la littérature spécialisée pour le secteur minier a été effectuée. La majorité de l'information pertinente se retrouve dans les rapports gouvernementaux ou d'association et d'organismes d'intérêt. On retrouve également des rapports de firmes de consultants qui ont été mandatées par des instances gouvernementales pour réaliser des études en lien avec les problématiques des changements climatiques pour le secteur minier. Une synthèse des rapports que nous jugeons les plus pertinents est présentée aux sections 3.3 et 5.

Voici quelques conclusions qui ressortent de la revue de la littérature :

- Le sujet des changements climatiques dans le secteur minier est en émergence. La majorité des publications mettent le focus sur les impacts associés aux changements climatiques, alors que la littérature scientifique portant sur l'adaptation des activités minières aux changements climatiques est beaucoup plus limitée.
- Toutes les étapes du cycle de vie d'une mine sont affectées par les changements climatiques.
- La très grande majorité de la littérature sur les changements climatiques en lien avec les activités minières au Canada se concentre dans les régions nordiques, alors que les études pour les autres régions sont pratiquement inexistantes. Cela pourrait

s'expliquer du fait que les changements climatiques sont beaucoup plus importants dans les régions nordiques, et que ces dernières présentent un fort potentiel minéral.

- Il existe beaucoup d'information quant aux impacts sur les infrastructures, notamment en lien avec la stabilité des ouvrages sur le pergélisol. Il existe d'ailleurs à ce sujet beaucoup d'information applicable au secteur minier (Auld and MacIver, 2007; Auld *et al.*, 2007).
- Les publications spécifiques aux impacts sur les opérations minières en tant que tels sont beaucoup moins nombreuses.
- Bien qu'il existe des études sur l'influence du climat sur la génération de drainage minier acide par exemple, il n'en demeure pas moins qu'il y a un déficit dans la littérature scientifique pour des études portant sur l'adaptation des techniques de restauration et de gestion des résidus dans un contexte de changements climatiques, notamment en ce qui concerne l'impact de ceux-ci sur les sites minier abandonnés.
- Il est clair que les changements climatiques sont une préoccupation grandissante dans le secteur minier. Néanmoins, les initiatives d'adaptation aux changements climatiques sont très variables d'une compagnie minière à l'autre. Alors que dans certains cas, les changements climatiques font partie intégrante de l'analyse de risque pour le développement de projet minier, dans d'autres cas, ils sont perçus simplement comme un risque pouvant mener à la modification de la réglementation et de la législation entourant le développement minier. De plus, certains financiers témoignent d'une tendance chez les investisseurs à exiger que les risques associés aux changements climatiques soient pris en compte dans l'analyse des projets miniers. (Ebinger and Vergara, 2011; Economy, 2012; LLP, 2011; Stenek *et al.*, 2010; Young, 2014).

3.1 Synthèse des impacts des changements climatiques sur les activités minières

Le *tableau 1* présente un résumé des différents impacts vécus et potentiels des changements climatiques pour le secteur minier. Les impacts listés ne sont pas exclusivement spécifiques au Québec; il s'agit plutôt d'une liste des impacts anticipés répertoriés dans la littérature pour l'ensemble du Canada. Naturellement, ces impacts n'influenceront pas nécessairement tous les projets miniers et pas avec la même intensité, car les caractéristiques locales et régionales demeurent toujours des variables plus importantes. Ainsi, les particularités propres à chacun des projets miniers influencent grandement la vulnérabilité face aux changements climatiques et à leurs différents impacts.

Les informations sont tirées de (Allard *et al.*, 2008; Anawar, 2013; Auld and MacIver, 2007; Auld *et al.*, 2007; Barrages, 2001; Bell *et al.*, 2008; Bjelkevick, 2005; Bourque and Simonet,

2008; CEMI, 2012; Champalle *et al.*, 2013; Chiotti and Lavender, 2008; Csavina *et al.*, 2012; DesJarlais *et al.*, 2010; Ford *et al.*, 2014; Furgal and Prowse, 2008; IMG-Golder, 2012b; Kosich, 2009; Kyhn and Elberling, 2001; Lavalin, 2013; Lemmen *et al.*, 2008; Morrison and Fahey, 2010; Neale *et al.*; Nelson and Schuchard, 2011; Pearce *et al.*, 2011; Pearce *et al.*, 2009; PIEVC, 2008; Prowse *et al.*, 2009; Robyn *et al.*, 2008; Romano *et al.*, 2003; Stratos and Consulting, 2001; Warren and Lemmen, 2014).

Tableau 1 : Sommaire des risques reliés aux changements climatiques

Changements climatiques	Impacts pour le secteur minier	Étapes affectées du cycle de vie d'une mine		
		Exploration	Exploitation	Restauration
- Fonte du pergélisol - Cycles de gel/dégel plus fréquents	Approfondissement notable de la couche active, c'est-à-dire la partie superficielle du terrain qui dégèle en été	X	X	X
	Affaissements de terrain ainsi que création et expansion de petits lacs de thermokarst	X	X	X
	- Risques pour l'intégrité structurale des infrastructures - Tassements et déformations du sol - Affaissement du sol	X	X	X
	Instabilité des pentes des fosses, des digues et des ouvrages de retenu (p. ex. : bassin de polissage)		X	X
	Affectation du drainage de surface	X	X	X
	Craquement, affaissement et dommages aux infrastructures de transport (routes, ponts, pistes d'atterrissage, etc.)	X	X	X
	Augmentation des coûts d'entretien des infrastructures et des routes	X	X	X
	Risques pour la génération de drainage minier acide (DMA) par l'exposition des résidus autrefois congelés			X
	Peut mener à la liquéfaction des sols et à des modifications importantes au patron d'écoulement des eaux souterraines et de surface. De telles modifications peuvent affecter les infrastructures de drainage d'un site minier.		X	X
Augmentation de la fréquence des événements extrêmes (tempêtes, inondations, vents violents)	Risques d'arrêt des opérations	X	X	X
	- Augmentation des bris d'équipement et de l'usure - Augmentation des coûts d'entretien	X	X	X
	- Vulnérabilité du transport (routier, aérien et maritime) - Augmentation du risque de fermeture de routes	X	X	
	Vulnérabilité de l'approvisionnement en énergie	X	X	X
	Formation de vagues pouvant mener à la resuspension des résidus		X	X
	Risques d'endommager les amas de neige servant à protéger les résidus			X
	Événements extrême pouvant causer l'isolation des sites et des travailleurs (communication, approvisionnement, transport)	X	X	

Changements climatiques	Impacts pour le secteur minier	Étapes affectées du cycle de vie d'une mine		
		Exploration	Exploitation	Restauration
	Perturbation de la chaîne d'approvisionnement (non seulement à l'échelle régionale mais aussi à l'échelle mondiale; exemple de l'arrêt de production d'alumineries en 2011 en raison de la fermeture de ports au États-Unis en raison d'ouragans)		X	
- Augmentation des précipitations moyennes - Augmentation des événements de précipitation extrême - Événements de fonte rapide	Augmentation des quantités d'eau à gérer	X	X	X
	Augmentation du risque d'inondation	X	X	X
	Difficulté pour le drainage des sites	X	X	X
	- Risques de saturation des parcs à résidus - Risques pour les débordements (<i>overtopping</i>) - Risques pour les déversements			X
	- Risques pour la stabilité des parcs à résidus - Risques pour les ruptures de digues		X	X
	Érosion des pentes des fosses, des digues et autres ouvrages de retenu		X	X
	Risques de glissements de terrain	X	X	X
	Augmentation des coûts d'entretien			
	Difficultés pour la gestion de la qualité de l'eau			
	- Difficultés d'accès aux sites en raison de la fonte des routes de glace - Réduction de la saison des routes de glace	X	X	X
Diminution des jours de gel	Réduction de la période pendant laquelle l'équipement lourd peut voyager sur la toundra pouvant entraîner la réduction des activités d'exploration	X		
	Diminution de la dilution des effluents pendant l'été et l'automne en raison de la diminution du débit		X	X
	Changements potentiels de la composition du drainage minier		X	X
	Difficultés pour la réduction des poussières		X	X
	- Augmentation du DMA - Évaporation des couvertures aqueuses pouvant mener à l'exposition des résidus			X
	Cas extrêmes pouvant mener à une pénurie en eau	X	X	X
	Conflit potentiel avec les communautés locales pour l'approvisionnement en eau		X	
	- Diminution de la qualité de l'eau pouvant mener à la réduction de la production (traitement du minerai, forage, abat poussière, etc.) - Cas extrêmes pouvant mener à l'arrêt des opérations	X	X	
	Changements dans la gestion de l'eau, par exemple utilisation de source alternative de moins bonne qualité, recyclage, etc.	X	X	X

Changements climatiques	Impacts pour le secteur minier	Étapes affectées du cycle de vie d'une mine		
		Exploration	Exploitation	Restauration
	• Réaffectation et mobilisation du personnel à d'autres tâches lorsque la gestion de l'eau est problématique (impact sur la production)			
	• Diminution des niveaux d'eau dans les lacs et rivières pouvant affecter le transport	X	X	
	• Risque plus élevé de feux de forêt pouvant mener à l'arrêt des opérations ou encore à l'isolement des sites et des travailleurs	X	X	
• Augmentation de la température	• Augmentation du DMA • Augmentation de la vitesse de réaction • Dégel de résidus pouvant mener à leur oxydation			X
	• Risques d'endommager les amas de neige servant à protéger les résidus de l'érosion éolienne		X	
	• Augmentation des coûts de climatisation		X	
	• Des journées de chaleur extrême peuvent contribuer à augmenter la température sous terre et ainsi menacer la sécurité des travailleurs. Certaines mines à Sudbury ont observé une augmentation du nombre de jours pendant lesquels la production sous terre a été arrêtée à cause des conditions de température trop élevée		X	
	• Risques d'impact environnemental reliés à la décharge d'eau chaude pour le refroidissement des centrales thermiques		X	
• Augmentation du niveau de la mer	• Risques pour les installations côtières		X	
• Changements de la flore et de la faune	• Les plans de restauration et de revégétalisation doivent tenir compte des changements d'habitat et de biodiversité			X
	• Difficulté à restaurer les sites de façon à revenir aux habitats originaux.			
	• Invasion d'espèces nuisibles		X	X
	• Risque d'augmentation de transmission de maladies pour les travailleurs			
	• Une modification des espèces végétales peut affecter la stabilité du pergélisol dans les aires de restauration minière.			X

Tableau 2 : Sommaire des opportunités reliées aux changements climatiques

Changements climatiques	Impacts pour le secteur minier	Étapes affectées du cycle de vie d'une mine		
		Exploration	Exploitation	Restauration
Augmentation de la température	- Augmentation de la saison navigable dans les régions nordiques - Augmentation de la saison d'exportation du minerai - Dans certains cas, augmentation de la viabilité économique de certains projets	X	X	
	Nouvelles routes navigables donnant accès à de nouvelles options de transport	X	X	
	Routes de transport du minerai plus courtes		X	
	- Accès à de nouvelles régions, nouvelles opportunités pour l'exploration - L'allongement des saisons caractérisées par des plans d'eau libre de glace permettra l'accès à des secteurs peu explorés favorisant ainsi les possibilités d'augmenter la quantité de forage e, par le fait même, mener à de nouvelles découvertes	X		
	Une possible réduction des coûts et des problèmes techniques associés à une réduction de l'épaisseur du pergélisol pour les forages de surface	X		
	Un pergélisol caractérisé par des températures plus élevées et un dégel relativement rapide peut faciliter l'accès au minerai et réduire les coûts de l'exploitation de certains types de gisement au Canada, en particulier les dépôts de placers aurifères		X	
	Diminution des coûts de chauffage			
- Augmentation des précipitations - Changement au régime des précipitations	- Augmentation du potentiel hydroélectrique - Facilité à maintenir saturés les recouvrements ou des composantes des recouvrements pour contrer le DMA		X	

3.2 Impacts indirects

Les activités minières sont directement affectées par l'environnement dans lesquelles elles ont lieu. Les changements climatiques ont donc des impacts directs sur celles-ci. De plus, le secteur minier repose sur une longue et complexe chaîne de valeur qui peut également être affectée par les changements climatiques. Ces effets, que l'on pourrait qualifier d'indirects, sont nombreux et leurs impacts pourraient être tout aussi importants. Le présent rapport ne s'attarde pas en détails sur ces impacts, qui sont au niveau environnemental mais aussi souvent d'ordre social et économique. Il est cependant très important de considérer également ces impacts économiques et sociaux afin d'alimenter la réflexion sur la vulnérabilité du secteur minier québécois aux changements climatiques.

Par exemple, les impacts des changements climatiques sur la société et la santé humaine sont nombreux et divers (DesJarlais et al., 2010; IPCC, 2014a; Warren and Lemmen, 2014). Il est difficile de prévoir exactement à quel degré ils affecteront le secteur minier et ses travailleurs, mais chose certaine ils devront être considérés. Par exemple, les perturbations environnementales sociales et économiques qui seront vécues par les communautés minières ainsi que les difficultés des communautés autochtones à maintenir leurs activités traditionnelles.

À titre d'exemple, les changements climatiques peuvent accentuer des enjeux d'acceptabilité sociale des projets miniers, particulièrement dans les régions plus sensibles ou affectées par le climat. L'image et la réputation du secteur minier peuvent également être affectées par le contexte des changements climatique, car il est un grand émetteur de gaz à effet de serre (GES). À l'inverse, dans le cas où le développement minier contribue au développement des communautés d'accueil en apportant de nouvelles infrastructures mieux adaptées aux nouvelles réalités climatiques (route, pont, chemin de fer, etc.), les changements climatiques peuvent améliorer l'acceptabilité sociale des projets.

Un autre élément important qui n'est pas abordé directement dans ce rapport est l'impact des modifications des réglementations encadrant les activités minières qui pourraient représenter de nouveaux défis et des coûts supplémentaires pour le développement de projets miniers. La réglementation appelée à s'adapter avec de nouvelles normes plus exigeantes, notamment en matière d'émission de GES et de restauration, en est un bon exemple. L'augmentation des coûts d'assurances est aussi un autre exemple des nombreux effets indirects pouvant affecter le secteur minier (LLP, 2011; Young, 2014).

Cet état de fait rappelle l'importance pour le secteur minier d'adopter une approche holistique quand vient le temps de planifier son développement dans un contexte de changements climatiques.

3.3 Initiatives d'évaluation de la vulnérabilité du secteur minier aux changements climatiques et mesures d'adaptation

Cette section présente une synthèse de quelques-uns des principaux rapports d'initiatives d'évaluation de la vulnérabilité du secteur minier aux changements climatiques ainsi que des stratégies d'adaptation.

3.3.1 *Climate Change and Canadian Mining: Opportunities for Adaptation (Pearce et al., 2009)*

Ce rapport, publié par la Fondation David Suzuki en 2009, décrit les vulnérabilités, les risques et les opportunités auxquels fait face le secteur minier canadien par rapport aux changements climatiques; il souligne également les opportunités d'adaptation et de réduction des émissions de GES dans le secteur minier. En plus d'une revue de littérature, ce rapport contient une analyse de la perception des changements climatiques par l'industrie sur la base de sondages effectués auprès de 48 participants au PDAC. Il documente également les différentes stratégies adoptées au Canada pour gérer les impacts des changements climatiques.

Les principales conclusions du rapport sont les suivantes :

- L'exposition et la sensibilité au climat sont proéminentes dans le secteur minier.
- Les changements climatiques représentent plusieurs risques pour les opérations minières.
- La planification de l'adaptation à long terme aux changements climatiques est largement absente dans le secteur minier.
- L'atténuation des impacts plutôt que l'adaptation est présentement la façon de faire la plus répandue. En d'autres mots, le secteur minier est beaucoup plus réactif que proactif.
- Dans bien des cas, les solutions d'ingénierie et les technologies existent pour une grande partie des problèmes (bâtiments, transport, routes, digues, gestion des résidus, etc.). Selon les auteurs, l'investissement dans la planification des adaptations générera des économies plus qu'une réaction aux impacts du climat une fois qu'ils surviennent.
- La mauvaise compréhension des changements climatiques anticipés exacerbe la vulnérabilité du secteur. Le secteur minier est généralement bien au fait des changements climatiques, mais la nature des impacts probables sur les opérations minières est mal comprise.
- Une part significative des vulnérabilités se situe dans la phase post exploitation. D'un point de vue opérationnel, les mines ne doivent pas nécessairement être conçues pour s'adapter à l'évolution des conditions climatiques étant donné leur espérance de vie plutôt courte. Toutefois, les changements climatiques pourraient présenter des risques potentiellement graves pour les étapes de restauration et de fermeture. Si les infrastructures sont développées uniquement en fonction de critères de conception pour le régime climatique actuel, le risque de défaillance devient plus prononcé. Ce

qui est particulièrement préoccupant, c'est le grand nombre des sites miniers abandonnés à travers le pays qui n'ont pas encore été évalués pour la vulnérabilité aux changements climatiques.

- Le secteur minier est affecté par une multitude d'autres facteurs tels que les cycles de la valeur des métaux et le marché mondial ainsi que les conflits d'usage du territoire et les enjeux d'acceptabilité sociale. Tous ces facteurs peuvent influencer le succès des projets miniers au Canada. À bien des égards, ils pèsent plus dans la balance et peuvent par conséquent avoir pour effet de minimiser l'importance des impacts des changements climatiques.
- La collaboration entre les compagnies minières, les associations minières, les législateurs et les autres secteurs industriels sont des éléments importants pour augmenter les chances de succès.
- Les besoins en recherche sont importants :
 - pour identifier les mesures d'adaptation et les technologies les plus efficaces et les moins coûteuses;
 - pour adopter des réglementations en mesure d'encadrer les activités minières durant la vie utile d'une mine mais également pour sa restauration;
 - pour améliorer les modèles climatiques et les projections des changements climatiques afin de mieux comprendre les risques pouvant affecter les activités minières et les régions minières;
 - pour monitorer les conditions climatiques des opérations minières.

3.3.2 *Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry (ICMM, 2013)*

L'*International Council on Mining & Metals* (ICMM) a lancé en 2009 sa politique sur les changements climatiques (ICMM, 2009). Ce rapport découle donc du programme d'activité de l'ICMM adressant les enjeux des changements climatiques.

L'objectif de ce rapport est d'élaborer sur les risques pour les opérations matérielles de l'industrie des mines et métaux. Il explore également la façon dont les entreprises minières et métallurgiques pourraient commencer à concevoir et développer des stratégies d'adaptation face à ces risques. Ce rapport vise à améliorer la compréhension par le public des impacts des changements climatiques sur le secteur des mines et métaux et des options d'adaptation. Le rapport adresse trois principales questions :

- Pourquoi est-il important pour le secteur des mines et métaux de comprendre les impacts attribuables aux changements climatiques et de développer des stratégies d'adaptation?
- Quels sont les impacts des changements climatiques pertinents et comment les sociétés minières peuvent-elles évaluer les risques et les opportunités?
- Quelles sont les options disponibles pour l'adaptation aux impacts des changements climatiques pour le secteur de l'exploitation minière?

Les principales conclusions du rapport sont les suivantes :

- Les changements climatiques présentent un risque matériel pour le secteur minier.
- Le secteur minier présente des caractéristiques particulières qui augmentent son exposition aux risques :
 - Le secteur minier opère dans des régions souvent isolées et dans des climats hostiles.
 - Les opérations minières se déroulent souvent dans des environnements fragiles et sensibles aux changements climatiques.
 - Les opérations reposent sur d'imposantes infrastructures qui doivent avoir de longues durées de vie. Elles reposent également sur des chaînes d'approvisionnement sensibles aux changements climatiques.
 - Les opérations minières dépendent d'intrants sensibles aux changements climatiques tels que l'eau et l'énergie. Elles devront peut-être compétitionner avec d'autres utilisateurs du territoire pour ces ressources.
 - Les compagnies minières doivent composer avec une multitude de parties prenantes, telles que les travailleurs, les gouvernements, les communautés locales, la société civile, les groupes environnementaux, etc.
- Le secteur minier est très expérimenté pour identifier et gérer les risques. Les changements climatiques sont un élément supplémentaire à intégrer à la culture de gestion de risques.
- Les attentes des parties prenantes changent en fonction des risques face aux changements climatiques. Les investisseurs considèrent de plus en plus les risques à long terme des changements climatiques dans la performance des compagnies. Les financiers commencent à imposer des critères pour tenir compte des risques liés aux changements climatiques. Cela augmente l'importance pour les compagnies minières d'entreprendre des actions pour identifier les risques, les communiquer et s'y adapter.
- Les actions d'adaptation créent des opportunités pour renforcer la réputation du secteur auprès de parties prenantes clés telles que les communautés locales et les gouvernements. Elles permettent aussi d'atteindre des objectifs de développement durable.
- Les entreprises minières prennent déjà des initiatives pour s'adapter aux changements climatiques, mais elles doivent mettre l'accent sur les risques.
- La prochaine étape est d'identifier les façons d'incorporer les considérations relatives aux changements climatiques dans les procédures de gestion de risques et de planification existantes.
- Les changements climatiques apportent aussi des opportunités pour le secteur minier.
 - Réduction de certains risques comme la transmission de maladies dans certaines régions.
 - Plus grand accès à des nouvelles réserves.
 - Périodes d'exploitation plus longue dans les régions nordiques.

- Les compagnies avec un portfolio de projets diversifiés géographiquement ou encore bien préparées aux impacts des changements climatiques pourraient avoir un avantage compétitif pour augmenter leur part de marché.

3.3.3 *Weather Variability and Climate Change: Challenges and Solutions for the Mining Sector Mining and Climate Change workshop (CEMI, 2012)*

En février 2012, le *Center for Excellence in Mining Innovation* (CEMI) et le *Ontario Center for Climate Impacts and Adaptation Ressources* (OCCIAR) ont tenu un colloque ayant pour objectif de sensibiliser le secteur minier canadien aux impacts des changements climatiques. Plus spécifiquement, le programme visait à communiquer les impacts des changements climatiques et des méthodes pour évaluer les risques et la vulnérabilité ainsi que présenter des exemples pratiques et faciliter les échanges entre les opérateurs miniers et divers experts du domaine des changements climatiques.

Les vidéos des présentations sont disponibles sur le site Web du CEMI www.miningexcellence.ca

3.3.4 *Adapting to Climate Change: Canada's First National Engineering Vulnerability Assessment of Public Infrastructure (PIEVC, 2008)*

Ingénieurs Canada a mis sur pied un comité sur la vulnérabilité des infrastructures publiques qui regroupe les trois paliers de gouvernement ainsi que des organisations non gouvernementales. Ce comité a produit un rapport qui examine les vulnérabilités et la capacité d'adaptation de quatre catégories d'infrastructures, soit les bâtiments, les routes et les structures associées, le système de gestion des eaux de pluie et des eaux usées et les ressources hydriques. Bien que ce rapport ne soit pas spécifique au secteur minier, son contenu est tout de même d'intérêt, car il lui est largement applicable.

La ville de Sudbury a servi d'étude de cas dans la catégorie des routes, car cette région a des exploitations minières majeures et qu'elle constitue un corridor de transport vital pour les opérations minières. Ce rapport permet donc de comprendre certains facteurs de risques auxquels fait face le secteur minier.

3.3.5 *Climate change and acid rock drainage: risks for the Canadian mining sector (Stratos and Consulting, 2001)*

Sur la base du programme *Mine Environment Neutral* (MEND), l'Association minière du Canada a commandé ce rapport pour évaluer les impacts des changements climatiques dans les mines canadiennes sur le drainage minier acide et la lixiviation des métaux. Cette évaluation est une analyse des risques de haut niveau plutôt qu'une étude technique détaillée, ce qui exigerait une connaissance approfondie des conditions locales. Des estimations indicatives des coûts ont été élaborées pour certains scénarios d'impact.

L'étude conclut en présentant les messages clés pour les opérations minières et la fermeture par rapport aux risques de drainage rocheux acide dans un contexte de changements climatiques. Elle note qu'un plus grand nombre d'options d'adaptation, dont des options plus efficaces, sont disponibles plus tôt dans la vie de la mine. Les mesures d'adaptation sont également moins coûteuses lorsqu'elles sont développées et intégrées dès la phase de planification et de conception.

3.3.6 Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale du Nunavut

Le programme de l'Initiative de collaboration pour l'adaptation régionale (ICAR) du Nunavut est une initiative à l'échelle territoriale mise en place par le gouvernement du Nunavut dans le cadre du programme d'Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale de Ressources naturelles Canada. L'objectif de l'ICAR du Nunavut consiste à favoriser l'adaptation aux changements climatiques à l'égard des questions revêtant un intérêt particulier pour le territoire, comme les changements au pergélisol et les impacts liés à ces changements sur le secteur minier et les infrastructures sur lesquelles repose ce secteur.

Les objectifs de l'ICAR visent notamment à améliorer la résilience du Nunavut à l'égard d'un climat changeant, grâce aux activités de collaboration permettant d'examiner les infrastructures pour soutenir les activités minières, en particulier la gestion des risques que posent les changements climatiques quant aux installations de confinement des résidus et des déchets ainsi qu'aux infrastructures portuaires et routières, et à améliorer la capacité de favoriser la prise de décisions en matière d'adaptation dans ces domaines.

Le gouvernement du Nunavut a commandé des analyses très intéressantes.

- *Vulnerability Assessment of the Mining Sector to Climate Change* (IMG-Golder, 2012b)

Ce projet consistait à évaluer la vulnérabilité des installations minières, notamment pour la gestion des résidus et des infrastructures portuaires. Le projet porte sur l'ampleur des changements climatiques anticipés. Le rapport propose des stratégies potentielles d'adaptation afin de déterminer comment les changements climatiques vont affecter les infrastructures minières et il identifie des mesures qui peuvent être employées pour minimiser les impacts.

- *Good Environmental Practices for Northern Mining and Necessary Infrastructure* (IMG-Golder, 2012a)

Ce projet consiste à tenir des consultations auprès des intervenants du secteur minier, des organismes de réglementation et d'autres décideurs afin de documenter les pratiques minières nordiques actuelles. Le rapport propose des recommandations pour une

meilleure gestion des bonnes pratiques afin de se pencher sur les enjeux reliés aux changements climatiques pour le secteur minier nordique.

- *Engeneering Challenges for Tailings Managment Facilities and Associated Infrastrutures with Regard to Cliamte Change in Nunavut.* (Assoc., 2012b)

Cette étude, également commandée par le ICAR, décrit les défis d'ingénierie pour les grandes infrastructures dédiées à la gestion des résidus sur le vaste territoire du Nunavut dans le contexte des changements climatiques prévus. Il comprend des recommandations techniques pour les techniques de gestion des résidus à être utilisées dans les futurs projets miniers au Nunavut jusqu'à l'an 2100. Le rapport se concentre principalement sur la perte potentielle de l'intégrité du sol gelé comme un mécanisme de confinement naturel pour stocker en toute sécurité des résidus. Le rapport étudie également les changements dans les précipitations et l'évaporation, de façon à ce que la gestion de l'eau conçue de manière adéquate afin de tenir compte des évènements de fortes pluies anticipés pour l'avenir. Bien que l'étude ne précise pas les types de mines ou de minerais, elle suppose que les mines qui produisent des déchets dangereux et avec de forts volumes seront les plus difficiles à gérer.

3.3.7 True North: Adapting Infrastructure to Climate Change in Northern Canada (Canada, 2009a)

La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) a réalisé cette étude pour mettre en évidence les risques pour les infrastructures du Nord, y compris les infrastructures minières critiques, en lien avec les changements climatiques et les possibilités d'adaptation. Elle souligne la nécessité de s'assurer que les infrastructures soient résilientes pour l'ensemble de leur durée de vie. Le rapport propose des recommandations sur la façon d'utiliser les outils de gestion des risques existants pour réduire les vulnérabilités des infrastructures et de s'adapter plus efficacement aux changements climatiques dans le Nord du Canada.

La TRNEE recommande que nous fassions de l'adaptation aux changements climatiques une priorité, en mettant l'accent sur quatre éléments :

- Intégrer les risques climatiques dans les politiques gouvernementales existantes, les processus et les mécanismes;
- S'assurer que les intérêts nordiques sont représentés et impliqués dans le développement de solutions d'adaptation aux changements climatiques;
- Renforcer la capacité de la recherche scientifique et de communication de l'information dans le Nord pour soutenir les efforts d'adaptation à long terme;
- Renforcer les capacités de la communauté afin de gérer les risques pour les infrastructures nordiques et profiter des opportunités.

3.3.8 Understanding Mining Policy Drivers and Barriers in the Context of Climate Change Impacts and Adaptation (Rodgers et al., 2014)

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité et le potentiel des outils contenus dans les politiques minières de l'Ontario et du Canada qui visent à supporter les actions à mettre en place pour s'adapter aux changements climatiques. Plus particulièrement, cette étude porte sur l'analyse de deux politiques et de huit instruments politiques étroitement reliés à la conception et à la gestion des parcs à résidus et à la planification de la phase de fermeture des mines en Ontario.

Les objectifs spécifiques consistent à identifier :

- les principaux aspects qui favorisent ou freinent la mise en place des mesures d'adaptation pour le secteur minier;
- les principaux aspects qui sont difficiles à adapter en milieu naturel;
- la mesure de l'influence des outils de la politique d'exploitation minière sur la prise de décisions au sein des compagnies minières en regard de l'adaptation aux changements climatiques.

Les recommandations générales de cette étude sont les suivantes :

- Une communication claire et efficace des objectifs environnementaux et des impacts des changements climatiques peut améliorer la capacité d'une politique à promouvoir et à supporter les mesures d'adaptation pour le secteur minier;
- Afin de promouvoir et de supporter de manière plus efficace l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur minier, les instruments politiques tels que les règlements et les directives doivent refléter des critères, des normes et des seuils qui prennent en considération les impacts des changements climatiques;
- Les conséquences à l'inaction des entreprises minières par rapport aux changements climatiques peuvent renforcer les instruments politiques et conduire à des mesures d'adaptation;
- Pour aider les gestionnaires d'entreprises minières à prendre en considération les impacts et les mesures d'adaptation aux changements climatiques, de nouvelles lignes directrices sont requises pour un certain nombre de points clés dont :
 - les impacts des changements climatiques;
 - les délais des impacts climatiques;
 - l'incertitude reliée à l'utilisation des données climatiques dans le processus de décision;
 - la sélection et l'utilisation de différents scénarios climatiques;
 - le suivi d'un ensemble plus large de conditions environnementales tels les indicateurs de changement climatique qui pourraient se rapporter à l'activité et/ou aux installations minières.

Cette étude a mis en évidence l'existence d'opportunités qui permettront d'ajuster les politiques et les instruments politiques déjà mis en place de façon à considérer les impacts des changements climatiques. Cette étude permet aussi de cibler plusieurs points clés à considérer :

- Identifier et prioriser les outils politiques clés qui auront un impact sur plusieurs secteurs ou industries;
- Réaliser des analyses portant sur d'autres outils politiques déjà existants, principalement sur les nombreux aspects reliés à la conception et de la planification de projets miniers;
- Consulter les décideurs de l'industrie (au moyen de sondages ou d'ateliers) afin de développer une meilleure compréhension de leurs besoins et de comprendre leurs contraintes face à l'application de mesures d'adaptation pour les changements climatiques;
- Rechercher et développer des incitatifs économiques à long terme qui pourront contribuer à stimuler des actions d'adaptation aux changements climatiques pour des secteurs ou des industries critiques. Prioriser les industries où les impacts reliés au climat pourraient causer le plus de dommages à l'environnement et à la santé des communautés;
- Développer un cadre qui fournira des orientations pour les responsables et décideurs politiques en ciblant plus efficacement les risques associés aux changements climatiques par l'entremise d'outils politiques.

3.3.9 Policy Issues as Barriers to Climate Changes Adaptation for the BC Mining Sector (Lavalin, 2013)

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'engagement du gouvernement de la Colombie-Britannique envers l'évaluation des impacts des changements climatiques pour les secteurs sensibles. Devant les risques potentiels que représentent les changements climatiques pour le secteur minier tels que la rupture de digues contenant les résidus miniers, le gouvernement de la Colombie-Britannique a commandé une analyse pour examiner les politiques provinciales et les programmes liés au secteur de l'exploitation minière, avec les trois objectifs suivants :

- A. Identifier les aspects reliés à la planification et à la mise en œuvre de mesures d'adaptation qui anticipent les risques climatiques pour le secteur de l'exploitation minière;
- B. Identifier les aspects qui créent des obstacles à la mise en œuvre de mesures d'adaptation et proposer des politiques alternatives;

- C. Identifier les opportunités pour intégrer les considérations liées aux changements climatiques et proposer des activités susceptibles de faciliter l'action dans ces domaines.

La portée du projet a été limitée aux impacts climatiques pour une exploitation minière typique et en lien avec les politiques et programmes. Le projet n'a pas tenu compte des effets sur le secteur qui pourrait se produire à l'extérieur des exploitations, tels que les infrastructures de soutien comme l'approvisionnement en énergie et le transport. Les questions liées à l'extraction de sable et de gravier ne sont pas directement pris en compte, bien que beaucoup des conclusions et recommandations de l'étude soient aussi pertinentes pour ces activités.

L'étude visait à répondre à cinq questions clefs :

- A. Les politiques et programmes du gouvernement provincial encouragent-ils l'industrie à évaluer les risques liés au climat et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans le contexte des changements climatiques?
- B. Est-ce que les politiques et les programmes qui régulent et soutiennent l'industrie minière sont résilients sous un climat changeant? Continueront-ils d'atteindre leurs objectifs dans un climat changeant?
- C. Les politiques et les programmes actuels permettent-ils la flexibilité nécessaire pour répondre à des circonstances imprévues?
- D. Quelles sont les implications sociales, économiques et environnementales de l'adaptation aux changements climatiques des politiques et programmes gouvernementaux?
- E. Quels sont les points d'entrée les plus efficaces dans les politiques et les programmes gouvernementaux pour intégrer les évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques et les mesures d'adaptation?

Les recommandations de l'étude sont nombreuses et bien détaillées. Néanmoins, dans le cadre de cette synthèse, nous nous limitons à présenter les conclusions générales :

- Plusieurs processus clés existants peuvent être améliorés afin que les décisions conduisent à l'amélioration de la résilience face aux changements climatiques. Cela demande de rendre accessibles l'information et les orientations disponibles liées au climat dans les meilleurs délais.
- La législation actuelle de la Colombie-Britannique est généralement «favorisante» en termes de permettre au gouvernement et à l'industrie de mettre en œuvre des mesures pour l'évaluation des risques liés au climat et des mesures d'adaptation. De façon générale, la législation ne contient pas d'obstacles pour les organismes de réglementation ou pour l'industrie procédant à des évaluations climatiques et d'atténuation des impacts.

- Les obstacles pour rendre le secteur minier de la Colombie-Britannique plus résilient aux changements climatiques sont généralement liés à la sensibilisation. Les décideurs doivent être mieux informés et conseillés par rapport aux changements climatiques et leur interprétation.
- Les impacts des changements climatiques et l'adaptation des lignes directrices sont particulièrement importants pour les décisions réglementaires liées à la gestion de l'eau. La priorité devrait être donnée aux travaux de conception des ouvrages de dérivation de l'eau (p. ex. : les bassins de décantation/barrages) étant donné l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes.
- Accroître l'utilisation des capacités provinciales en géomatique pour appuyer les décisions d'autorisation. Actuellement, certaines régions utilisent la géomatique pour appuyer les décisions de permis d'exploitation minière, d'autres, pas. De plus amples informations doivent être collectées entre les différentes régions en ce qui concerne les meilleures pratiques. Les décisions seront mieux appuyées par ces informations existantes ainsi que par de nouvelles informations (p. ex. : la cartographie du pergélisol).
- Le terme «gestion adaptative» en est un soulevé à la fois pendant le processus d'entrevue et lors de l'atelier de consultation des experts du secteur. L'objectif d'une approche de gestion adaptative est de développer un processus de réglementation qui permet la mise à jour des décisions fondées sur de nouvelles informations. Bien que la *Loi sur les mines* crée essentiellement un processus de gestion adaptative par les exigences de mise à jour des permis et un large pouvoir de décision de ses inspecteurs, le processus de certificat d'évaluation environnementale est une décision statique où les résultats de l'évaluation du projet et les hypothèses connexes ne sont pas systématiquement réévalués. En outre, il est à craindre que la lutte contre l'évolution des impacts climatiques puisse exiger une nouvelle demande de permis pour la mine ou une modification du certificat d'évaluation environnementale. Cela pourrait effectivement être un obstacle réglementaire. Par contre, cela peut s'avérer la seule façon d'enquêter la solidité des mines existantes face aux changements climatiques. Cependant, pour de nouvelles mines, le processus d'évaluation environnementale prépare le terrain pour l'adaptation et la collecte d'information pour de potentielles exigences de surveillance en vertu de la *Loi sur les mines*. Ce qui semble manquer est un lien entre les résultats d'évaluation environnementale et les processus de permis miniers qui permettrait au législateur de poser la question suivante : tenons-nous compte des bonnes préoccupations? Sans une adaptation du cadre de gestion établi au cours du processus d'évaluation environnementale qui prendrait en compte les vulnérabilités du cycle de vie d'un projet, il est difficile de prévoir comment la *Loi sur les mines* s'adapterait.
- Le gouvernement et l'industrie peuvent collaborer pour développer et diffuser les meilleures pratiques quant à l'utilisation des projections climatiques dans la prise de décision. Plusieurs dirigeants de l'industrie minière montrent la volonté de s'engager

dans un tel processus. Les associations de l'industrie comme l'Association minière du Canada (MAC) sont engagées directement dans la sensibilisation de l'industrie aux changements climatiques et dans le développement d'initiatives, tels que *Vers le développement minier durable* (VDMD), qui pourrait en théorie être mis à profit pour diffuser les meilleures pratiques.

- D'autres groupes, comme l'Association canadienne des barrages (ACB), l'Association des ingénieurs et géoscientifiques de la Colombie-Britannique (APEGBC) et les universités, influencent beaucoup les décisions de conception à travers la création de guides et les programmes d'études. La réglementation minière diffère souvent des exigences développées par ces groupes. Par exemple, les lignes directrices actuelles sur la sécurité des barrages, qui ont une large application dans le secteur minier, sont actuellement à l'étude par l'APEGBC. Cela pourrait conduire à de nouvelles lignes directrices de pratiques professionnelles pour les examens de la sécurité des barrages. L'examen de l'APEGBC et d'autres processus d'examen à venir offrent la possibilité d'établir la manière dont les professionnels qualifiés peuvent intégrer les changements climatiques dans leurs pratiques.
- Des investissements considérables dans le développement des connaissances pour l'adaptation et les outils d'atténuation s'effectuent dans d'autres secteurs (p. ex. : municipal), qui pourraient être réinterprétées et communiquées pour une application dans le secteur minier.

3.4 Groupe de travail sur la Plate-forme d'adaptation du secteur minier

À l'intérieur de la programmation de sa division des impacts et de l'adaptation liés au changement climatique, Ressources naturelles Canada a mis sur pied un groupe de travail sur la Plate-forme d'adaptation du secteur minier. Celui-ci comprend des membres des associations nationales de l'industrie, des organisations professionnelles nationales, des représentants des gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux ainsi que d'autres organisations compétentes pour répondre aux priorités d'adaptation aux changements climatiques. Ce groupe est intégré à la nouvelle plateforme plus large d'adaptation liée aux changements climatiques de Ressources naturelles Canada. Les participants des groupes de travail peuvent partager leurs connaissances, leurs capacités et des ressources financières pour produire et partager des informations et des outils pour comprendre et s'adapter aux effets des changements climatiques. Ce groupe a notamment contribué à la réalisation de plusieurs des études de cas présentées à la section suivante.

4. Étude de cas

4.1 *A Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector - Enhancing Weather Resiliency at Nyrstar Myra Falls (Counsil, 2013)*

Cette étude a été préparée par le *Fraser Basin Council* (FBC) en partenariat avec la *Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation* (MIRARCO) de Sudbury et son organisme source, l'*Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources* (OCCAR). Les fonds nécessaires à la recherche proviennent du programme d'Amélioration de la compétitivité dans un contexte de changements climatiques de Ressources naturelles Canada.

La mine Myra Falls, propriété de la compagnie Nyrstar, est localisée en Colombie-Britannique. À l'hiver 2006, de fortes pluies ont provoqué d'importantes inondations et ont mis à risque le maintien des opérations minières. Cet événement a mis en évidence l'un des principaux défis associés aux changements climatiques et auxquels la compagnie Nyrstar devra faire face au cours des prochaines années à la mine Myra Falls. Des événements de pluie intense, particulièrement en saison hivernale, peuvent provoquer le ruissellement d'une importante quantité d'eau attribuable à la présence d'un sol gelé et de l'importante couverture de neige. Ces événements provoquent d'importantes inondations ainsi que des coulées de débris qui ont pour effets de causer d'importants dommages aux principales infrastructures (ponts, digues, etc.). Lors de tels événements, les opérations d'exploitation souterraine risquent également d'être inondées si la quantité d'eau est excessive et si la capacité du système de pompage est insuffisante. Dans de tels cas, les opérations minières pourraient être suspendues pour une période prolongée.

Les conséquences financières associées à l'épisode de pluie intense et à l'inondation de 2006 sont de l'ordre de 4 M\$ en perte de production auxquels s'est ajouté un montant de 250 k\$ pour pomper l'excédent d'eau associé à l'événement et de 55 k\$ pour l'installation d'un système de pompage d'urgence destiné à traiter des événements d'amplitude similaire dans le futur. À ces montants s'est ajoutée une somme de 100 k\$ pour creuser un second canal permettant de drainer les effluents. Suite à cet événement, la majorité des fonds et des efforts réalisés par la compagnie ont porté sur l'amélioration et la surveillance des infrastructures physiques, dont la gestion des parcs à résidus, les routes, les chemins et les ponts, ainsi que sur la gestion générale des eaux du site minier. Les coûts impliqués pour obtenir une réduction à un certain niveau de risque ont constitué un élément clé dans le processus de décision pour déterminer les mesures à prendre pour que la compagnie s'adapte aux conditions climatiques futures. Nyrstar considère que les investissements suivants devraient améliorer sa capacité à répondre à des événements climatiques extrêmes dans le futur : a) améliorer la capacité de prédire, avec plus de précision, les conditions climatiques locales, b) installer un plus grand nombre de stations climatiques offrant une meilleure précision pour observer les variations régionales et qui

seront utilisées pour construire une base de données beaucoup plus fiable pour permettre la prise de décision et c) améliorer les outils et les services nécessaires à la synthèse et à l'analyse des données climatiques.

4.2 Climate Change Planning at Glencore in Sudbury, Ontario (Council, 2013)

Cette étude a été préparée par le *Fraser Basin Council* (FBC) en partenariat avec la *Mining Innovation, Rehabilitation and Applied Research Corporation* (MIRARCO) de Sudbury et son organisme source l'*Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources* (OCCIAR). Les fonds nécessaires à la recherche proviennent du programme d'Amélioration de la compétitivité dans un contexte de changements climatiques de Ressources naturelles Canada.

Cette étude met en évidence les actions et modes de planifications visant à faire face aux événements actuels et futurs associés aux changements climatiques susceptibles d'affecter les opérations minières de la compagnie Glencore à Sudbury. Elle présente un exemple des efforts réalisés par une entreprise minière pour faire le point sur les risques climatiques susceptibles d'affecter les différents aspects de ses activités minières et de ses processus en cours pour gérer les risques. La compagnie Glencore a identifié plusieurs situations qui ont présenté des risques associés aux conditions climatiques et qui ont ou pourraient affecter ses opérations. L'un des impacts les plus importants identifiés par la compagnie est associé aux risques d'inondations. Depuis quelques années, les conditions climatiques sont devenues de moins en moins prévisibles. Face à ces changements, les opérations minières de Sudbury ont ajusté leurs procédures opérationnelles pour s'accommoder à ce qui semble être un nouveau régime climatique.

Plusieurs actions et mesures d'adaptation sont en cours de mise en place ou sont en mode de planification pour répondre aux impacts causés par les changements climatiques. Des mesures pour faire face aux variations des conditions de température, engendrant des impacts significatifs sur les opérations minières, sont maintenant intégrées dans les règles de procédures opérationnelles chez Glencore. Les règles de gestion des niveaux de l'eau des parcs à résidus, antérieurement établies selon des conditions climatiques de saisons dites normales, ont été modifiées et déplacées de 30 à 60 jours (plus tôt) selon les conditions climatiques en vigueur ou prévus (p. ex. : dégel hâtif) pour l'année considérée. De plus, comme les conditions climatiques sont devenues beaucoup moins prévisibles qu'auparavant, Glencore a commencé à modifier les dates d'évacuation de l'eau de ses bassins, afin de les synchroniser avec les conditions climatiques anticipées lors de l'année. Auparavant, les dates d'évacuation d'eau étaient déterminées à des périodes fixes. Un outil utilisé par Glencore pour optimiser les pratiques de gestion des eaux minières est le modèle GoldSim de Golder. Cette dernière a développé un générateur de climat qui correspond à un modèle stochastique produisant une série de données permettant de modéliser le climat futur en se basant sur des données climatiques antérieures.

Depuis les cinq dernières années, Glencore a également constaté une augmentation du nombre de journées pendant lesquelles la fonderie doit suspendre temporairement ses opérations en réponse à une concentration trop élevée de dioxyde de soufre présent dans l'air au voisinage de l'usine. Dans les années antérieures, ces arrêts de production survenaient en avril et en mai. Depuis les dernières années, on constate des arrêts de production dès le mois de janvier. Malgré ces changements, Glencore a quand même réussi à augmenter ses niveaux de production en modifiant ses pratiques opérationnelles.

4.3 *Case Studies Of Adaptation To Climate Change In The Yukon Mining Sector: From Planning And Operation To Remediation And Restoration (Duerden et al., 2014)*

Les fonds nécessaires à la recherche proviennent du programme d'amélioration de la compétitivité dans un contexte de changements climatiques de Ressources naturelles Canada et du Groupe de travail sur la Plate-forme d'adaptation du secteur minier.

Ce rapport examine plusieurs études de cas portant sur les différentes mesures d'adaptation ainsi que sur la vulnérabilité des entreprises aux changements climatiques, et ce, pour les différents stades de développement d'un projet minier au Yukon. Depuis plusieurs années, de nombreuses observations suggèrent un important changement des conditions climatiques lors des périodes de transition saisonnières. Ces changements sont particulièrement caractérisés par une augmentation de la fréquence des épisodes de dégel hâtif au printemps, alors que les épisodes de gel automnal sont plus tardifs. Plusieurs secteurs du Yukon subissent, avec les années, un réchauffement progressif du pergélisol susceptible de provoquer une dégradation progressive des sols au fur et à mesure que les températures continueront à augmenter. Cette dégradation du pergélisol pourrait mener à d'importants mouvements de terrain et provoquer la rupture et le bris de certaines infrastructures, dont les digues et les routes, suite à la liquéfaction des sols sous-jacents. Dans ces derniers cas, ces bris et ces ruptures occasionneraient d'importantes perturbations et interruptions des opérations minières, du transport du matériel, des employés et du minerai en plus de générer des frais supplémentaires en coûts de restauration des opérations et du réseau routier.

Depuis les vingt dernières années, des mesures visant à établir une réglementation beaucoup plus stricte ont été mises en place au Yukon, dont l'Entente sur les revendications territoriales du Yukon, l'Accord sur l'utilisation territoriale et l'introduction du Comité d'évaluation environnementale et socio-économique du Yukon. Ce dernier comité est très bien positionné pour assurer que les nouveaux projets miniers incluent des mesures visant à prendre en considération les futurs changements climatiques dans leur planification de développement.

Le projet aurifère Victoria Gold's Eagle possède des ressources estimées 2,3 millions d'onces d'or. L'extraction du minerai se fera sous forme d'une exploitation de type fosse à ciel ouvert sur une durée approximative de neuf ans. Il s'agira du premier projet au Yukon à anticiper et inclure dans son plan de développement des mesures pour faire face à d'éventuels changements climatiques pour l'ensemble de son cycle d'opération minière. Ces mesures cibleront plusieurs problématiques liées aux changements climatiques et observées depuis les trente dernières années dans la région dont le dégel hâtif de la glace, une augmentation de la superficie, où la présence du pergélisol est sous forme discontinue (alternance de présence et d'absence du pergélisol), et une augmentation du nombre d'inondations et de débordements des rivières associés aux fortes précipitations. Parmi les mesures d'adaptation considérées par l'entreprise, citons a) un suivi détaillé du pergélisol, b) des modifications des plans de conception du site pour permettre une meilleure stabilité des infrastructures de la mine, c) l'aménagement du site pour prendre en considération les variations de température associées à la topographie du site minier (présence d'un microclimat), d) la modification de la conception des bâtiments pour tenir compte des importantes quantités de précipitation de neige et e) le remplacement ou l'amélioration technique des ponceaux et des routes d'accès pour faire face à des événements climatiques de plus forte intensité.

Pour les planificateurs du développement minier et les gérants de projet, estimer les réponses appropriées et associées aux changements climatiques est une tâche de plus en plus complexe, particulièrement pour les opérations à courte durée de vie. Il devient de plus en plus difficile d'estimer combien de changements structurels doivent être planifiés au cours de la vie d'une opération minière. Chaque changement ou modification nécessite des prises de décisions d'investissements financiers concernant l'évaluation des conséquences d'événements pour lesquels les gestionnaires n'ont que très peu d'expérience (particulièrement en ingénierie). Les mines qui sont déjà en exploitation doivent maintenant composer avec des événements qui n'existaient pas au moment de leurs phases initiales de développement.

La mine Minto de Ressources Capstone a débuté la phase de planification de son développement en 1990 et son ouverture s'est faite en 2007. La fermeture de la mine est prévue pour 2020. Les principaux problèmes liés aux changements climatiques et qui ont affecté les opérations minières sont les inondations et la dégradation du pergélisol. En 2008, un épisode de forte pluie a provoqué le débordement de 350 000 m³ d'eau non traitée dans la rivière Yukon en provenance de l'usine de traitement d'eau de la mine. En 2009, un dégel hâtif d'une intensité inhabituelle a causé la fonte du pergélisol et provoqué l'affaissement partiel d'une paroi du bassin de stockage d'eau, libérant plus de 750 000 m³ d'eau dans le bassin hydrologique de la rivière Yukon.

Les nombreuses périodes de gel-dégel de la rivière Yukon avaient comme conséquences d'interrompre le transport du minerai de la mine vers les usines de traitement. Pour faire face à ces problèmes, Ressources Capstone a dû a) déménager certaines infrastructures de transport afin de minimiser leur exposition aux risques climatiques, b) effectuer une surveillance accrue des conditions de terrain (en surface et sous la surface) sur l'ensemble du site et c) améliorer la conception de certaines infrastructures. Afin de pallier aux débordements excessifs de l'usine de traitement d'eau, du lessivage des routes donnant accès au site minier et du potentiel de débordement des digues, les stratégies d'adaptation suivantes ont été entreprises par la compagnie : a) relâcher la charge excédentaire d'eau dans le système hydrologique de la rivière Yukon, et ce, dans une quantité qui est située au-delà de ce qui est stipulé par le permis environnemental; b) creuser des fossés de drainage supplémentaires sur le site minier pour permettre une meilleure gestion de l'eau; c) revoir les données de projections climatiques pour le secteur de la mine; d) envisager de construire une nouvelle usine de traitement de l'eau; e) avoir de l'équipement lourd disponible sur le site, afin d'effectuer la réparation des routes. Les stratégies d'adaptation suivantes ont également été entreprises par Ressources Capstone, afin de répondre à la dégradation du pergélisol qui risque de causer des affaissements des parois des digues : a) drainer les bassins de rétention d'eau; b) intégrer des butées pour stabiliser les digues; c) revoir les diverses solutions d'ingénierie considérées et appliquées jusqu'à maintenant; d) utiliser les projections de changements climatiques pour identifier les tendances et les réponses futures du comportement du pergélisol.

Il existe depuis peu au Yukon un changement de culture qui consiste à incorporer les prévisions sur les changements climatiques dans la planification de la restauration des sites miniers. Le comité d'évaluation environnementale et socio-économique et l'Office des eaux du Yukon exigent que des estimations sur les tendances des changements climatiques soient maintenant intégrées aux propositions de plans de restauration qui seront acceptées par les organismes gouvernementaux. Cependant, comme il est reconnu que les conditions environnementales sont en train de changer, il est encore très problématique de traiter et de planifier les possibles conséquences de ces changements.

4.4 *Adaptation To Climate Change And Potash Mining In Saskatchewan: Case study from the Qu'Appelle River Watershed (Pittman et al., 2013)*

L'eau constitue une ressource essentielle pour l'extraction et la production de potasse, rendant cette industrie fortement dépendante de la disponibilité de cette ressource. Les compagnies minières productrices de potasse et localisées dans le bassin versant de la rivière Qu'Appelle en Saskatchewan considèrent que les risques climatiques suivants peuvent considérablement affectés et mettre à risque le rendement de leurs opérations : a) les effets cumulatifs, année après année, d'un taux d'humidité excessif et les nombreuses inondations associées aux fortes pluies; b) les périodes de pénurie d'eau

causées par la sécheresse; c) des événements climatiques et des températures considérées comme extrêmes.

Pour faire face à ces risques considérés comme étant associés aux changements climatiques, les entreprises ont mis en place différentes stratégies et mesures d'adaptation. La première stratégie consiste à investir principalement dans les infrastructures pour réduire les problèmes associés aux périodes de forte humidité et d'inondations. La problématique associée à la pénurie d'eau en périodes de sécheresse a comme principales conséquences de diminuer la quantité d'eau disponible pour les opérations et les infrastructures ainsi que de diminuer la qualité de l'eau pour les diverses utilisations, dont l'eau potable. Plusieurs stratégies ont été adoptées pour faire face à ce problème. Parmi celles-ci, mentionnons l'optimisation de l'utilisation de l'eau en permettant la réutilisation et le recyclage de cette dernière sur un site minier. Récemment, la corporation Western Potash a négocié une entente avec la ville de Regina pour acheter les eaux usées de cette ville afin de les réutiliser pour certaines de leurs opérations. Certaines mines ont également exploré diverses alternatives visant à s'alimenter à partir de plusieurs sources d'eau. Certaines opérations minières qui utilisent généralement différentes sources d'eaux situées en surface pour alimenter leurs opérations effectuent, lors d'importantes périodes de sécheresse, un transfert des sources d'alimentation, utilisant plutôt les eaux souterraines ou celles récupérées dans les galeries d'exploitation.

Il existe actuellement un certain nombre d'indicateurs utilisés par les compagnies minières pour permettre à ces dernières de suivre les progrès et les succès des mesures d'adaptation. Les trois principaux indicateurs utilisés pour suivre les progrès des entreprises ayant pour objectif de réduire leur dépendance face à la rareté de l'eau sont les suivants :

- *Indicateur no 1* : l'apport total d'eau par source utilisée qui permet aux entreprises de suivre le pourcentage d'eau utilisé pour leurs opérations, et ce, pour chacune des sources d'approvisionnement utilisées;
- *Indicateur no 2* : cet indicateur concerne les sources d'eau qui sont significativement affectées par un manque d'eau. Il permet aux entreprises d'évaluer si les manques ou pénuries d'eau ont des effets significatifs sur l'abondance ou la durabilité potentielle de la source.
- *Indicateur no 3* : le troisième indicateur concerne le pourcentage et le volume total d'eau utilisé et recyclé par l'entreprise pour son opération minière. Il s'agit probablement de l'indicateur le plus utile en termes de suivi des mesures d'adaptation, car il permet aux entreprises de suivre leurs progrès vers une utilisation et un recyclage optimaux des eaux destinés aux opérations.

Pour faire face à des conditions d'événements climatiques ou de températures extrêmes qui peuvent causer d'importants dommages aux infrastructures, à l'équipement ainsi qu'à la santé et à la sécurité des travailleurs, les entreprises semblent opter pour une planification proactive. Aucune précision n'est cependant donnée sur les stratégies utilisées pour ce type de planification. En ce qui concerne les infrastructures, les entreprises semblent suggérer de revoir le code du bâtiment et de la construction afin que les futures normes de constructions prennent en considération des conditions climatiques sévères et extrêmes anticipées dans le futur.

Les entreprises ont également présenté un certain nombre de points pour lesquels le gouvernement pourrait aider l'industrie à s'adapter aux changements climatiques. L'industrie souhaite en particulier que le gouvernement favorise la recherche dans les domaines suivants : a) améliorer la surveillance du climat et de la météo pour combler les lacunes actuelles de données; b) améliorer les modèles climatiques pour la région où est extraite la potasse; c) prendre conscience que les informations et modèles climatiques peuvent être utilisés pour développer des scénarios plausibles concernant les conditions climatiques futures. Ces scénarios devront aussi prendre en considération la croissance économique, la demande et les besoins en eau et d'autres facteurs clés pour le développement de l'industrie minière.

Le gouvernement doit également favoriser les rapprochements entre les scientifiques et les gens de l'industrie. Il doit contribuer au développement d'aide à la décision pour aider l'industrie dans ses prises de décisions concernant les changements climatiques. Ces aides doivent servir à fournir les meilleures connaissances de la science du climat, de manière à satisfaire les besoins de l'industrie, particulièrement lors des processus de prise de décision. Le gouvernement doit également jouer un rôle d'aide à l'industrie en sélectionnant et en présentant de façon simplifiée les principaux risques climatiques susceptibles d'affecter l'industrie. Il doit également favoriser de solides relations de travail entre les gens de l'industrie et les scientifiques du climat et de l'environnement, afin d'identifier les risques pertinents associés aux changements climatiques et qu'ils soient incorporés dans les plans de gestions des entreprises minières.

5. Conclusion

La revue de la littérature démontre que le secteur minier est vulnérable aux changements climatiques, notamment en ce qui concerne la restauration et la gestion des résidus. Il semble nécessaire d'assurer que les modes de gestion encadrant les activités minières soient adaptés en fonction de la réalité des changements climatiques.

Dans un contexte où le Québec a l'ambition de développer de façon responsable le Nord et que ce développement repose en bonne partie sur la mise en valeur des ressources

minérales, l'adaptation du secteur minier québécois aux changements climatiques est nécessaire. En effet, le Nord est particulièrement sensible et affecté par les changements climatiques et il s'agit là d'un enjeu important de son développement. De plus, les besoins en matière de recherche sont importants, particulièrement en ce qui concerne la restauration et la gestion des résidus.

Les constats illustrés dans cette synthèse soulignent l'importance pour le Québec d'amorcer une démarche menant à une stratégie d'adaptation du secteur minier aux changements climatiques. Pour y arriver, la collaboration entre les compagnies minières, les gouvernements et les institutions de recherche et développement semble un élément incontournable.

6. Références

2000. Mining companies take on global warming, *The Northern Miner*.
2001. Uncertain Future, Deliberate Action. Proceedings of the Circumpolar Climate Change Summit., Circumpolar Climate Change Summit, Whitehorse.
- ACIA, 2005. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press.
- Allard, M., Sarrasin, D., Marchildon, C., 2008. Evidences of impacts of climate warming on permafrost in Nunavik, Symposium sur l'environnement et les mines Rouyn-Noranda, p. 16.
- Anawar, H.M., 2013. Impact of climate change on acid mine drainage generation and contaminant transport in water ecosystems of semi-arid and arid mining areas. *Physics and Chemistry of the Earth* 58-60, 13-21.
- Arent, D.J., Tol, R.S.J., Faust, E., Hella, J.P., Kumar, S., Strzepek, K.M., Tóth, F.L., Yan, D., 2014. Key economic sectors and services, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. XXX-YYY.
- Assoc., J., 2012a. Engineering Challenges for Coastal Infrastructures/Docks with regard to Climate Change in Nunavut. Government of Nunavut, p. 64.
- Assoc., J., 2012b. Engineering Challenges for Tailings Management Facilities and Associated Infrastructures with regard to Climate Change in Nunavut. Government of Nunavut, p. 110.
- Auld, H., MacIver, D., 2007. Changing weather patterns, uncertainty and infrastructure risk: emerging adaptation requirements, in: Division, A.a.i.r. (Ed.), p. 24.
- Auld, H., MacIver, D., Klaassen, J., 2007. Adaptation options for infrastructure under changing climate conditions, in: Division, A.a.I.R. (Ed.), p. 24.
- Barrages, C.i.d.G., 2001. Tailings dams risk of dangerous occurrences: Lessons learnt from practical experiences, in: Barrages, C.i.d.G. (Ed.), Paris, p. 144.
- Barrow, E., 2004. Climate Variability and Change in Canada: Past, Present and Future, in: Canada, M.S.o. (Ed.). Maxwell, B. Gachon, P., Toronto.
- Bell, T., Jacobs, J.D., Munier, A., Lablanc, P., Trant, A., 2008. Climate Change and Renewable Resources in Labrador: Looking toward 2050, in: Group, L.H.R. (Ed.),

- Climate Change and Renewable Resources in Labrador: Looking toward 2050. University of Newfoundland, North West River, p. 96.
- Bjelkevick, A., 2005. Water Cover Closure Design for Tailings Dams State of the Art Report. Lulea University of Technology.
- Bourque, A., Simonet, G., 2008. Quebec: from Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007. Government of Canada, Ottawa, pp. 171-226.
- Canada, 2009a. True North: Adapting Infrastructure to Climate Change in Northern Canada, in: Economy, N.R.T.o.t.E.a.t. (Ed.), Ottawa, p. 160.
- Canada, L.a.A., 2009b. Environmental code of practice for metal mines Minister of the Environment p. 108.
- CEMI, 2012. Weather Variability and Climate Change: Challenges and solutions for the Mining Sector Mining and Climate Change workshop.
- Champalle, C., Tudge, P., Sparling, E., Riedlsperger, R., Ford, J., Bell, T., 2013. Adapting the Built Environment in a Changing Northern Climate: A review of climate hazard-related mapping and vulnerability assessments of the built environment in Canada's North to inform climate change adaptation, in: Canada, N.R. (Ed.), Ottawa.
- Chiotti, Q., Lavender, B., 2008. Ontario: From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007. Government of Canada, Ottawa, pp. 227-274.
- Council, F.B., 2013. Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector: Climate Change Planning at Glencore in Sudbury, Ontario. Fraser Basil Council, MIRARCO, OCCAR, p. 8.
- Council, F.B., 2013. A Climate Adaptation Case Study in Canada's Mining Sector Enhancing Weather Resiliency at Nyrstar Myra Falls. Fraser Basil Council, MIRARCO, OCCAR, p. 8.
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M.P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E.A., Sáez, A.E., 2012. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment* 433, 58-73.
- Damigos, D., 2012. Monetizing the impacts of climate change on the Greek mining sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17, 865-878.
- DesJarlais, C., Allard, M., Belanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A.T., Roy, R., Savard, J.-P., Turcotte, R., Villeneuve, C., 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Bibliothèque nationale du Québec, Montreal, p. 128.
- Duerden, F., Pearce, T., Ford, J., Pittman, J., Kinnear, L., Perrin, A., 2014. Case studies of adaptation to climate change in the Yukon mining sector: From planning and operation to remediation and restoration. Natural Resources Canada, Ottawa, p. 22.

- Ebinger, J., Vergara, W., 2011. Climate Impacts on Energy Systems: Key Issues for Energy Sector Adaptation. The World Bank, p. 224.
- Economy, N.R.T.o.t.E.a.t., 2012. Canada. National Round Table on the Environment and the Economy. (2012). Facing the Elements: Building Business Resilience in a Changing Climate (Case Studies), Ottawa, p. 99.
- Ford, J.D., Champalle, C., Tudge, P., Riedlsperger, R., Bell, T., Sparling, E., 2014. Evaluating climate change vulnerability assessments: a case study of research focusing on the built environment in northern Canada. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.
- Ford, J.D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Ford, L.B., Beaumier, M., Smith, T., 2010. Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: A survey of the Canadian mining sector. Regional Environmental Change 10, 65-81.
- Ford, J.D., Pearce, T., Prno, J., Duerden, F., Ford, L.B., Smith, T.R., Beaumier, M., 2011. Canary in a coal mine: Perceptions of climate change risks and response options among Canadian mine operations. Climatic Change 109, 399-415.
- Furgal, C., Prowse, T.D., 2008. Northern Canada; in From Impacts to Adaptations: Canada in a Changing Climate, in: Canada, N.R. (Ed.). Government of Canada, Ottawa, pp. 57-118.
- ICMM, 2009. Policy on climate change. International Council on Mining & Metals, p. 4.
- ICMM, 2013. Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry. International Council on Mining & Metals, p. 64.
- IFC, 2012. IFC Sustainability Framework: Policy and Performance Standards on Environmental and Social Sustainability Access to Information Policy. International Finance Corporation, p. 84.
- IMG-Golder, 2012a. Good Environmental Practices for Northern Mining and Necessary Infrastructure. Gouvernement of Nunavut, Cambridge Bay, p. 110.
- IMG-Golder, 2012b. Vulnerability Assessment of the Mining Sector to Climate Change, p. 98.
- Instanes, A., Anisimov, O.A., Brigham, L., Goering, D., Khrustalev, L., Ladanyi, B., Larsen, J.O., 2005. Arctic Climate Impact Assessment, Infrastructure: Buildings, Support Systems, and Industrial Facilities. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 907-944.
- IPCC, 2014a. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press ed, New York, p. 1132.

- Ipcc, 2014b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014c. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press ed. IPCC, New York.
- Ipcc, 2014d. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kosich, D., 2009. Cross-Canada Mining Survey: Miners Say Global Climate Change Definitely Hurts Mining., Mining
- Kumar, S., Yalew, A.W., 2012. Economic Impacts of Climate Change on Secondary Activities: A Literature Review Low Carbon Economy, 39-48.
- Kyhn, C., Elberling, B., 2001. Frozen cover actions limiting AMD from mine waste deposited on land in Arctic Canada. Cold Regions Science and Technology 32, 133-142.
- Lavalin, S., 2013. Policy Issues and Barriers to Climate Change Adaptation for the BC Mining Sector, in: Environment, B.C.M.o. (Ed.), Burnaby, p. 48.
- Lemly, A.D., 1994. Mining in northern Canada: Expanding the industry while protecting Arctic fishes - A review. Ecotoxicology and Environmental Safety 29, 229-242.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., Bush, E., 2008. From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007, in: Canada, N.R. (Ed.). Government of Canada, Ottawa, p. 448.
- Lin, C., 2012. Climate change adaptation in acid sulfate landscapes. American Journal of Environmental Sciences 8, 433-442.
- LLP, B.J., 2011. Managing Climate-related Business Risks in the Mining Industry.
- Morrison, D., Fahey, J., 2010. Coping with climate change. Mining Magazine 201, 43-45.

- Neale, T., Auld, H., Bizikova, L., Klaassen, J., MacIver, D., Mining in a Changing Climate. Impacts and Adaptation Needs in the Mining Sector.
- Nelson, J., Schuchard, R., 2011. Adapting to Climate Change: A Guide to the Mining Industry. BSR.
- Nordstrom, D.K., 2009. Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration* 100, 97-104.
- Pearce, T., Ford, J., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., Berrang-Ford, L., Smit, B., 2011. Climate change and mining in Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16, 347-368.
- Pearce, T.D., Ford, J.D., Prno, J., Duerden, F., Berrang-Ford, L., Smith, T., Marshall, M., 2009. Climate change and Canadian mining. *Opportunities for Adaptation*. David Suzuki Foundation, p. 150.
- PIEVC, 2008. Adapting to Climate Change: Canada's First National Engineering Vulnerability Assessment of Public Infrastructure. Canadian Council of Professional Engineers, Ottawa, p. 76.
- Pittman, J., Pearce, T., Ford, J., 2013. Adaptation to climate change and potash mining in Saskatchewan: Case study from the Qu'Appelle River Watershed. *Natural Resources Canada*, Ottawa, p. 19.
- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., De Elia, R., 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate* 19, 3112-3132.
- Prowse, T.D., Furgal, C., Chouinard, R., Melling, H., Milburn, D., Smith, S.L., 2009. Implications of climate change for economic development in Northern Canada: Energy, resource, and transportation sectors. *Ambio* 38, 272-281.
- Robyn, V.M., Hassan, M., Hayley, D., 2008. Climate Change Impacts and Adaptation: Case Studies of Roads in Northern Canada, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto, p. 15.
- Rodgers, C., Sparling, E., Wiles, A., Douglas, A., 2014. Understanding Mining Policy Drivers and Barriers in the Context of Climate Change Impacts and Adaptation, report submitted to Climate Change Impacts and Adaptation Division, in: Canada, N.R. (Ed.), Sudbury, p. 38.
- Romano, C.G., Mayer, K.U., Jones, D.R., Ellerbroek, D.A., Blowes, D.W., 2003. Effectiveness of various cover scenarios on the rate of sulfide oxidation of mine tailings. *Journal of Hydrology* 271, 171-187.
- Stenek, V., Amado, J.C., Cornell, R., 2010. Climate Risk and Financial Institutions: Challenges and Opportunities. IFC.

- Stratos, Consulting, B., 2001. Climate Change and Acid Rock Drainage - Risks for the Canadian Mining Sector. The Mining Association of Canada, Ottawa.
- Warren, F.J., Lemmen, D.S., 2014. Canada in a Changing Climate: Sector Perspectives on Impacts and Adaptation, in: Canada, N.R. (Ed.). Government of Canada, Ottawa, p. 286.
- Young, E., 2014. Business risks facing mining and metals 2014–2015. EY's Global Mining & Metals Center

Annexe 2

Rapport d'activités de l'atelier du 5 novembre 2014

Financé par



**Projet PU-2014-06-913
Annexe 2
Rapport d'activité de l'atelier du 5 novembre 2014**

***Analyse de risques et de
vulnérabilité liés aux
changements climatiques
pour le secteur minier
québécois***

Pour :

**Madame Renée Garon
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
Direction générale du développement
de l'industrie minière
5700, 4^e Avenue Ouest
Québec (Québec) G1H 6R1**



445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971, poste 2558 Télécopieur : 819 797-6672

OCTOBRE 2015

Table des matières

	Page
1. Mandat	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Ouranos.....	1
2. Méthode	1
3. Résumé des échanges.....	2
3.1 Questions posées à la suite de la présentation d’Ouranos sur les changements climatiques	4
4. Atelier du groupe «Exploration»	5
4.1 Éléments qui ont marqué les participants lors de la présentation d’Ouranos.....	5
4.2 Niveau de risque pour les activités d’exploration	6
4.3 Impact des changements climatiques sur les technologies et les méthodes	6
4.4 Éléments qui manquent pour évaluer les conséquences des changements climatiques	7
4.5 Adaptation – Que faut-il faire pour favoriser l’adaptation aux changements climatiques?	7
4.6 Opportunités en lien avec les changements climatiques	8
4.7 Échéancier.....	8
4.8 Besoins de recherche pour Ouranos	8
4.9 Résumé des recommandations	8
5. Atelier du groupe « Exploitation ».....	9
5.1 Quelle est la première chose dont vous vous rappelez par rapport à ce matin?	9
5.2 Quels aspects de nos opérations sont les plus vulnérables?.....	9
5.3 Quel va être l’impact des changements climatiques sur l’acceptabilité sociale des projets? Comment convaincre les communautés que les ouvrages vont tenir maintenant et pour des centaines d’années, avec en plus l’incertitude liée aux changements climatiques?	10
5.4 Est-ce que vos activités subissent déjà des impacts des changements climatiques? Intégrez-vous déjà les changements climatiques dans le développement des projets?	11
5.5 Quels changements devrait-on intégrer pour réduire le risque?.....	12
5.6 Qu’est-ce qui vous manque comme opérateurs ? Où mettre les efforts en R&D ?.....	13
6. Atelier groupe «Restauration»	13
6.1 Qu’est-ce qui vous a marqué par rapport aux présentations de l’avant-midi ?	13
6.2 Quels aspects de nos opérations sont les plus vulnérables ?.....	13

6.3	Est-ce que vos activités subissent déjà des impacts des changements climatiques ? Intégrez-vous déjà les changements climatiques dans le développement des projets ?	15
6.4	Quels changements devrait-on faire pour intégrer les CC et pour réduire le risque ? Qu'est-ce qui vous manque comme opérateurs ? Où mettre les efforts en R&D ?.....	16
7.	Plénière	17
8.	Conclusion de la journée	19
9.	Recommandations pour la suite du mandat	20
10.	Recommandations à long terme.....	20
Annexe 1 : Déroulement de la journée		
Annexe 2 : Liste des participants		

Liste des tableaux

Tableau 1 : Vulnérabilités soulevées dans la première ronde.....	11
Tableau 2 : Vulnérabilités soulevées dans la deuxième ronde.....	15

1. Mandat

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) souhaite qu'une analyse des risques et de la vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier soit réalisée. Cette action est inscrite dans l'une des orientations de la *Stratégie d'adaptation aux changements climatiques du Québec*, soit «*préserver la prospérité économique*». Le MERN désire agir de manière proactive pour réduire les vulnérabilités face aux changements climatiques dont les impacts comporteront des coûts importants et qu'il importe de minimiser.

L'Institut de recherche en mines et en environnement de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (IRME-UQAT) et l'Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) ont été sollicités pour réaliser une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois, dont la réalisation d'un atelier d'orientation sur cette thématique.

1.1 Objectifs

Cette activité avait pour objectif de réunir des experts des changements climatiques et du secteur minier (industriels, universitaires, gouvernementaux) afin d'amorcer une consultation et une réflexion sur la vulnérabilité du secteur minier aux changements climatiques. La liste des participants se retrouve à l'annexe 2.

Cet atelier a favorisé les échanges entre spécialistes du secteur minier pour en arriver à identifier, notamment, des sources de vulnérabilités, des risques, des opportunités, des besoins en matière de recherche ainsi que des pistes de solution envisageables en lien avec les changements climatiques.

1.2 Ouranos

Préalablement à l'atelier, en première partie de la journée, le groupe Ouranos a été mandaté pour présenter les scénarios de changements climatiques pour le Québec, afin de bien mettre en contexte les participants.

2. Méthode

Le premier bloc de cet atelier thématique était composé d'une présentation sur les changements climatiques, qui a permis de bien mettre en contexte les participants. Le second bloc a été occupé par trois ateliers thématiques sur l'exploration, l'exploitation et les opérations ainsi que la gestion des résidus et la restauration. Ces ateliers étaient divisés en deux rondes de discussions.

La première ronde avait pour objectif de faire ressortir les principales vulnérabilités face aux changements climatiques, et ce, pour les différents secteurs d'activités et les différentes régions minières. Voici quelques exemples des questions adressées aux participants qui ont permis d'animer les discussions :

- Par rapport à la présentation d'Ouranos, qu'est-ce qui vous interpelle?

- Si l'on définit le risque comme étant *Risque = Probabilité x Gravité des impacts*, quel est le niveau de risque pour vos activités dans le contexte des changements climatiques?
- Vous manque-t-il des éléments pour bien évaluer les conséquences potentielles des changements climatiques sur vos activités? Quels sont-ils?
- Selon vous, quelle est la robustesse ou la fragilité face aux changements climatiques des technologies ou méthodes utilisées dans votre secteur?
- Quelles sont les composantes les plus vulnérables aux changements climatiques?

La seconde ronde avait pour objectif d'évaluer la manière dont les différents secteurs peuvent s'adapter aux réalités des changements climatiques. À la fin de celle-ci, les groupes devaient identifier ce qui pourrait favoriser l'adaptation aux changements climatiques (pistes de solution) et ce qui pourrait empêcher ou nuire à cette adaptation (les obstacles). De plus, les participants étaient interrogés sur ce qui leur manque pour intégrer les changements climatiques dans leur planification (les besoins, par exemple en recherche et développement). Voici quelques questions qui ont permis d'animer les discussions de la seconde ronde des ateliers :

- Est-ce que vos activités sont déjà affectées par les changements climatiques? Si c'est le cas, de quelle façon? Et comment vous adaptez-vous à cette situation?
- À la lumière des scénarios climatiques, quelle est, selon vous, la capacité d'adaptation de votre secteur d'activité?
- À l'égard de vos travaux actuels ou récents, avez-vous tenu compte des changements climatiques lors de leur planification? Si oui, comment? Sinon, pourquoi?
- Comment envisagez-vous l'adaptation de votre secteur d'activité, notamment dans la perspective de la durée de vie des mines?
- À votre connaissance, existe-t-il des technologies ou des méthodes alternatives qui pourraient être des pistes de solutions dans le contexte des changements climatiques?

3. Résumé de la présentation d'Ouranos : Synthèse des changements climatiques et de leurs impacts sur le secteur minier¹

Les changements climatiques anticipés provoqueront de nombreux impacts sur l'ensemble des composantes du secteur minier (exploration, exploitation et réhabilitation). L'adaptation aux changements climatiques permettra de diminuer la vulnérabilité et de réduire l'ampleur des impacts attendus.

Changements climatiques projetés

Les résultats présentés aux représentants du secteur minier reflètent le scénario « RCP 8.5 » (les RCP [*Representative Concentration Pathway*] décrivent les scénarios d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre durant le 21^e siècle), à l'horizon 2080 (c.-à-d. le climat sur la période 2071-2100). Parmi la famille des scénarios « RCP », le scénario 8.5 est le plus pessimiste, mais c'est aussi celui qui colle le plus aux concentrations de gaz à effet de serre observées durant la dernière décennie.

¹ Résumé préparé par Valérie Bourduas-Crouhen, Caroline Larrivée et Philippe Roy.

Pour la température moyenne, des augmentations sont projetées sur l'ensemble du Québec pour toutes les saisons, avec un gradient nord-sud important. En effet, l'augmentation de la température moyenne serait de l'ordre de 4 à 7 °C dans le sud et de 5 à 10 °C dans le nord du Québec. Pour les températures extrêmes, on projette des augmentations pour les maximums annuels (+ 4 à 7 °C) et minimums annuels (+ 11 °C). Le nombre de jours où la température est inférieure à 0 °C devrait diminuer d'environ 50 à 60 jours. Soulignons que les résultats sont considérés robustes pour la température.

Dans le cas des précipitations, des augmentations sont projetées sur l'ensemble du territoire québécois. D'un intérêt particulier pour le secteur minier, une augmentation des précipitations extrêmes est aussi projetée. Par exemple, le nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm devrait augmenter de 6 à 10 par année, comparativement à la période de référence 1981-2010. De plus, les événements de précipitation extrêmes qui revenaient typiquement à tous les 20 ans (environ 80 mm dans le sud du Québec) durant la période de référence devraient survenir à tous les 12,5 à 17,5 ans à l'horizon 2080. Notons que pour les précipitations, l'incertitude est plus élevée que pour la température.

La période de fonte de la neige devrait survenir environ 1 mois plus tôt. On projette une diminution de l'accumulation totale durant l'hiver, en particulier sur le sud du Québec et le long du littoral de la Baie d'Hudson. Tout comme pour la précipitation liquide, les résultats pour la neige sont moins robustes que pour la température.

Le bilan hydrique est composé du ruissellement, de l'évaporation et de la précipitation. Durant l'hiver, on projette une augmentation du ruissellement sur l'ensemble des bassins versants. Durant les autres saisons, on projette une diminution du ruissellement sur le sud du Québec et une augmentation sur le nord de la province, la diminution du ruissellement dans le sud étant causée par une augmentation de l'évaporation supérieure à l'augmentation de la précipitation.

Vulnérabilités, impacts et adaptation

Le secteur minier sera affecté par des impacts directs pouvant compromettre l'intégrité des infrastructures et des opérations ainsi que par des changements indirects comme ceux issus de l'environnement naturel pouvant affecter la santé et la sécurité des travailleurs comme, par exemple, l'augmentation des feux de forêts.

Parmi les impacts directs potentiels, mentionnons d'une part l'augmentation des précipitations pourrait engendrer des surverses des ouvrages de rétention ou encore de l'érosion et des glissements de terrain. D'autre part, la chaleur pourrait augmenter l'instabilité du pergélisol dans le nord du Québec en augmentant le contenu en eau du sol, ce qui provoquera un tassement des routes utilisées pour le transport des ressources, une instabilité dans les fondations des infrastructures en plus d'engendrer des problèmes de drainage.

Certains impacts potentiels en lien avec une diminution de la neige, le changement du couvert de glace et du régime des tempêtes ou l'évaporation grandissante pourraient également s'imposer sur le territoire minier. En plus, certains phénomènes naturels seront plus fréquents et

plus intenses comme l'occurrence des feux de forêts et l'ampleur des invasions d'espèces exotiques envahissantes, ce qui pourrait engendrer des impacts indirects sur les milieux de travail minier.

Cependant, plusieurs leviers d'adaptation existent tels que la sensibilisation des parties prenantes, le recours aux normes et à la réglementation pour encadrer la planification, la conception et la gestion des ouvrages, des outils, en plus de guides pour prendre en compte les changements climatiques. Afin de garantir la longévité de ses installations, les entreprises minières se doivent de passer à une approche intégrant les changements climatiques, impliquant divers intervenants et une modification de leurs façons de faire.

Pour plus de renseignements, voir la synthèse 2014 des connaissances sur les changements climatiques au Québec produite par le consortium Ouranos, à l'adresse suivante : <http://www.ouranos.ca/fr/synthese2014/default.php>

4. Résumé des échanges

4.1 Questions posées à la suite de la présentation d'Ouranos sur les changements climatiques

Q : Est-ce que les simulations d'Ouranos concordent avec celles du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ?

R : Oui, ils utilisent les mêmes simulations climatiques

Q : Est-ce que l'on peut utiliser le climat de régions plus au Sud pour prévoir le climat futur? Par exemple, est-ce que les conditions climatiques de la Baie-James seront comme celles que l'on connaît en Abitibi-Témiscamingue?

R : Ça dépend des variables, mais c'est possible. Ce type de translation est utilisé en agriculture, par exemple.

Q : Est-ce que l'on prévoit plus de variabilité dans le climat sur de courtes périodes? Par exemple, dans une même saison ou d'une année à l'autre, la variabilité étant un facteur important pour les opérations (p. ex. : gel/dégel) ?

R : Ce type d'analyse peut être fait, mais on n'a pas de réponse précise à donner pour l'instant. Ce type d'analyse existe pour les cycles de gel/dégel. On ne prévoit pas une augmentation de la variabilité, mais plutôt un déplacement dans le temps de l'année où ils sont probables.

Q : La valeur moyenne annuelle de précipitations, par exemple, ne sert pas beaucoup dans le secteur minier. Est-ce que c'est possible de voir l'ampleur des changements dans la PMP (*Probable maximum Precipitation*) avec des isocontours et l'incertitude qui leur est associée?

R : Pas d'élément de réponse.

Un commentaire est émis quant à l'importance d'être prudent avec les projections et l'utilisation que l'on en fait, pour l'adaptation de normes par exemple, car cela pourrait générer des coûts importants.

Les représentants d'Ouranos expliquent que c'est la raison pour laquelle il faut penser à des solutions que l'on peut ajuster au fur et à mesure que les impacts des changements climatiques se feront ressentir.

Q : Des prises de données sont-elles faites auprès des communautés locales, par exemple l'état du pergélisol dans les cimetières ?

R : Oui, ce type de données est considéré pour certaines variables comme l'évolution des glaces sur le Saint-Laurent par exemple.

Q : En ingénierie, les échelles de temps doivent être supérieures à une centaine d'années. Est-ce que des efforts sont faits pour réduire l'incertitude à plus long terme des prévisions?

R : Il va toujours y avoir une certaine plage d'incertitude associée aux projections en raison de la nature chaotique du climat. Néanmoins, des efforts constants sont faits pour améliorer les modèles climatiques générant les scénarios.

Q : Est-ce que la libération de GES (gaz à effet de serre) lors de la fonte du pergélisol pourrait influencer les scénarios climatiques?

R : La libération de méthane (un gaz à effet de serre encore beaucoup plus puissant que le CO₂) contenu dans le pergélisol aurait des effets très importants qui amèneraient les scénarios à un tout autre niveau. Néanmoins, il ne s'agit pas d'une problématique à court terme.

Q : À quel point les effets non anthropiques (positionnement par rapport au soleil, effets planétaires naturels, etc.) peuvent influencer les projections?

R : Ces effets sont beaucoup moins rapides que les changements climatiques provoqués par les émissions de GES.

Q : Quels effets la cinétique des changements climatiques a sur la faune et la flore?

R : Ça dépend vraiment des espèces.

5. Atelier du groupe «Exploration»

5.1 Éléments qui ont marqué les participants lors de la présentation d'Ouranos

Certains participants questionnent les modèles utilisés pour générer les scénarios climatiques. Ils expliquent qu'ils considèrent que les modèles montrent une grande variabilité et considèrent peu les conditions locales. Comme il s'agit d'un modèle purement physique-mathématique, certains soulignent un problème de crédibilité ainsi que le fait que l'approche est en quelque sorte dogmatique.

On fait mention de l'ampleur des changements. À titre d'exemple, on retrouve beaucoup d'écart entre les 10^e et 90^e centiles. Pour les précipitations, c'est entre 670 et 1220 mm, alors que pour la température, c'est entre -6 et -20 °C.

Les participants saisissent toutefois bien les différentes échelles temporelles entre météo (jours), climat (dizaine d'années) et processus géo-climatiques (millions d'années).

5.2 Niveau de risque pour les activités d'exploration

Comparativement à l'ensemble des opérations d'exploitation et de restauration, on considère que le domaine de l'exploration est plus flexible face aux changements climatiques, notamment en raison de la relativement courte période sur laquelle s'échelonnent les projets et des besoins moindres en matière d'infrastructures. Les participants prévoient que l'exploration saura s'adapter au fur et à mesure que les changements climatiques se feront sentir et que leurs impacts ne semblent pas majeurs. De façon imagée, on explique que s'adapter aux variations économiques sera toujours une réalité beaucoup plus préoccupante que l'adaptation aux changements climatiques.

Malgré la flexibilité du secteur de l'exploration, il n'en demeure pas moins que les changements climatiques peuvent avoir des effets sur les activités, notamment pour les événements extrêmes et en particulier pour les environnements côtiers. Par exemple, on fait mention des impacts du raccourcissement de la saison hivernale avec sol ou lac gelé qui aura pour effet de réduire la période de travaux dans les milieux humides. On convient que l'augmentation des précipitations prévues peut générer des problèmes de logistique et de gestion des activités.

On souligne que notre approche de réflexion nous fait appliquer des façons de faire actuelles à des situations futures. Cependant, de plus en plus, la composante *présence physique sur le terrain* a tendance à diminuer et le traitement des données ainsi que la gestion des activités et des processus à distance augmentent (drones, mini-foreuses, etc.)

Les changements de réglementation en raison de la crainte inspirée par les changements climatiques (perception) font plus peur aux « explorationnistes » que les conséquences des changements climatiques sur les travaux d'exploration. On cite l'exemple qu'après le déluge du Saguenay, de nouvelles normes ont été mises en place pour les chemins forestiers. La modification de la réglementation vient perturber les opérations.

5.3 Impact des changements climatiques sur les technologies et les méthodes

- Par rapport à l'exploration régionale :
 - Temps morts accrus pour les aéronefs en raison des conditions climatiques variables;
 - Perte des référentiels quant à la comparaison des résultats de levées géophysiques et géochimiques attribuables aux changements climatiques qui modifient la signature de l'environnement avec le temps;
 - Allongement de la saison de cartographie sur le terrain;

- Calendrier d'exploration qui se modifie ainsi que la saison des moustiques : plus d'insectes à prévoir qu'auparavant; des insectes que nous n'avions pas avant, telles les tiques;
- Sécurité sur le territoire (sécheresse/incendie, pluie/inondation, vent/tempête, etc.)
- Par rapport au développement d'un projet :
 - Réduction de l'accès au territoire en raison de la perte de gel solide;
 - Oblige des campagnes de forage intensif en raison de la réduction de la période de gel au sol;
 - Risque accru d'utilisation de la machinerie dans les périodes de sécheresse (feux de forêt);
 - En réduisant les périodes de gel, on augmente les impacts sur l'environnement pour déplacer la machinerie (alourdissement de la logistique pour opérer en été au lieu d'en hiver);
 - Augmentation des périodes de sécheresse et impact sur l'utilisation de l'eau pour les travaux d'exploration (p. ex. : forage);
 - Contrainte de forage sur une courte période en hiver et luminosité (heures de travail des équipes de jour vs celles des équipes de nuit).
- Autres commentaires :
 - Épisodes extrêmes ayant des conséquences sur la sécurité et la productivité des équipes;
 - Changements technologiques de l'industrie évoluant plus vite que les changements climatiques; on a donc du temps pour s'y préparer;
 - Agilité à répondre aux changements : nous sommes capables de les gérer au fur et à mesure;
 - Rôle du pergélisol : plus besoin de sel pour forer, limitation d'accès aux marécages;
 - Cibles d'exploration qui peuvent changer si l'accès au terrain change;
 - Période de navigation sans glace qui s'allonge : plus grande flexibilité logistique.

5.4 Éléments qui manquent pour évaluer les conséquences des changements climatiques

- Déterminer où ça va jouer le plus : dans quelle région? Où seront les changements les plus dramatiques?
- Dans les jours de précipitations, on ne distingue pas la pluie de la neige, c'est-à-dire que les modèles rendent disponibles des quantités de précipitation totales (en mm) qui ne font pas la distinction entre les mm de pluie vs ceux de neige. Cette information pourrait s'avérer utile pour prévoir les impacts attribuables à des changements au régime de précipitations.

5.5 Adaptation – Que faut-il faire pour favoriser l'adaptation aux changements climatiques?

- Les participants sont d'avis qu'il y aurait lieu d'assouplir les règles d'accès aux marais, entre autres en ce qui a trait à l'utilisation de matériel amphibie durant l'été;

- Du point de vue de la sécurité des travailleurs, il faut évaluer les aspects de contrôle des populations animales (p. ex. : les ours polaires qui descendent plus au sud ou les tiques de la lime qui montent plus au nord);
- Répertorier les impacts actuels des changements climatiques en consultant les populations autochtones.

L'intégration des changements climatiques dans la planification des activités minières nécessite l'amélioration de la collaboration entre les différents ministères, entre autres, le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC).

5.6 Opportunités en lien avec les changements climatiques

- Accès à d'autres ressources.
- Le développement de technologies, entre autres pour être plus légers et plus mobiles, générera des opportunités d'exportation ailleurs dans le monde par la suite.
- Pour le MERN : autres zones potentielles du Nord à cartographier, développer des créneaux de communication avec le MDDELCC, protection du territoire (zones vulnérables avec espèces menacées) et cartes de vulnérabilité versus intégration du territoire.
- Pour les compagnies : cartographies des rivières à revoir, en particulier pour Hydro-Québec, si le débit des rivières change.
- Pour les autochtones : changement dans leur vie quotidienne.

5.7 Échéancier

Un élément qui nécessite des actions rapidement par rapport aux impacts des changements climatiques est la planification et l'encadrement des activités d'exploration minière en milieu humide, notamment en ce qui concerne l'adaptation de la réglementation et le développement de technologies plus légères.

On souligne également l'importance d'informer les intervenants sur le plan légal et réglementaire pour adapter la planification des travaux.

5.8 Besoins de recherche pour Ouranos

- Les situations extrêmes : précipitations et températures;
- Des indicateurs avec plus de particularités (composantes locales);
- Des prévisions quant aux journées d'ensoleillement.

5.9 Résumé des recommandations

- Il faut encore mieux cerner les problématiques. Il faut mieux évaluer les risques afin de réduire l'incertitude : il faut mieux connaître l'objet géologique, le paysage où se situe la mine, les changements climatiques attendus à une échelle de détail, en particulier les précipitations.

- Il faut mieux évaluer quels seront les changements apportés à la réglementation relative aux ressources minières, tant au provincial qu'au fédéral. Il s'agit là d'une bride possible à l'investissement;
- Il faut mieux analyser les aspects sociaux provoqués par les changements climatiques;
- Développer un programme d'innovation minière en contexte de changements climatiques, par exemple, un programme visant à supporter le développement ou l'adaptation d'équipements et de méthodes propres aux activités minières dans un contexte de changements climatiques (p. ex. : dans un contexte où la période de gel serait plus courte, développement d'équipements d'exploration permettant l'accès aux milieux humides de façon moins invasive).

6. Atelier du groupe « Exploitation »

À l'annexe 2, on présente les différents participants à la table qui représentent différentes réalités, de la fonderie à la mine à ciel ouvert ou souterraine en passant par différentes localisations géographiques (Côte-Nord, Abitibi, Nord-du-Québec et Nunavut). On mentionne qu'il faudra faire attention de ne pas mettre l'emphasis uniquement sur l'effet des changements climatiques dans le Nord, mais de considérer également les autres régions minières. On souligne aussi que l'exercice réalisé pour le cas particulier du Québec est important puisque les façons de faire pour s'adapter aux changements climatiques ne sont pas toujours transposables d'une partie du globe à l'autre.

6.1 Quelle est la première chose dont vous vous rappelez par rapport à ce matin?

De façon générale, les gens retiennent la grande imprécision des prévisions du changement climatique (grande différence entre les scénarios optimistes et pessimistes). On souligne qu'il sera difficile de faire du design avec des paramètres aussi variables. Une participante mentionne son expérience personnelle dans le Nord-du-Québec où les changements climatiques sont facilement observables depuis une quinzaine d'années. Une technologie de restauration qui semblait la plus adéquate à l'époque est maintenant reconsidérée complètement en raison des changements climatiques. Elle souligne également que, dans les discussions avec les communautés inuites, les deux principales priorités sont l'impact des changements climatiques et les aspects sociétaux. À la fin de cette discussion, tous les membres s'entendent sur le fait qu'on fait face à des changements climatiques et que le défi est d'en définir l'ampleur.

6.2 Quels aspects de nos opérations sont les plus vulnérables?

La gestion de l'eau est un des aspects les plus vulnérables pour les opérations minières. Les résultats du groupe Ouranos montrent clairement une augmentation des précipitations, particulièrement dans la fosse du Labrador et dans le Nord-du-Québec. Sachant que la gestion des eaux est déjà un défi dans le contexte climatique actuel, les augmentations prévues vont entraîner des défis supplémentaires. À cela s'ajoute le fait que l'on tend vers l'exploitation de mine à ciel ouvert à grand volume ce qui augmente l'empreinte de la mine et, par le fait même, la quantité d'eau à gérer. La recirculation de l'eau est déjà bien implantée dans la plupart des mines, mais il reste peut-être encore un peu d'amélioration à faire dans ce domaine. Un des

problèmes liés à la recirculation est l'augmentation de la charge en contaminants qui peut entraîner des difficultés par rapport à la récupération à l'usine lorsque la flottation est utilisée.

La stabilité géotechnique et géomécanique des ouvertures minières pourrait être problématique si les précipitations augmentent. Par exemple, la stabilité des murs des mines à ciel ouvert pourrait diminuer si les pressions interstitielles augmentent en raison de précipitations plus abondantes. En climat nordique, le pergélisol non continu pourrait prendre plus d'espace, ce qui complique la construction des ouvrages. Même en zone de pergélisol continu, la zone active serait plus importante, ce qui pourrait causer des problèmes de stabilité. En ce qui concerne la construction des infrastructures de surface en conditions nordiques, les techniques pour éviter les impacts de la dégradation du pergélisol existent (bâtir sur pieux plutôt que sur le pergélisol), mais cela impliquera des coûts supplémentaires. Pour le Sud, on ne voit pas d'impacts majeurs par rapport aux infrastructures de surface.

À l'égard du transport, certains impacts des changements climatiques seront positifs. Dans le Nord, la durée plus longue d'approvisionnement pourrait permettre de diminuer les coûts d'entreposage. L'ouverture de la voie maritime du Nord pourrait également favoriser le transport des matières premières. Par contre, les coûts d'entretien des infrastructures (aéroports, quais, routes) pourraient être plus élevés. Toujours pour le Nord, si la température moyenne annuelle augmente, la capacité de transport par avion pourrait diminuer. En effet, la capacité portante de l'air chaud étant plus petite que celle de l'air froid, une augmentation de la température moyenne pourrait se traduire par des coûts de transport aérien plus élevés, puisqu'un avion peut transporter une masse plus importante par temps froid. L'utilisation de routes de glace pourrait également être compromise pour une partie du Nord-du-Québec. Pour le Sud, comme on ne prévoit pas de grand changement par rapport au fleuve St-Laurent, on est d'avis que les impacts des changements climatiques seront mineurs.

De façon générale, on estime que les coûts de traitement de l'eau durant l'opération vont augmenter avec les changements climatiques en raison des volumes supérieurs à traiter. De plus, une augmentation moyenne des températures pourrait être favorable à l'oxydation des minéraux sulfureux qui génère le drainage minier acide (DMA).

En terminant, on souligne que le marché du carbone va entraîner un coût pour les entreprises (vulnérabilité économique), surtout celles n'ayant pas accès à l'hydroélectricité. En matière de transport d'énergie, on s'inquiète de l'augmentation des feux de forêt causée par les changements climatiques qui pourrait occasionner des arrêts d'approvisionnement.

6.3 Quel va être l'impact des changements climatiques sur l'acceptabilité sociale des projets? Comment convaincre les communautés que les ouvrages vont tenir maintenant et pour des centaines d'années, avec en plus l'incertitude liée aux changements climatiques?

Les participants soulignent que l'acceptabilité sociale des projets est le principal défi de l'industrie minière actuellement et dans le futur. Des événements récents, tels que celui de la rupture d'une digue de la mine Mount Polley, nuisent à rétablir l'image de l'industrie minière. De

plus, les communautés n'hésitent pas à faire des liens entre ce genre d'évènement et les changements climatiques, et ce, même si l'on est davantage au niveau des perceptions que des faits. L'aspect qui inquiète le plus les communautés est la stabilité physique des ouvrages de retenue des résidus miniers et la contamination des eaux par les rejets.

Les participants soulignent que, pour des raisons techniques et d'acceptabilité sociale, des approches moins risquées à long terme devraient être favorisées dans le futur : des techniques telles que la déposition de rejets dans des lacs présentant peu ou pas de diversité biologique; l'utilisation de rejets épaissis; la déposition dans les ouvertures minières.

Les principales vulnérabilités des opérations minières par rapport aux changements climatiques sont résumées au tableau 3.

Tableau 1 : Vulnérabilités soulevées dans la première ronde

Vulnérabilité élevée	Vulnérabilité (opportunité) moyenne	Vulnérabilité faible
Gestion de l'eau (quantité [événements extrêmes], qualité [usine de traitement])	Transport maritime (+)	Poussières
Acceptabilité sociale et confiance du public	Transport aérien (-) pour le fret (Nord)	Changements dans la biodiversité (étude d'impact)
	Transport ferroviaire (-)	Ressources humaines : personnel disponible ; changement des périodes « traditionnelles »
	Transport routier : routes nordiques, d'hiver (pas tellement au Québec)	
	Coûts GES	
	Énergie alternative plus coûteuse (-)	
	Approvisionnement énergétique facilité (+) (LNG qui peut être livré plus longtemps)	
	Stabilité des ouvrages - ouvertures (surtout dans le Nord et surtout pour les mines à ciel ouvert)	

6.4 Est-ce que vos activités subissent déjà des impacts des changements climatiques? Intégrez-vous déjà les changements climatiques dans le développement des projets?

On souligne que l'effet des changements climatiques pour le moment est surtout visible au Nord. Les représentants de Mine Raglan sont témoins de l'évolution climatique depuis le début des opérations (p. ex. : les calculs faits initialement pour évaluer les mouvements thermiques dans les rejets miniers et dans les recouvrements doivent être revus afin d'inclure les nouvelles données climatiques). Le MERN fait savoir que, dans le futur, les effets des changements climatiques devront être intégrés dès les études d'impact. Les participants soulignent que, même en l'absence de lignes directrices en ce sens, la plupart des compagnies intègrent les changements climatiques dans les nouveaux projets. On souligne même que la tendance actuelle

est de pousser les analyses au-delà de ce qui est exigé, de façon à s'assurer d'être pris au sérieux par les populations. En ce sens, les gens de Mine Arnaud ont intégré des cas très défavorables en ce qui concerne la gestion de l'eau pour convaincre les parties prenantes.

Lors du développement de projet, les participants soulignent qu'ils vont devoir analyser des alternatives qui minimisent la vulnérabilité par rapport aux changements climatiques en ce qui concerne la gestion des rejets. On souligne la réutilisation des ouvertures minières (mine à ciel ouvert et chantiers souterrains) pour le stockage des rejets. On met en évidence que les ouvrages conçus devraient intégrer de la flexibilité pour s'adapter à l'évolution climatique, particulièrement les ouvrages liés au stockage des rejets miniers. Selon des participants, des solutions alternatives devraient être davantage envisagées, telles que la désulfuration des résidus. La restauration progressive est également une alternative qui devrait être favorisée. Néanmoins, la restauration progressive demeure difficile à appliquer, car il faut attendre plus de données avant de choisir un recouvrement final et d'y accorder des investissements. En raison des incertitudes liées aux changements climatiques et à la stabilité à long terme des ouvrages, les participants ne croient pas que des rétrocessions de sites miniers à la Couronne seront possibles dans le futur. Cela va impliquer une responsabilité à long terme par rapport aux sites d'entreposage des rejets, ce qui va impliquer un suivi sur plusieurs dizaines d'années (pour ne pas dire des centaines). Pour réduire la production de GES, il faudra se tourner de plus en plus vers des sources d'énergie alternative comme le gaz naturel liquéfié (GNL), l'éolien ou l'hydro-électricité.

6.5 Quels changements devrait-on intégrer pour réduire le risque?

Parmi les changements qui pourraient être apportés durant l'opération pour réduire la vulnérabilité par rapport aux changements climatiques, on retrouve ceux-ci :

- Concevoir des ouvrages évolutifs qui s'adaptent aux changements climatiques (p. ex. : déversoir qui peut être élargi, digue qui peut être rehaussée);
- Repenser l'opération et l'intégrer davantage à la gestion des résidus, particulièrement dans le contexte des mines à fort tonnage : (p. ex. : remplir les ouvertures avec les résidus, modifier les séquences minières pour favoriser l'utilisation des ouvertures minières);
- Retirer l'eau des résidus autant que possible pour améliorer la stabilité physique des ouvrages;
- Rendre les résidus «inoffensifs» via des procédés comme la désulfuration, la stabilisation avec des agents liants et la valorisation des matériaux miniers inoffensifs comme matériaux de construction;
- Valoriser les nouvelles technologies auprès du grand public afin de favoriser l'acceptabilité sociale des projets;
- Être transparent dans tout le processus de développement de projet (incluant les scénarios de changements climatiques) afin de construire un climat de confiance;
- Inclure des analyses de risques dans les projets qui intègrent les changements climatiques.

6.6 Qu'est-ce qui vous manque comme opérateurs ? Où mettre les efforts en R&D ?

Les participants soulignent le manque d'informations ou de méthodes pour intégrer les changements climatiques au processus de décision lié à l'opération. Beaucoup d'incertitudes subsistent dans l'information utilisée pour faire les designs. Réduire cette incertitude par rapport aux prédictions des changements climatiques devrait être une priorité pour la R&D. L'amélioration des techniques de séparation solide/liquide est également un aspect important, puisqu'elle permettrait de favoriser la déposition de rejets avec des teneurs en eau moindres (réduction des volumes d'eau à traiter). Les méthodes qui permettraient de réduire les volumes de résidus problématiques produits durant l'opération devraient être davantage étudiées. Une caractérisation environnementale précise des matériaux est nécessaire le plus en amont possible du projet. Enfin, les outils d'analyse de risque devraient tenir compte des changements potentiels du climat.

7. Atelier groupe «Restauration»

7.1 Qu'est-ce qui vous a marqué par rapport aux présentations de l'avant-midi ?

La table de discussion « restauration » regroupe des opérateurs miniers, des consultants ainsi que des représentants gouvernementaux, de l'Association minière du Québec (AMQ) et du milieu universitaire. Les participants s'entendent sur le fait que les changements climatiques à venir, particulièrement ceux à long terme, rendent vulnérables les sites restaurés, rétrocedés et/ou abandonnés. D'ailleurs, les infrastructures et concepts de restauration en place n'ont pas été réalisés en considérant les effets des changements climatiques. En ce sens, la discussion se tourne vers la responsabilité du suivi à long terme des sites. La durée de vie d'une mine en opération n'est pas la même que celle des aires d'accumulation des rejets qui resteront toujours sur place. La durée de vie moyenne d'une entreprise de même que celle des règlements et des politiques du gouvernement en place sont inférieures à la durée nécessaire du suivi des sites miniers après leur fermeture. Alors, pour réduire les risques, il faut aller vers des concepts de restauration moins risqués (p. ex. : les techniques d'ennoisement avec la construction de digues maintiennent un niveau de risque élevé dans le contexte des changements climatiques). Ainsi, la technique de déposition des résidus dans des lacs ou bassins naturels pourrait être envisagée de nouveau, puisqu'elle est plus sécuritaire que l'utilisation de digues. L'application de nouvelles technologies de restauration doit aussi être envisagée tout comme le dimensionnement des parcs à résidus et des ouvrages servant au confinement des rejets sera à revoir selon les augmentations de précipitations anticipées.

7.2 Quels aspects de nos opérations sont les plus vulnérables ?

Les participants mentionnent que, pour les sites en opération, il est possible de s'adapter assez facilement, entre autres, lors des révisions du plan de restauration. La principale difficulté associée aux changements climatiques est l'augmentation des quantités d'eau à gérer, ce qui soulève des problématiques de dimensionnement des infrastructures servant à collecter et à traiter les eaux, car le risque de débordement et/ou de rupture augmente. Ainsi, le dimensionnement des ouvrages est identifié comme étant une source de vulnérabilité potentielle, notamment les déversoirs. On cite l'exemple des mines de fer, où les superficies sont très grandes, ce qui génère plus de problèmes, étant donné que de faibles augmentations des

précipitations amèneraient des augmentations importantes des quantités d'eau à gérer et, par conséquent, des modifications majeures aux infrastructures. Pour les sites miniers situés plus au Sud, il est nécessaire de mieux connaître les scénarios pour les événements extrêmes. Les déversoirs d'urgence vont devoir contenir toute accumulation supérieure en considérant l'ensemble du bassin versant. De plus, des parcs à résidus trop étendus risquent d'augmenter la problématique d'érosion et de génération de poussières (p. ex. : lors d'événements extrêmes comme des sécheresses ou des feux de forêt).

Certains concepts de restauration ont été identifiés comme étant plus vulnérables. Néanmoins, les participants s'entendent sur le fait que chaque concept de restauration a ses faiblesses par rapport à certains paramètres des changements climatiques. Par exemple, les géomembranes sont vulnérables aux cycles de gel/dégel. Le concept de déposition des résidus dans le pergélisol est, quant à lui, vulnérable à l'augmentation des températures dans le Grand Nord. Le recouvrement en eau est reconnu comme trop risqué lorsque l'on doit construire des ouvrages de rétention avec peu d'information sur les précipitations et les événements extrêmes. Or, la conception des ouvrages de retenue doit tenir compte de la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes.

On fait référence à la formule suivante :

$$P_t = 1 - (1 - AEP)^i \quad [1]$$

où P est la probabilité cumulative (généralement exprimée en %) que l'événement critique (précipitation) survienne durant une période d'une durée déterminée i (exprimée en années) et AEP représente « *Annual Exceedance Probability* ».

L'incertitude associée aux changements climatiques influence directement la valeur d'AEP. On cite en exemple les périodes de sécheresse pour les sites restaurés ou rétrocedés. Certaines pistes de solutions sont discutées (p. ex. : la déposition des résidus sous forme densifiée ou cimentée), mais au final, ce sont souvent les coûts qui font pencher la balance pour les choix associés aux plans de fermeture.

Le suivi des sites après la restauration (règlementation) est une source importante de vulnérabilité dans le contexte des changements climatiques. Les périodes de suivi sont trop courtes. Les participants sont d'accord qu'il faut assurer un suivi plus serré et à plus long terme. Par contre, on se questionne si l'État est plus en mesure que l'industrie d'assurer la sécurité des sites à long terme, notamment lorsqu'on considère les ressources à sa disposition. De plus, l'accessibilité des sites restaurés pour le suivi est actuellement une problématique qui devra être résolue. Un questionnement est soulevé à savoir qui aura la responsabilité de vérifier que les critères de conception des ouvrages sont suffisamment robustes avec les futures prédictions des changements climatiques une fois que les mines seront fermées.

Un dernier aspect discuté porte sur l'acceptabilité sociale de l'industrie minière. Les exemples du passé (p. ex. : Mine Principale à Chibougamau) sont d'importantes sources de préoccupation qui

laissent craindre aux parties prenantes des projets miniers que de telles situations puissent se reproduire. Cet héritage du passé fait en sorte que les parties prenantes ont peu confiance envers l'industrie et les gouvernements pour assurer à long terme la qualité de l'environnement. Le contexte des changements climatiques apporte des incertitudes supplémentaires, notamment pour les infrastructures de retenue des rejets miniers. Ces incertitudes associées aux changements climatiques viennent donc s'ajouter aux nombreuses préoccupations déjà présentes des parties prenantes, ce qui peut contribuer aux problèmes d'acceptabilité sociale des projets.

Tableau 2 : Résumé et classification des vulnérabilités soulevées dans la deuxième ronde

Vulnérabilité élevée	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité faible
Concepts basés sur le gel	Stabilité des digues	Modification de la végétation
Dimensionnement des ouvrages	Érosion et les poussières	
Déversoirs		
Concepts basés sur l'enneigement		
Suivi périodique et entretien des sites		
Concepts de restauration avec couverture sèche		
Sites restaurés, rétrocedés ou abandonnés		
Acceptabilité sociale		

7.3 Est-ce que vos activités subissent déjà des impacts des changements climatiques ? Intégrez-vous déjà les changements climatiques dans le développement des projets ?

Les participants ont évoqué des différences selon les régions. Présentement, les responsables de projets miniers situés dans le Nord considèrent les changements climatiques dans les concepts de restauration. Dans le cas de la mine Raglan, un comité composé de professionnels de la mine, d'experts externes et de consultants y travaille. Pour les phases 2 et 3 de cette mine, les changements climatiques doivent être intégrés à la planification. Néanmoins, malgré la volonté de les intégrer, on fait face à un manque d'informations et surtout de «certitudes» envers les prédictions climatiques. Les dirigeants comprennent qu'ils n'auront jamais de certitudes par rapport au climat, mais qu'ils doivent tout de même travailler à partir des projections actuelles. Dans le Sud, les changements climatiques ne sont généralement pas considérés. Selon les participants qui travaillent dans des mines déjà en opération, jusqu'à maintenant, ils n'ont pas eu à les intégrer dans leurs études d'impacts.

Les participants conviennent que les changements climatiques accentuent la désuétude du principe de «*walk away solution*»². Cette façon de voir ne convient plus aux réalités. De plus, le contexte des changements climatiques rend la restauration progressive plus intéressante, sauf dans la perspective des technologies changeantes. Dans ce contexte, c'est toujours un

² L'expression «*walk away solution*» réfère à des solutions qui n'exigeraient absolument aucune intervention ultérieure. Dans le contexte de la restauration minière, cela implique un plan de fermeture qui, ultimement, n'exigerait aucun suivi ou travail d'entretien une fois la restauration terminée.

compromis entre les avantages de la restauration progressive versus la possibilité d'attendre et de profiter des avancées technologiques.

7.4 Quels changements devrait-on faire pour intégrer les CC et pour réduire le risque ? Qu'est-ce qui vous manque comme opérateurs ? Où mettre les efforts en R&D ?

Quoique certaines actions spécifiques aient été suggérées, entre autres pour assurer la stabilité dans un contexte d'augmentation des précipitations, il est suggéré d'ajouter la prise de données piézométriques plutôt que seulement prendre des mesures de l'eau au bas des digues. Toutefois, la majeure partie des discussions s'est plutôt tournée vers des orientations globales à envisager pour l'intégration des changements climatiques. L'application du principe de «*design for closure*»³ est au cœur de l'adaptation du secteur aux changements climatiques. Il faut faire de l'éducation à l'intérieur même des entreprises, car bien des intervenants ne comprennent pas les impacts que les opérations et les décisions peuvent avoir sur la restauration.

Le plan de restauration a été identifié comme un outil intéressant dans le contexte des changements climatiques afin de travailler à leur intégration dans la planification. De plus, le concept d'analyse de risque doit être incorporé aux plans de fermeture. Lors des révisions du plan de restauration prévues tous les cinq ans pour une mine en exploitation, il est important de revoir le concept choisi et, au besoin, de faire des modifications. De plus, il apparaît nécessaire de réviser les sites déjà restaurés à la lumière des changements climatiques. Un participant a mentionné que l'impartialité des plans de fermetures peut être remise en question. Une évaluation externe des plans de fermeture permettrait de mieux juger les risques. Les participants sont d'avis que dans les cas où les coûts d'une restauration appropriée rendent le projet non rentable, le gouvernement ne devrait pas donner de bail minier.

Parmi les pistes de solutions discutées, la sensibilisation a été mentionnée à quelques reprises. On sent un besoin de sensibilisation pour amener l'industrie à être proactive. Dans ce sens, il a été suggéré que l'Association minière du Québec (AMQ) puisse jouer un rôle pour militer en faveur d'une intégration des changements climatiques dans la planification des compagnies minières. Entre autres, on recommande à l'AMQ d'inclure les changements climatiques dans le programme *Vers un développement minier durable* (VDMD). Les participants membres de l'Ordre des ingénieurs du Québec (OIQ) croient que cet organisme pourrait aussi avoir un rôle par rapport à la sensibilisation de l'importance de considérer les changements climatiques dans la conception des ouvrages.

Différents obstacles à l'intégration des changements climatiques et des besoins en recherche ont été soulevés. D'abord, on a besoin d'avoir de l'information quant aux coûts que représenterait l'incorporation des changements climatiques dans le design comparativement aux coûts

³ L'expression «*design for closure*» réfère à la planification de la conception des infrastructures minières en fonction de la fermeture de la mine et de la restauration du site. Cela implique d'intégrer, le plus en amont possible, dans le processus de développement d'une mine, les aspects relatifs à la restauration (notamment la prévision des coûts futurs pour celle-ci), à l'entretien et au suivi à long terme des sites miniers.

potentiels des impacts des changements climatiques dans le futur (les coûts d'un concept robuste aux changements climatiques). Pour cela, il faut des informations supplémentaires pour comparer, sur la base des coûts, les scénarios avec ou sans l'intégration des changements climatiques. Donc, la recherche pour améliorer la précision des modèles climatiques doit se poursuivre ainsi que le travail d'identification et de mitigation des risques associés aux changements climatiques. Même si les modèles climatiques ne se rendent pas à des échelles de temps de l'ordre de celle que souhaitent les ingénieurs, il n'en demeure pas moins qu'ils ont besoin d'un point de départ pour démarrer l'analyse (p. ex. : des prévisions d'événements extrêmes de l'ordre d'une occurrence en 100 ans ou en 1000 ans). L'approche probabiliste pourrait possiblement être appliquée à la conception de scénarios de restauration. Ainsi, de meilleures données (moins d'incertitudes) sur le long terme permettront de savoir combien d'argent les minières pourraient épargner en optant pour des concepts plus résilients face aux changements climatiques.

Finalement, les participants s'entendent sur le fait que la réglementation devra être adaptée aux changements climatiques. Cela ne doit pas nécessairement passer par une modification des règlements à proprement dits, mais peut-être via les lignes directrices pour les études d'impacts et les demandes de certificat d'autorisation (CA) par exemple. Les participants sont d'avis que les changements climatiques doivent être pris en compte pour la remise de permis, dans les études d'impact, dans les guides de restaurations et dans les lignes directrices.

8. Plénière

Lors de la plénière, les participants ont fait ressortir les principaux éléments qu'ils retiennent des discussions et de la journée en général. Voici un résumé de ce qu'ils ont partagé.

L'industrie se dit plutôt adaptative face aux changements climatiques, du moins en ce qui concerne les activités d'exploration et d'exploitation. Elle est en mesure de s'adapter à une multitude de conditions climatiques sans problèmes. On donne l'exemple d'autres juridictions minières, où les précipitations sont très importantes et où ça ne cause pas de problèmes. Les moyens existent pour gérer des paramètres climatiques différents. De plus, lorsque l'on considère la durée de vie plutôt courte des activités d'exploration et d'exploitation, les participants sont d'avis que l'industrie s'adaptera sans trop de difficultés. Le principal souci n'est donc pas l'évolution du climat, mais beaucoup plus sa variance sur de courtes périodes (variation des extrêmes), par exemple dans une même saison ou d'une année à l'autre. Ses variations plus extrêmes peuvent, quant à elles, avoir beaucoup plus d'impacts sur les opérations minières. Il faut donc mieux connaître les risques associés aux changements climatiques, notamment mieux quantifier les événements extrêmes de précipitations.

En ce qui concerne la restauration et la gestion des rejets miniers, des participants soulignent que, devant l'importance d'intégrer les changements climatiques dans la planification des opérations, ils se sentent démunis face aux projections des scénarios climatiques quand vient le moment de faire de l'ingénierie et de travailler aux plans de restauration. Par exemple, on explique que les intervalles de données dans les modèles sont très grands et qu'ils font en sorte

que les experts ne savent pas à quoi ils doivent se référer. De plus, on ne retrouve pas de prédiction après 100 ans en raison d'une trop grande incertitude, alors que les calculs demandés pour le design doivent aller au-delà de cette période (1000 ans). On fait face à une discordance entre la durée des projections et les demandes de prévision quant à la sécurité des sites. En considérant les vulnérabilités aux changements climatiques pour les sites restaurés, des intervenants indiquent qu'il faudrait mener une réflexion sur la réglementation et les exigences de suivi des sites, particulièrement pour les méthodes de restauration et les certificats d'autorisation. Il faudrait aussi se questionner sur la conception des ouvrages à long terme et sur les méthodes de restauration. On s'interroge sur la manière de valider les critères de conception une fois la mine fermée ainsi que sur l'entité qui en sera responsable.

Toujours par rapport à la restauration, on se questionne sur une éventuelle capacité accrue des sites miniers à générer de l'acidité dans un climat changeant, notamment pour les sites abandonnés. Par exemple, on s'interroge sur les coûts que pourrait représenter un volume d'eau supplémentaire à traiter en raison de l'augmentation des précipitations.

En ce qui concerne l'exploration, on explique que la réduction de la fenêtre d'accès au territoire nordique n'est pas seulement reliée à la diminution de la période de présence de glace, mais aussi à la diminution de la qualité de celle-ci. En fin de compte, cela représente une perte significative de la période propice aux travaux de terrain en milieu humide.

Parallèlement aux impacts potentiels des changements climatiques sur les activités minières, des participants partagent des inquiétudes entourant l'adoption de réglementations supplémentaires. En effet, certains craignent que le contexte des changements climatiques puisse amener les gouvernements à adopter de nouvelles législations, ajoutant ainsi à lourdeur réglementaire et administrative, particulièrement pour les petites entreprises d'exploration. D'ailleurs, on explique que l'on n'est pas certain qu'il s'agisse d'impacts tangibles pour l'exploration et, par conséquent, que l'on doit user de prudence dans la réflexion sur les mesures visant à se prémunir des impacts des changements climatiques. Un peu dans le même ordre d'idées, il est mentionné qu'il faut faire attention de ne pas apeurer les gens inutilement.

De façon plus générale, certains enjeux de communication sont soulignés, d'une part, par rapport à la vulgarisation des modèles climatiques et, d'autre part, au niveau de l'industrie, des associations et des gouvernements. On explique l'importance de bien faire connaître les rôles et responsabilités de différentes parties quant à l'intégration des changements climatiques dans la planification et l'encadrement des activités minières.

Les enjeux d'acceptabilité sociale ont occupé une place importante dans les discussions des trois groupes. Les participants suggèrent d'analyser les relations entre les changements climatiques et l'acceptabilité sociale. Par exemple, les changements climatiques ajoutent une source d'inquiétude supplémentaire pour les parties prenantes des projets miniers, pouvant ainsi accentuer les problématiques reliées à l'acceptabilité sociale. De plus, cette inquiétude face au climat pourrait résulter en des coûts supplémentaires par la mise en place de moyens

d'adaptation aux changements climatiques allant bien au-delà des besoins réels pour répondre aux exigences reliées à l'acceptabilité sociale.

Aux termes de la plénière, il est suggéré de mettre sur pied un programme d'innovation minière dans le contexte des changements climatiques. Ce programme pourrait, entre autres, avoir pour objectif de faciliter la préparation des infrastructures aux changements climatiques et l'adaptation des techniques du secteur minier.

9. Conclusion de la journée

Le fait que de nombreux experts du secteur minier aient accepté de se déplacer dans les locaux d'Ouranos pour participer à cette activité, malgré un horaire chargé, témoigne de l'intérêt qu'ils accordent à l'enjeu des changements climatiques et de leurs impacts. La réponse positive de la très grande majorité des intervenants qui ont été approchés pour participer à cette activité est un signe sans équivoque de l'importance de poursuivre la réflexion sur les impacts des changements climatiques pour les activités minières au Québec.

Bien que nous n'en soyons qu'aux premières étapes d'une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois, certains éléments ressortent clairement des échanges entre les experts du secteur. Aux termes de cette journée, on peut souligner, entre autres, qu'il apparaît nécessaire de mieux évaluer les risques associés aux changements climatiques afin de réduire l'incertitude. Néanmoins, les ateliers ont permis de constater qu'il existe un écart important entre les renseignements fournis par les projections d'Ouranos et les besoins précis des intervenants du secteur minier en matière d'information sur le climat futur. En effet, les renseignements que fournissent les modèles climatiques ne correspondent pas directement aux besoins de ces derniers pour qu'ils soient en mesure de les utiliser dans la planification des opérations minières et dans la conception de scénarios de restauration. Cet écart est présent dans le type de données présentées, mais également par rapport à des échelles temporelles et géographiques. Par exemple, les données de précipitations moyennes donnent une idée de l'évolution du climat, mais elles ne sont pas suffisantes pour le design des parcs à résidus, qui nécessite des données de *PMP* (*probable maximum precipitation* – précipitation maximale probable) par exemple. Dans le même ordre d'idées, les scénarios climatiques utilisent des projections sur quelques dizaines d'années, alors que les designs des parcs doivent être faits en fonction d'une centaine, voire même d'un millier d'années. Ces écarts entre les scénarios climatiques et les besoins du secteur minier nous amènent à constater qu'il faut mieux quantifier les événements climatiques extrêmes attendus et selon une échelle plus détaillée, en particulier pour les précipitations. Cela implique des projets pour adapter les modèles climatiques aux besoins du secteur minier.

De façon générale, l'industrie se considère adaptative par rapport à l'évolution du climat. C'est plutôt l'augmentation de la variance de celui-ci qui est la source des plus grandes inquiétudes, particulièrement en ce qui concerne la gestion de l'eau. On souligne également l'importance d'assurer un suivi à long terme des sites miniers, particulièrement en ce qui a trait aux sites restaurés ainsi qu'aux sites rétrocédés ou abandonnés, qui sont à la charge de l'État québécois.

De façon plus spécifique, une liste de recommandions qui émanent des échanges tenus lors des ateliers et des faits saillants de la synthèse bibliographique a été dressée.

10. Recommandations pour la suite du mandat

- Travailler de concert avec Ouranos pour adapter les informations des scénarios climatiques afin de répondre plus directement aux besoins du secteur minier, particulièrement pour les événements extrêmes et selon des échelles géographiques correspondant mieux aux régions minières.
- À la lumière de ces informations, il est recommandé d'évaluer qualitativement le degré de vulnérabilité du secteur minier pour les paramètres qui ont été identifiés lors des ateliers, et ce, pour chaque région minière et en fonction des différents scénarios de changements climatiques.
- Dans le même ordre d'idées, il est recommandé d'évaluer qualitativement le degré de vulnérabilité spécifiquement pour les sites miniers abandonnés pris en charge par le gouvernement.
- Évaluer l'influence de la variation des principaux paramètres climatiques pris en compte dans la conception des ouvrages miniers.

11. Recommandations à long terme

D'autres recommandations s'inscrivent dans une perspective à plus long terme ou encore dans une vision plus large de la démarche. Il est donc recommandé :

- de développer les modèles climatiques afin d'obtenir plus de précision à long terme sur les paramètres climatiques utilisés pour la conception des ouvrages miniers;
- de mener des études visant à faire le pont entre les scénarios climatiques et les méthodes de restauration, afin d'identifier celles à préconiser ou à éviter dans le contexte des changements climatiques pour une région donnée;
- d'effectuer une analyse des vulnérabilités spécifiques aux règlements et lignes directrices par exemple, en ce qui concerne les plans de restauration, les guides pour la rédaction d'un plan de restauration, les études d'impacts, la *Directive 019*, les certificats d'autorisation, etc.;
- de mieux comprendre les relations entre les changements climatiques et l'acceptabilité sociale des projets miniers;
- de développer un programme d'innovation minière visant à améliorer la robustesse de l'industrie minière québécoise face aux changements climatiques.

Annexe 1

Déroulement de la journée

10:15	Arrivée des participants
10:30	Brève mise en contexte du projet par le MERN (Katrie Bergeron)
10:35	Brève mise en contexte de la démarche et des objectifs de l'atelier (Denis Bois)
10:40	Présentation par OURANOS sur les variations des paramètres climatiques (Caroline Larrivée et Philippe Roy) incluant une période de questions
12:00	Retour sur la synthèse des impacts des changements climatiques sur le secteur minier (Denis Bois)
12:15	Dîner
13:00	Travaux des trois tables thématiques Partie 1 : <i>Identifier les vulnérabilités</i> (exploration, exploitation et restauration)
14:25	Classification par atelier des vulnérabilités
14:30	Pause
14:45	Travaux des trois tables thématiques Partie 2 : <i>Adaptation aux changements climatiques</i> (exploration, exploitation et restauration)
15:50	Priorisation des besoins pour l'adaptation aux changements climatiques
16:00	Plénière de conclusion : <i>Quels effets auront les changements climatiques sur la compétitivité de l'industrie minière au Québec?</i>
16:30	Fin de l'activité

Annexe 2

Liste des participants

Nom	Organisation/entreprise
Michel Jébrak	Professeur, UQAM
Jean-Marc Lulin	Président-directeur général, Exploration Azimut
Réjean Girard	Président-directeur général, IOS Services Géoscientifiques
Eva Roy-Vigneault	Responsable développement durable, Mine Virginia
Youcef Larbi	Chef géologue, <i>Cree mineral board</i>
Pierre Lacoste	Géologue, MERN
Bruno Bussière	Professeur, UQAT
Jean Béliveau	Directeur général (Meadowbank & Meliadine), Mines Agnico Eagle
Dominic Tremblay	Chargé de projet (mines et métaux), SNC Lavalin
Louis Bienvenu	Ingénieur, Direction générale du développement de l'industrie minérale, MERN
Luc Duval	Retraité (Glencore – fonderie Horne)
François Biron	Directeur de projet, Mine Arnaud
Benoît Demers	Retraité (SNC-Lavalin)
Isabelle Demers	Professeure, UQAT
Michel Aubertin	Professeur, Polytechnique Montréal
Suzie Bélanger	Directrice environnement, <i>Cliff Natural Resources</i>
Maria Hernandez	Ingénieur minier, Grand conseil Cree
Mélanie Côté	Surintendante environnement, Glencore – mine Raglan
Martine Paradis	Ingénieure, MERN
Serge Vézina	Vice-président Environnement et génie industriel (retraité), Cambior
Nathalie Tremblay	Directrice environnement et développement durable, AMQ

Annexe 3

Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier

Financé par





SYNTHÈSE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LE SECTEUR MINIER

Philippe Roy, Ph. D.

Septembre 2015



CRÉDITS

Rapport préparé par

Philippe Roy, Ouranos

Collaborateurs

Patrick Charron, IRME UQAT-Polytechnique

Citation suggérée: Roy, P. (2015). Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier. Montréal, Ouranos.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.

Table des matières

1	Introduction.....	12
2	Méthodologie	12
2.1	Régions d'étude.....	12
2.2	Indicateurs climatiques quantitatifs.....	13
2.3	Indicateurs climatiques qualitatifs	14
2.4	Données.....	14
2.4.1	Scénarios d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (RCP)	14
2.4.2	Simulations climatiques.....	15
2.4.3	Correction de biais et données de références	16
3	Résultats quantitatifs	17
3.1	Synthèse des régions.....	17
3.2	Abitibi	23
3.2.1	Figures	23
3.2.2	Tableaux	27
3.3	Baie-James.....	29
3.3.1	Figures	29
3.3.2	Tableaux	33
3.4	Côte-Nord	35
3.4.1	Figures	35
3.4.2	Tableaux	39
3.5	Fosse du Labrador	41
3.5.1	Figures	41
3.5.2	Tableaux	45
3.6	Grand Nord.....	47
3.6.1	Figures	47
3.6.2	Tableaux	51
3.7	Matagami - Chibougamau	53
3.7.1	Figures	53
3.7.2	Tableaux	57
4	Résultats qualitatifs.....	59
4.1	Période de retour des événements extrêmes.....	59
4.2	Période de fonte.....	59
4.3	Accumulation maximale	60

5	Niveau du St-Laurent dans un contexte de changements climatiques.....	61
6	Description des fichiers Excel	64
6.1	Données.....	64
6.2	Définition des indicateurs.....	64
6.3	Horizons temporels des fichiers Excel	64

Liste des figures

Figure 2.1 Régions minières	12
Figure 2.2 Évolution temporelle du forçage radiatif selon les différents scénarios RCP (adapté de Cubasch et al. 2013).	15
Figure 3.1 Changements de la température moyenne hivernale par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	18
Figure 3.2 Changements de la température moyenne estivale par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	18
Figure 3.3 Changements de la température minimale annuelle par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	19
Figure 3.4 Changements de la température maximale annuelle par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	19
Figure 3.5 Changements du nombre de jours sans gel par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	20
Figure 3.6 Changements de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	20
Figure 3.7 Changements du 99 ^e centile de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	21
Figure 3.8 Changements du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10mm par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	21
Figure 3.9 Changements de l'accumulation lors d'événements extrêmes par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiés.	22
Figure 3.10 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	23
Figure 3.11 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	23
Figure 3.12 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	24
Figure 3.13 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	24
Figure 3.14 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel (Tmin > 0 Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	25
Figure 3.15 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	25

Figure 3.16 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	26
Figure 3.17 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	26
Figure 3.18 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	27
Figure 3.19 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	29
Figure 3.20 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	29
Figure 3.21 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	30
Figure 3.22 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	30
Figure 3.23 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	31
Figure 3.24 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	31
Figure 3.25 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	32
Figure 3.26 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	32
Figure 3.27 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	33

Figure 3.28 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	35
Figure 3.29 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	35
Figure 3.30 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	36
Figure 3.31 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	36
Figure 3.32 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel (Tmin > 0 Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	37
Figure 3.33 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	37
Figure 3.34 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	38
Figure 3.35 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	38
Figure 3.36 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	39
Figure 3.37 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	41
Figure 3.38 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	41
Figure 3.39 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	42

Figure 3.40 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	42
Figure 3.41 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	43
Figure 3.42 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	43
Figure 3.43 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	44
Figure 3.44 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	44
Figure 3.45 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	45
Figure 3.46 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	47
Figure 3.47 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	47
Figure 3.48 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	48
Figure 3.49 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	48
Figure 3.50 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	49
Figure 3.51 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	49

Figure 3.52 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	50
Figure 3.53 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	50
Figure 3.54 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	51
Figure 3.55 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	53
Figure 3.56 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	53
Figure 3.57 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	54
Figure 3.58 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	54
Figure 3.59 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	55
Figure 3.60 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	55
Figure 3.61 Évolution temporelle du 99 ^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	56
Figure 3.62 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	56
Figure 3.63 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90 ^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10 ^e et 90 ^e centile) autour de cette moyenne.	57

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Liste des indicateurs climatiques quantitatifs utilisés dans le présent rapport	13
Tableau 2.2 Liste des indicateurs climatiques qualitatifs utilisés dans le présent rapport.....	14
Tableau 2.3 Representative Concentration Pathways utilisées dans l'ensemble CMIP5 (Adapté de Moss et al. 2010).....	14
Tableau 2.4 Liste des modèles utilisés pour le calcul des indicateurs climatiques	15
Tableau 3.1 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de l'Abitibi.	27
Tableau 3.2 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Baie James.	33
Tableau 3.3 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Côte Nord.	39
Tableau 3.4 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Fosse du Labrador.....	45
Tableau 3.5 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région du Grand Nord.....	51
Tableau 3.6 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de Matagami-Chibougamau.....	57
Tableau 4.1 Changement projeté pour les événements d'une période de retour de 20 ans pour la période 2080	59
Tableau 4.2 Période de fonte de la neige pour la période 2080	59
Tableau 4.3 Accumulation maximale pour la période 2080.....	60

1 INTRODUCTION

Les changements climatiques modifient les régimes de températures et de précipitations sur l'ensemble du globe. Au Québec, les simulations climatiques projettent des augmentations de températures importantes ainsi que des précipitations plus intenses.

Ce document présente les changements projetés sur six régions minières au Québec. Un ensemble exhaustif d'indicateurs a été développés pour caractériser l'effet des CC sur le secteur minier.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 RÉGIONS D'ÉTUDE

Six régions minières ont été identifiées par le partenaire Institut de recherche en mines et environnement (IRME). Ces régions sont caractérisées par une activité minière importante.

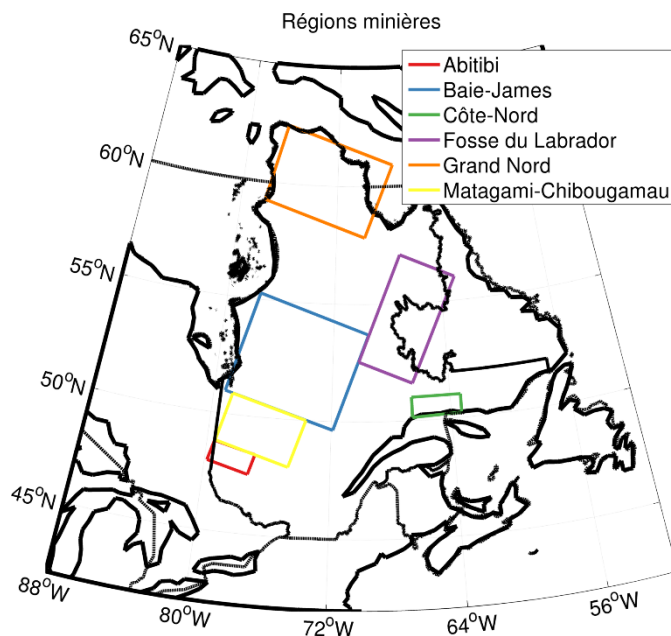


Figure 2.1 Régions minières

2.2 INDICATEURS CLIMATIQUES QUANTITATIFS

Les indicateurs climatiques suivants ont été calculés à l'aide d'un ensemble de simulations provenant du projet « Coupled Models Intercomparison Phase 5 » ([CMIP5](#), Taylor et al. 2011).

Chacun des indicateurs suivants est tout d'abord calculé sur une base annuelle. Ensuite, la moyenne climatologique pour une période donnée (e.g. 2041-270) est calculée à partir des valeurs annuelles sur la période considérée.

Voici quelques détails supplémentaires concernant certains indicateurs moins intuitifs :

- Accumulation lors d'événements extrêmes : on calcule tout d'abord la valeur du 95^e centile de la période historique (i.e. le 95^e centile est la valeur qui sépare la distribution de la précipitation quotidienne en 2 entités : du côté inférieur du 95^e centile nous avons 95% des données et du côté supérieur du 95^e centile, nous avons 5% des données). Ensuite, pour chaque année nous calculons l'accumulation des précipitations qui sont supérieures à la valeur historique du 95^e centile.
- Précipitations extrêmes : les précipitations extrêmes sont définies par la valeur annuelle du 99^e centile.

Tableau 2.1 Liste des indicateurs climatiques quantitatifs utilisés dans le présent rapport

Indicateur	Acronyme	Définition
Température moyenne en hiver	DJFTemp	Moyenne annuelle de la température entre décembre et février
Température moyenne en été	JJATemp	Moyenne annuelle de la température entre juin et août
Température minimale annuelle	AnnTasmin	Température minimale atteinte durant l'année
Température maximale annuelle	AnnTasmax	Température maximale atteinte durant l'année
Précipitation annuelle	AnnPrec	Accumulation annuelle des précipitations liquides et solides
Nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 mm	NbJrFr10mm	Nombre de jours où la précipitation quotidienne est supérieure à 10mm
Accumulation lors d'événements extrêmes	AccPrecExt	Pourcentage des accumulations causées par de fortes pluies
Précipitations extrêmes	P99	Valeur annuelle du 99 ^e centile de précipitation
Nombre de jours sans gel	FFD	Nombre de jours où la température minimale quotidienne est supérieure à 0 °C

2.3 INDICATEURS CLIMATIQUES QUALITATIFS

Dans le cadre de ce projet, il a été convenu de présenter les indicateurs suivants de manière qualitative. Une description quantitative pourra éventuellement faire l'objet d'un nouveau projet.

Tableau 2.2 Liste des indicateurs climatiques qualitatifs utilisés dans le présent rapport

Indicateur	Acronyme	Définition
Période de fonte	SnowThaw	Date à laquelle le couvert de neige disparaît
Accumulation maximale de neige	SnowMax	Accumulation maximale de la neige durant l'année
Période de retour des événements extrêmes de précipitation	RLP	Analyse par GEV des périodes de retours des maximums annuels

2.4 DONNÉES

2.4.1 Scénarios d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (RCP)

Les simulations climatiques utilisées proviennent du projet CMIP5. Chaque simulation utilise un scénario radiatif appelé « Representative Concentration Pathways » ([RCP](#), Moss et al. 2010). Les scénarios RCP représentent des chemins possibles en termes de forçages radiatifs et sont conditionnés par différentes évolution socio-économique durant les prochaines décennies. Par exemple, le scénario le plus pessimiste impose un forçage radiatif supplémentaire de 8,5 W/m² en 2100. Pour obtenir un ensemble reflétant l'incertitude sur le parcours socio-économique futur de la planète, il s'avère important d'utiliser plus d'un scénario RCP. Dans le présent rapport, deux RCP (4.5 et 8.5) ont été utilisés. Le tableau 2.3 présente le sommaire des différents scénarios RCP, tandis que la figure 2.1 présente l'évolution temporelle du forçage radiatif pour chacun des scénarios. Le choix des scénarios est basé sur les scénarios prioritaires tel que définis par CMIP5. Ainsi, si un centre de modélisation ne peut faire que 2 scénarios RCP, il est recommandé d'utiliser les scénarios 4.5 et 8.5. Par conséquent, plusieurs centres de modélisations ont seulement effectué ceux-ci. Dans le but de maximiser le nombre de simulations, il est préférable d'utiliser le RCP 4.5 et 8.5. Par ailleurs, le scénario 2.6 n'est pas considéré comme étant réaliste puisqu'il implique une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 2.3 Representative Concentration Pathways utilisées dans l'ensemble CMIP5 (Adapté de Moss et al. 2010)

Name	Forçage radiatif	Équivalent CO ₂ (ppm)	Anomalie température (°C)	Chemin
RCP8.5	>8.5 W/m ² en 2100	1370	4.9	Augmentation
RCP6.0	~6 W/m ² à stabilisation après 2100	850	3.0	Stabilisation sans plateau
RCP4.5	~4.5 W/m ² à stabilisation après 2100	650	2.4	Stabilisation avec plateau
RCP2.6 (RCP3PD)	~3 W/m ² avant 2100, déclin après	Pic à 490 avant 2100 et déclin	1.5	Pic et déclin

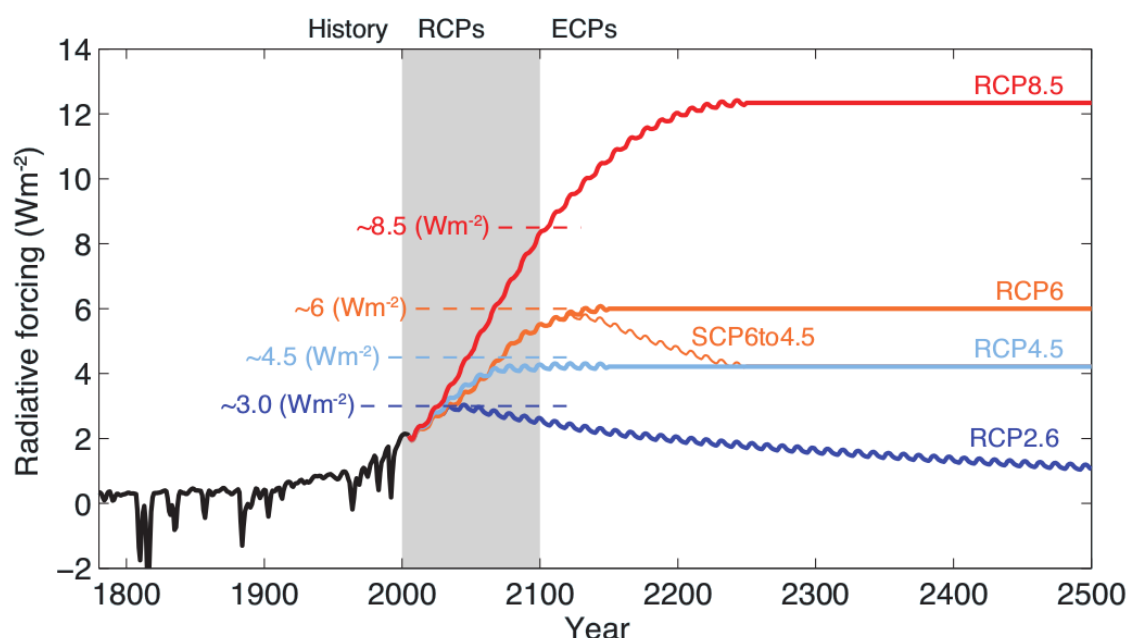


Figure 2.2 Évolution temporelle du forçage radiatif selon les différents scénarios RCP (adapté de Cubasch et al. 2013).

2.4.2 Simulations climatiques

Pour chacun des scénarios RCP, 43 simulations du projet « Coupled Models Intercomparison Phase 5 » (CMIP5) ont été utilisées. Ceci peut être considéré comme un ensemble assez large et couvre bien l'incertitude inhérente à ce type d'exercice (i.e. incertitudes des modèles, variabilité naturelle du climat et incertitudes des scénarios RCP). Le tableau 2.4 montre les modèles utilisés et le nombre de simulations (i.e. membres) par modèle. La moyenne multi-modèle des indicateurs est effectuée selon l'approche « 1 modèle – 1 vote ». Ainsi, les 10 membres de CSIRO-Mk3-6-0 ont autant de poids que le membre unique d'ACCESS1-0 dans le calcul de la moyenne d'ensemble.

Tableau 2.4 Liste des modèles utilisés pour le calcul des indicateurs climatiques

Modèle	Centre de modélisation	Institution	# de membres
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	1
ACCESS1-3	CSIRO-BOM	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	1
BNU-ESM	GCESS	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	1
CanESM2	CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	5
CMCC-CM	CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	1
CNRM-CM5	CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	1

Modèle	Centre de modélisation	Institution	# de membres
CMCC-CMS	CNRM-CERFACS	Centre National de Recherches Météorologiques	1
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	10
FGOALS-g2	LASG-CESS	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University	1
GFDL-CM3	NOAA GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	1
INM-CM4	INM	Institute for Numerical Mathematics	1
IPSL-CM5A-LR	IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace	4
IPSL-CM5A-MR	IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace	1
IPSL-CM5B-LR	IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace	1
MIROC5	MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	3
MIROC-ESM	MIROC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	1
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	1
MPI-ESM-LR	MPI-M	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	3
MPI-ESM-MR	MPI-M	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1
MRI-CGCM3	MRI	Meteorological Research Institute	1
NorESM1-M	NCC	Norwegian Climate Centre	1

2.4.3 Correction de biais et données de références

Les valeurs de références proviennent des observations quotidiennes sur grille NRCAN (Hutchinson et al. 2009). Une technique simple de correction de biais a été utilisée pour cette étude. Sur la période commune (1981-2010), la différence climatologique entre les observations et la simulation représente le biais de l'indicateur. Ce biais est ensuite soustrait de l'indicateur simulé sur la période historique et future.

3 RÉSULTATS QUANTITATIFS

3.1 SYNTHÈSE DES RÉGIONS

Les figures de cette section présente les changements attendus pour les différents indicateurs pour toutes les régions, permettant d'estimer les régions où les changements sont les plus prononcés. L'évolution temporelle des différents indicateurs sont présentés à la section 3.2 à 3.7.

La plupart des indicateurs présentent un changement constant entre les régions (amplitude du changement similaire). Par contre, certains indicateurs présentent des changements qui sont différents en fonction de la région d'étude :

- Température moyenne hivernale
 - Augmentation plus importante pour la région « Grand-nord » (Figure 3.1)
- Précipitations annuelles
 - Augmentation plus importante pour la région « Grand-nord » (Figure 3.6)
- 99^e centile de la précipitation annuelle
 - Augmentation importante pour les régions Grand-Nord, Baie-James et Fosse du Labrador (Figure 3.7)
- Nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm
 - Augmentation importante pour les régions du Grand-Nord, Baie-James et Fosse du Labrador (Figure 3.8)
- Accumulation lors d'événements extrêmes
 - Augmentation importante pour les régions du Grand-Nord, Baie-James et Fosse du Labrador (Figure 3.9)

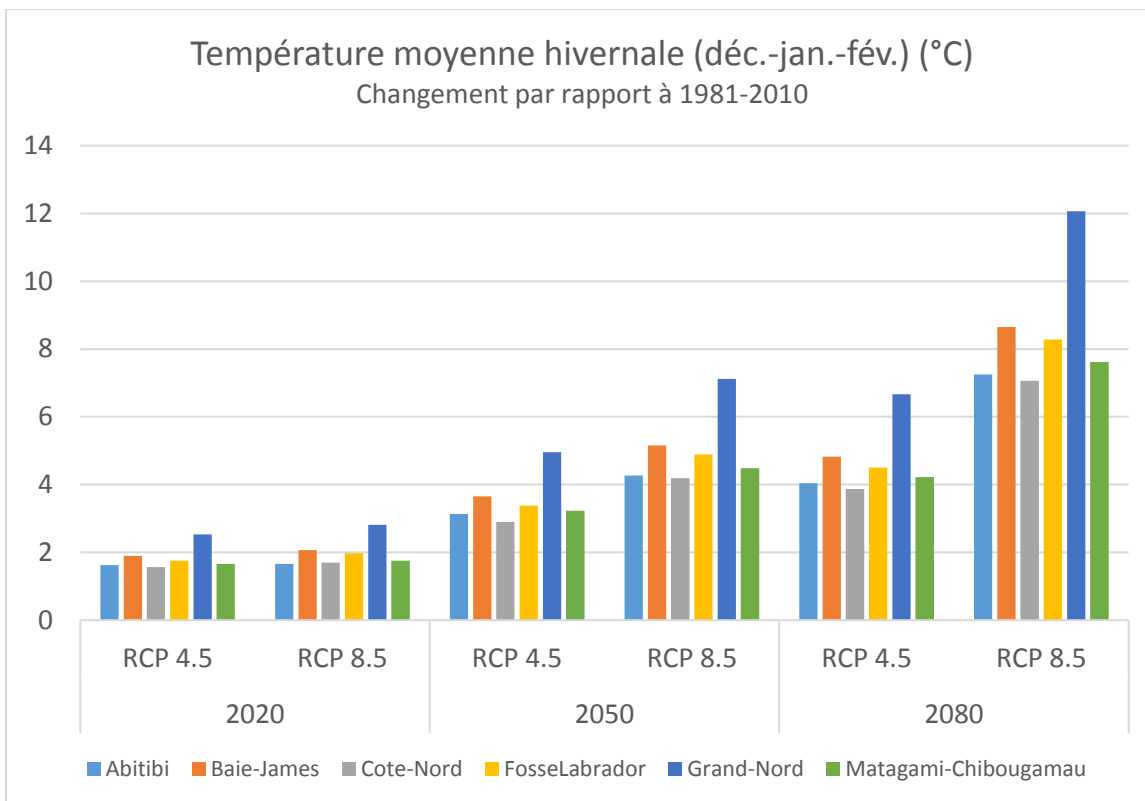


Figure 3.1 Changements de la température moyenne hivernale par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

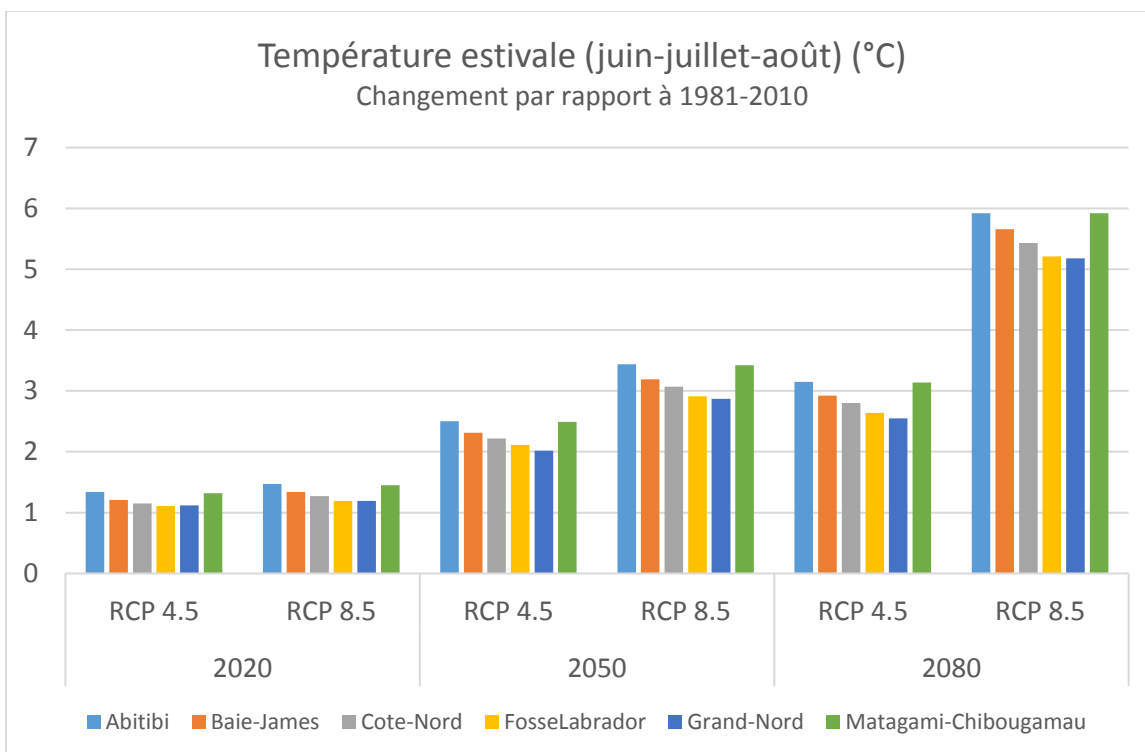


Figure 3.2 Changements de la température moyenne estivale par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

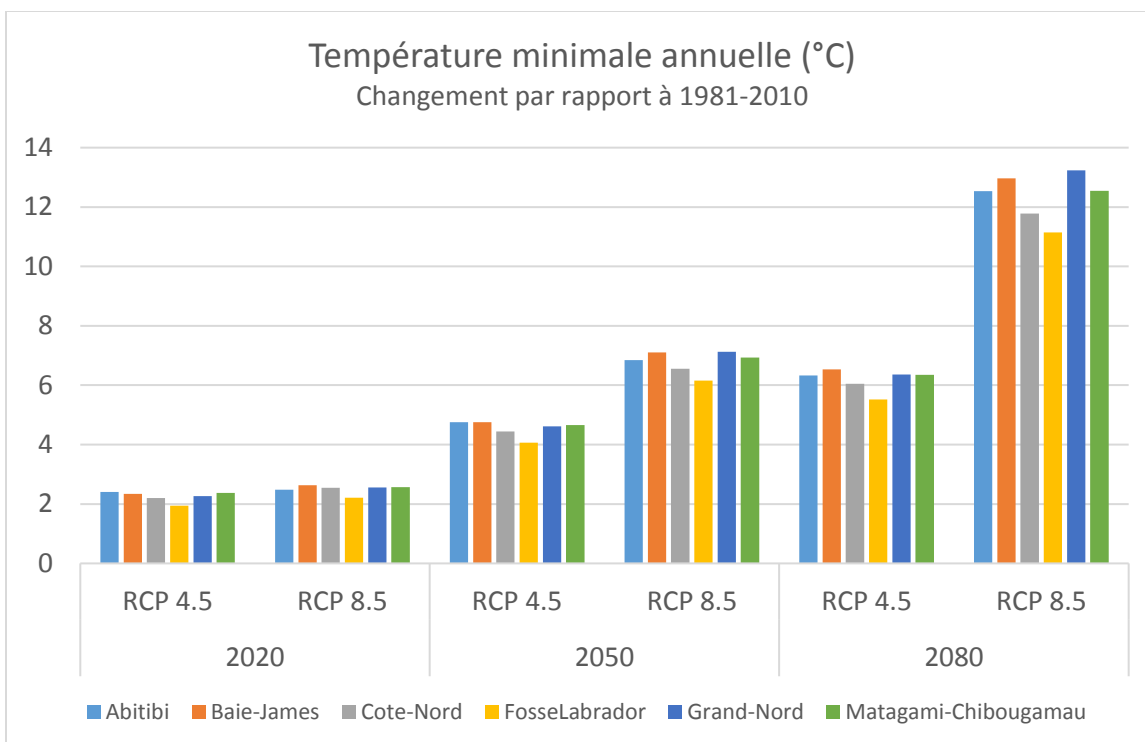


Figure 3.3 Changements de la température minimale annuelle par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

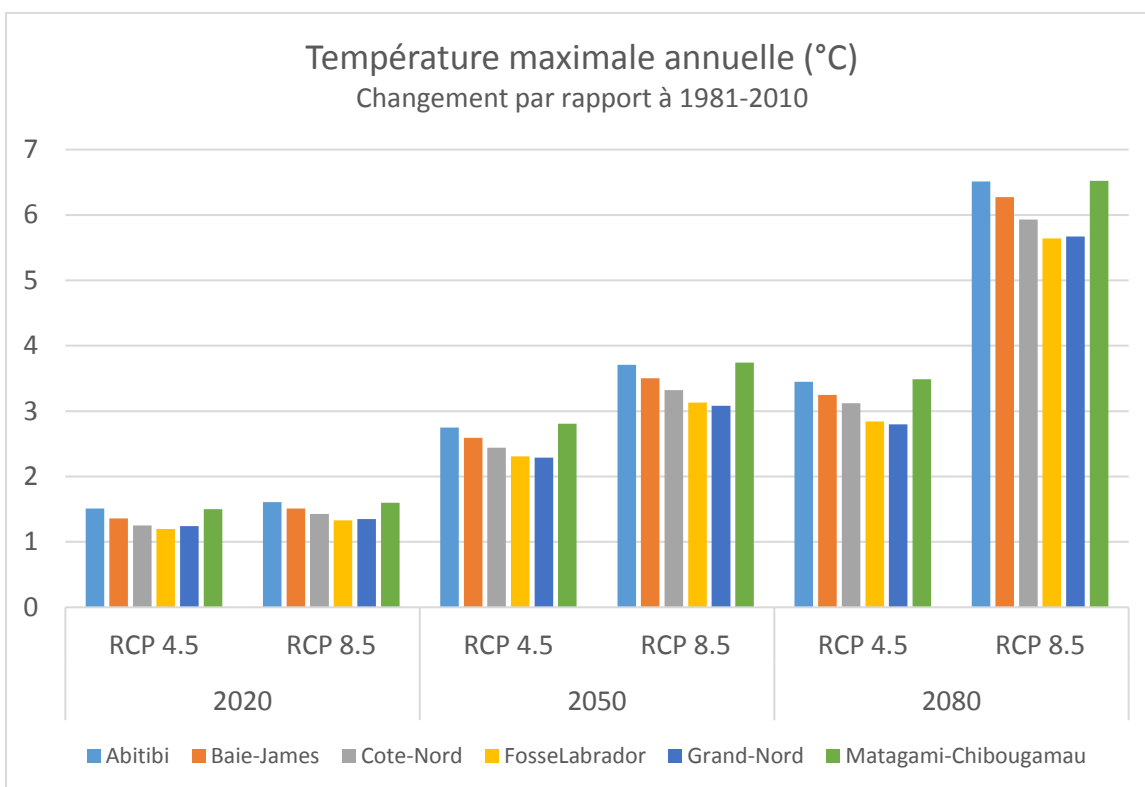


Figure 3.4 Changements de la température maximale annuelle par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

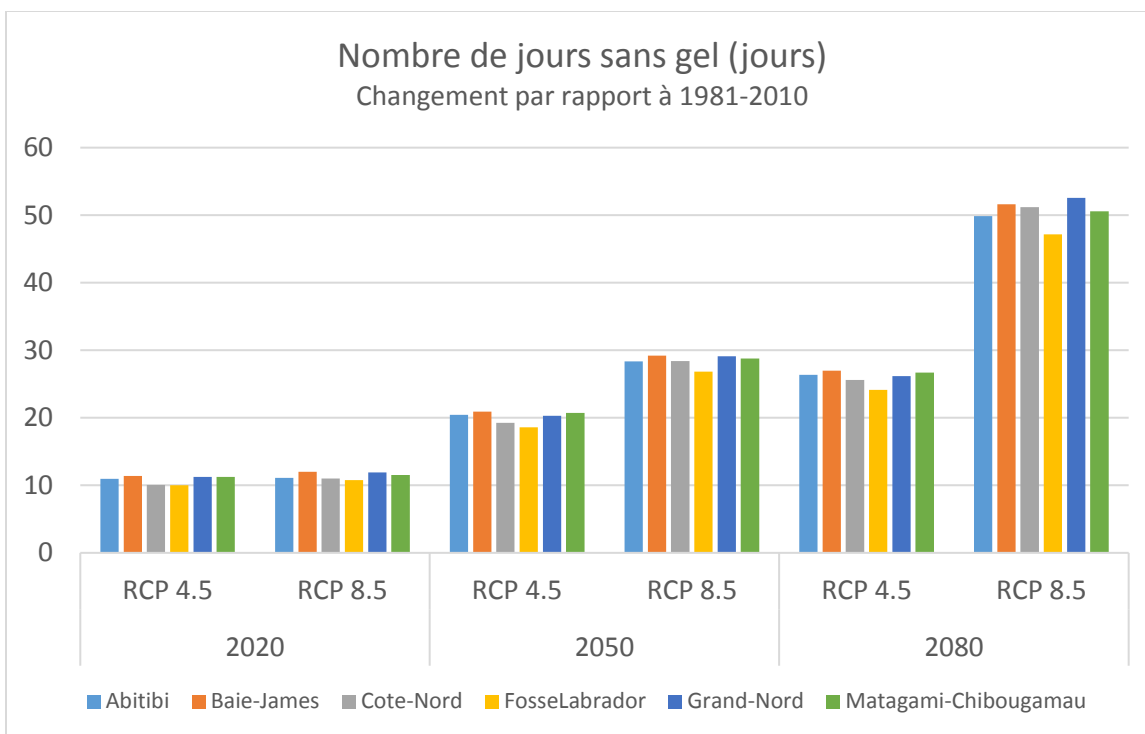


Figure 3.5 Changements du nombre de jours sans gel par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

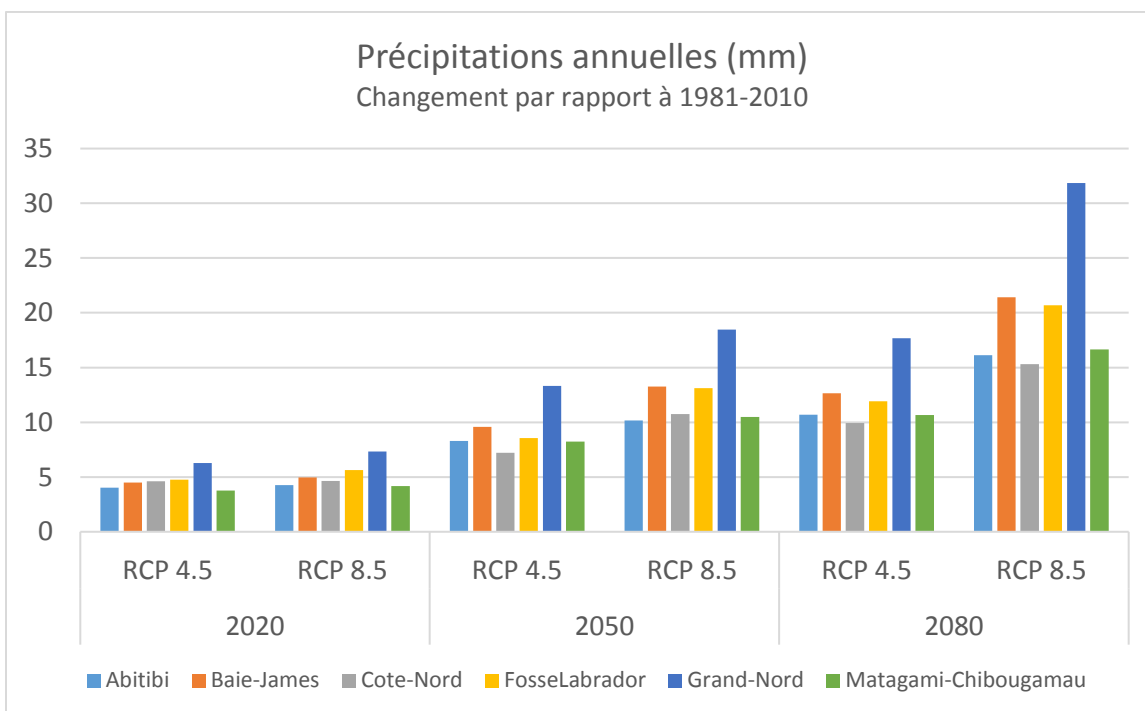


Figure 3.6 Changements de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

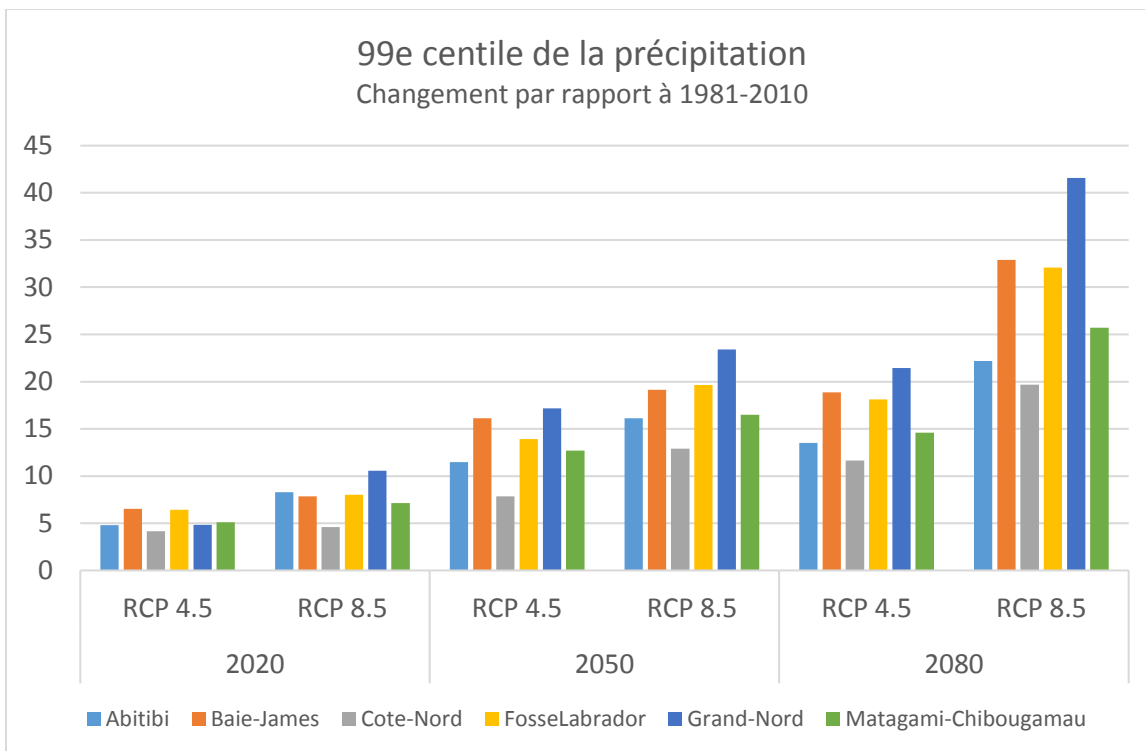


Figure 3.7 Changements du 99^e centile de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

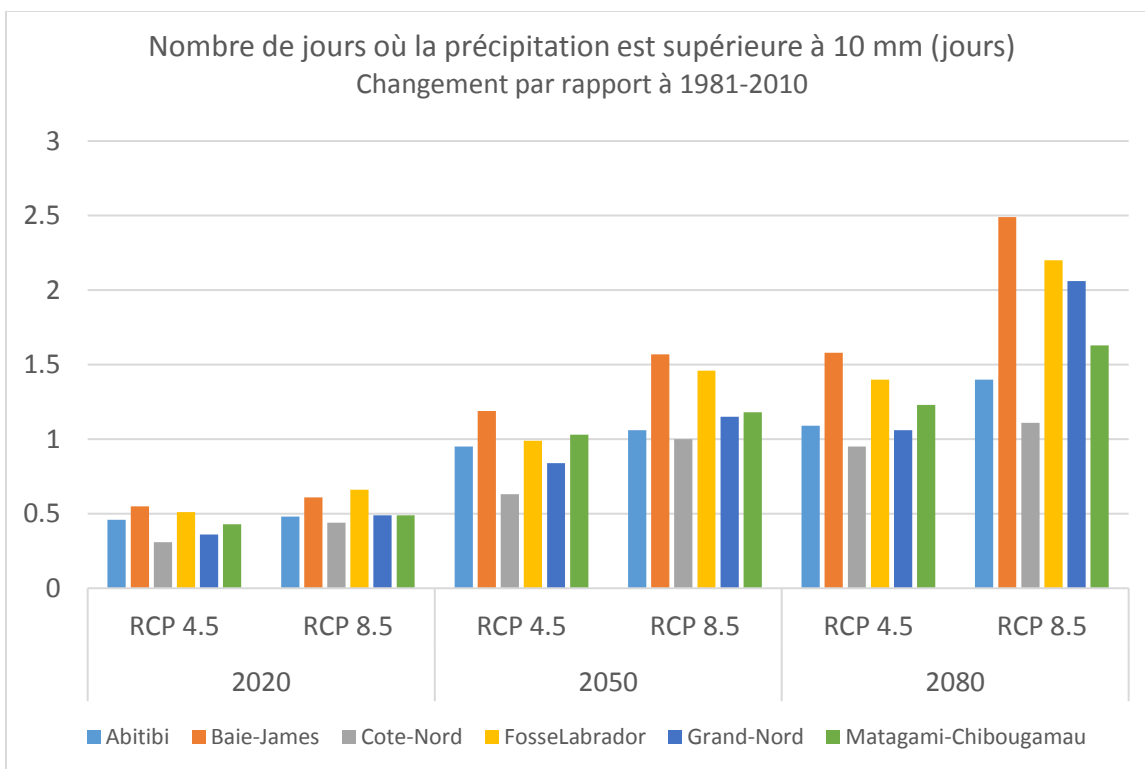


Figure 3.8 Changements du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10mm par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

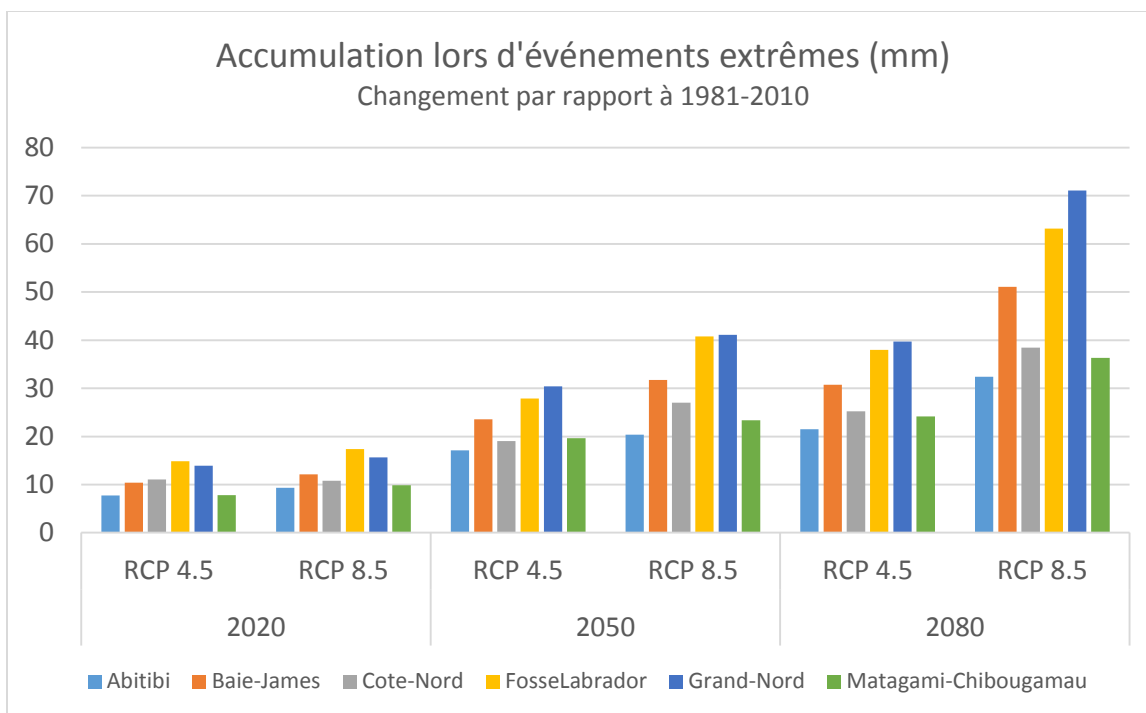


Figure 3.9 Changements de l'accumulation lors d'événements extrêmes par rapport à la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées.

3.2 ABITIBI

3.2.1 Figures

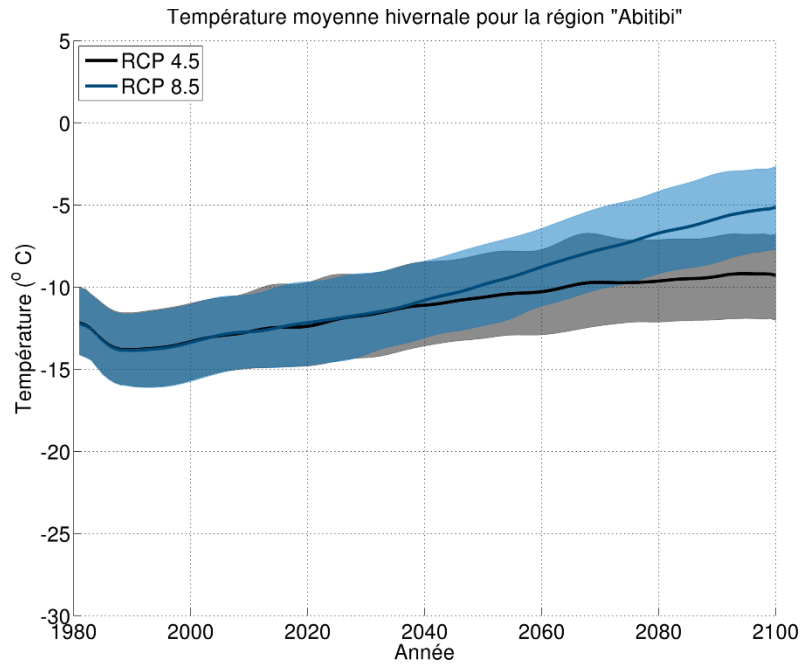


Figure 3.10 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

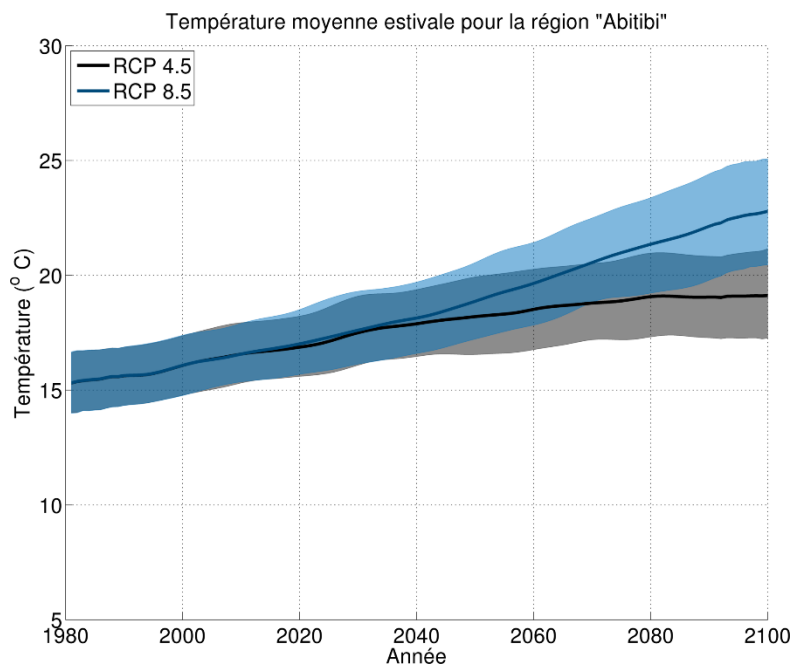


Figure 3.11 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

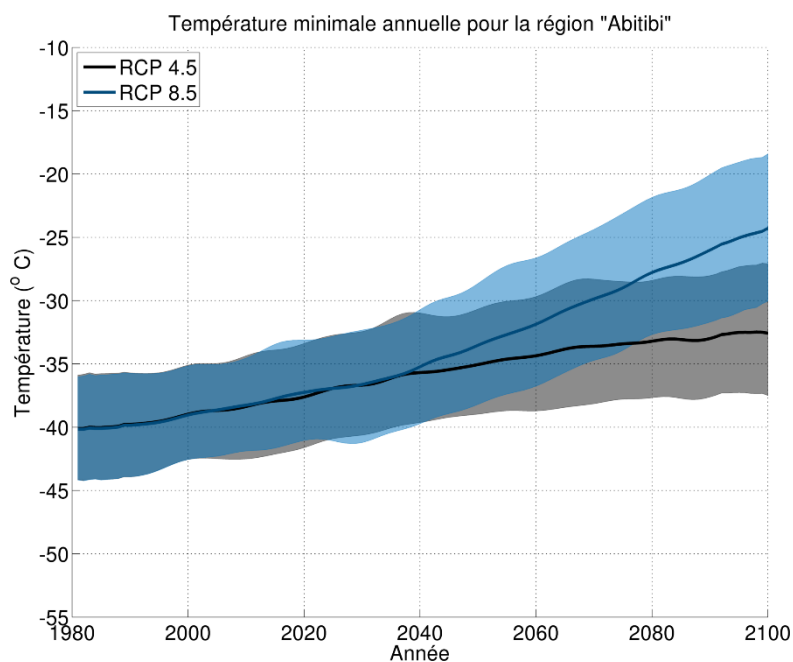


Figure 3.12 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

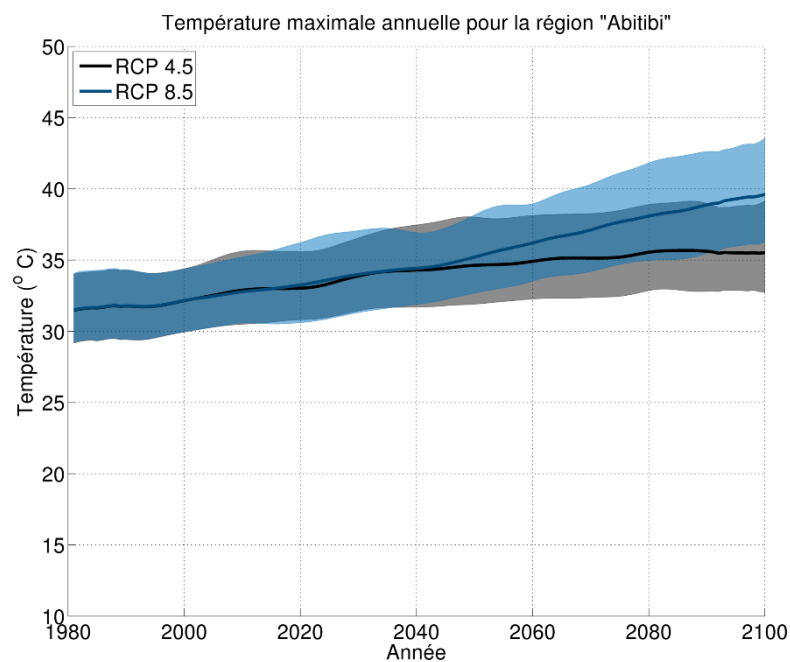


Figure 3.13 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

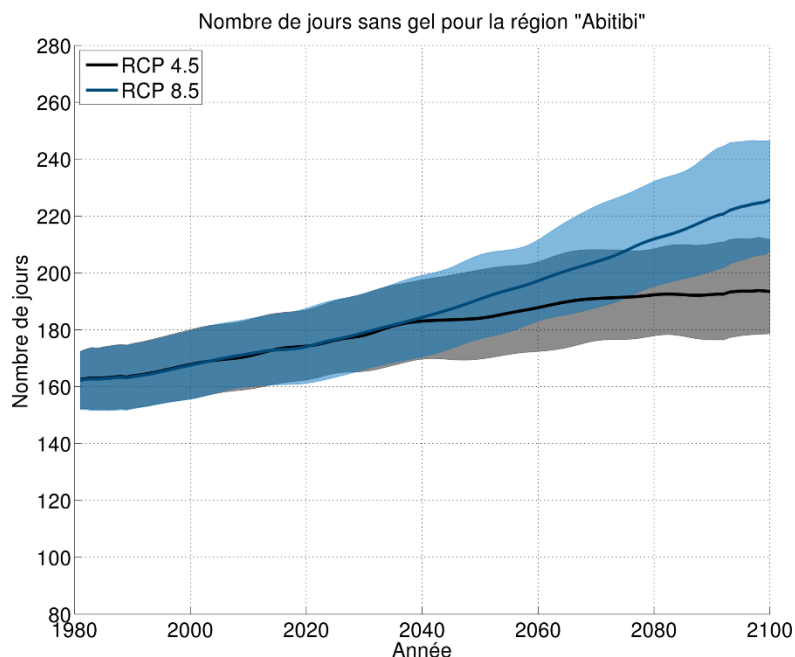


Figure 3.14 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

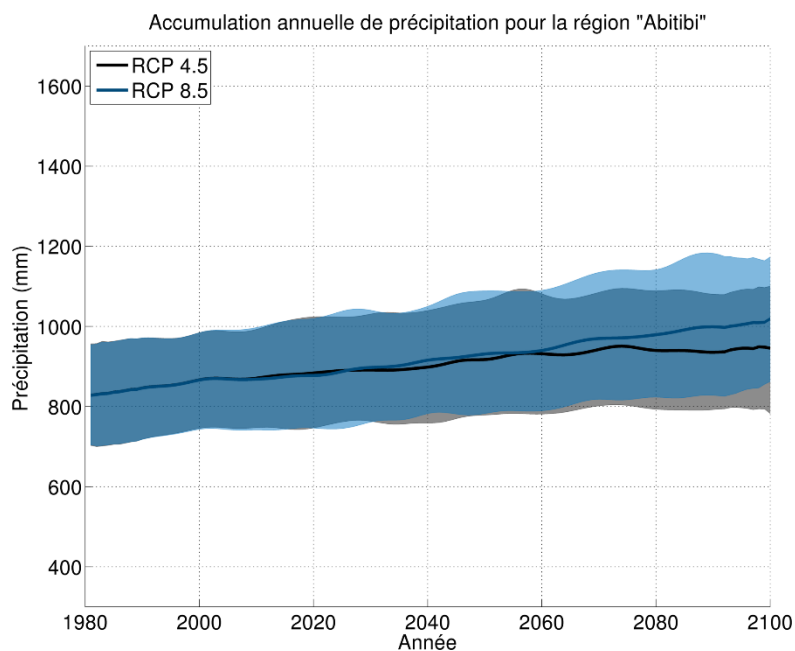


Figure 3.15 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

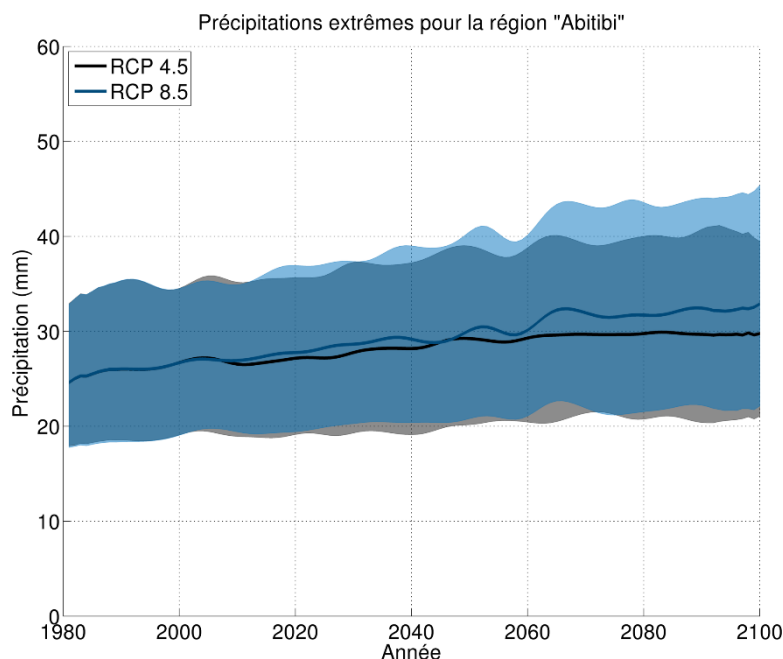


Figure 3.16 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

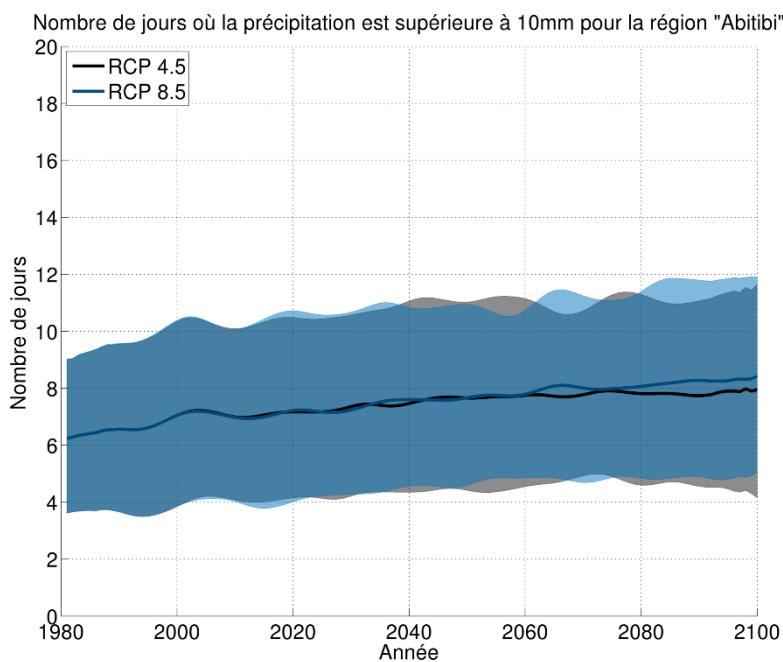


Figure 3.17 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

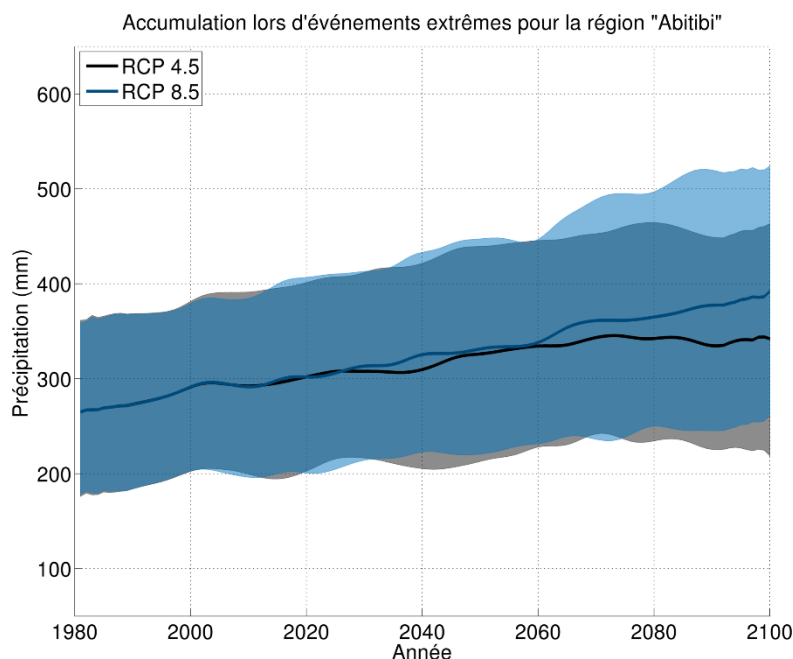


Figure 3.18 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile)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

3.2.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3 BAIE-JAMES

3.3.1 Figures

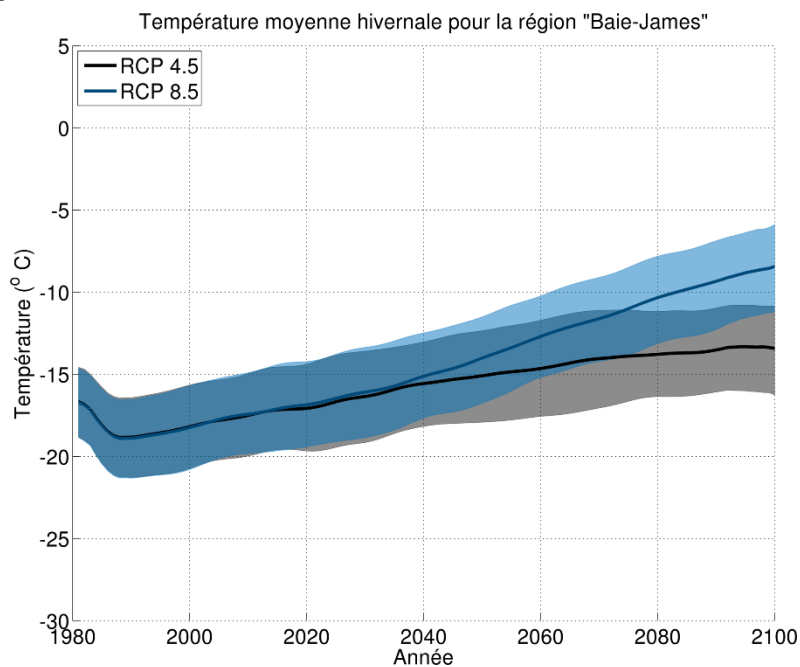


Figure 3.19 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

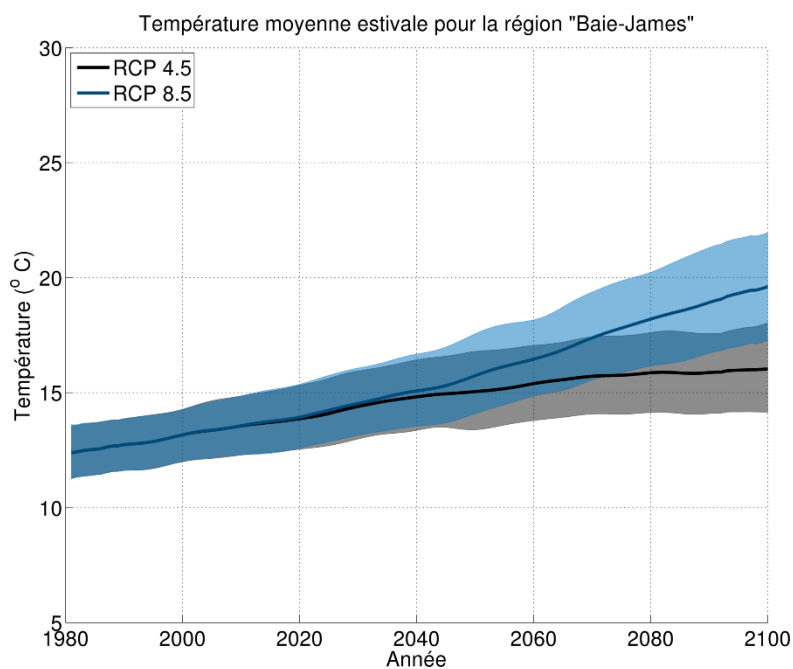


Figure 3.20 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

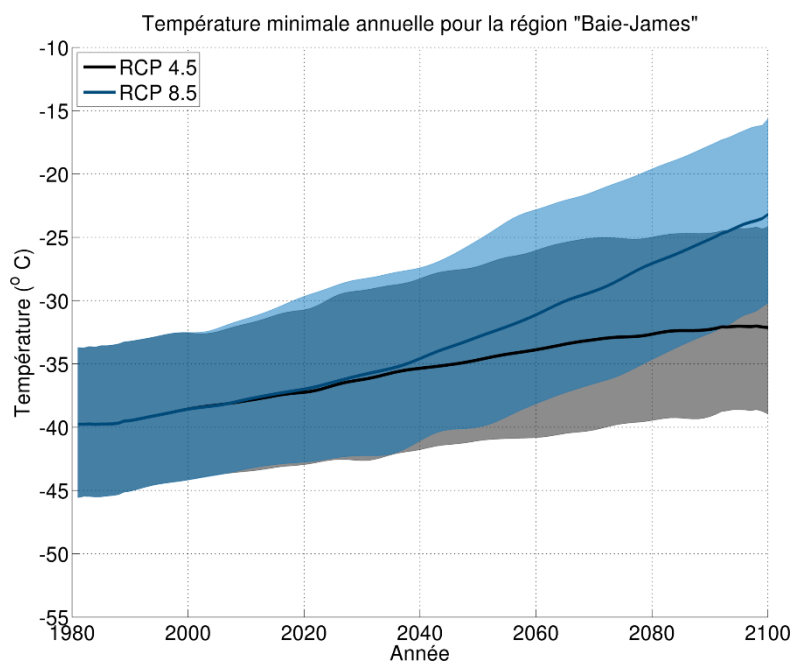


Figure 3.21 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

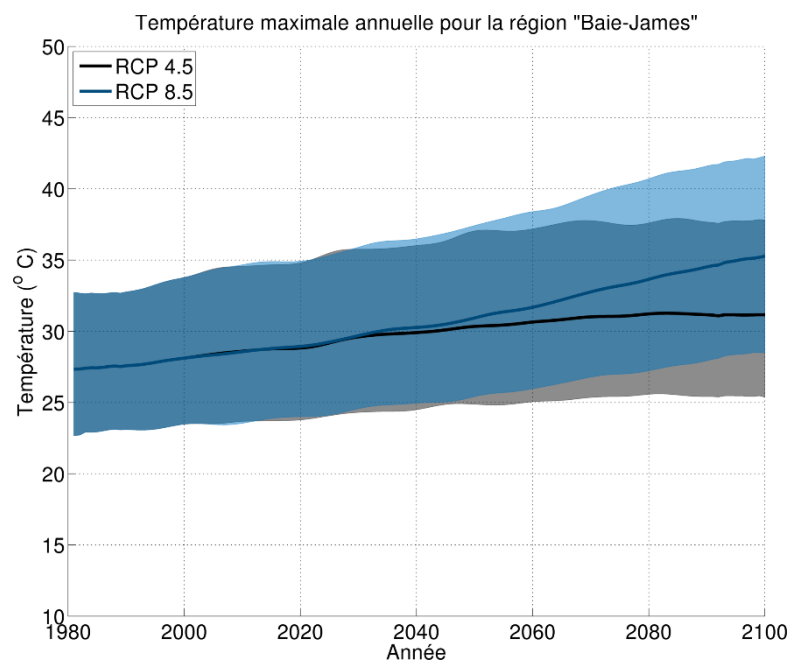


Figure 3.22 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

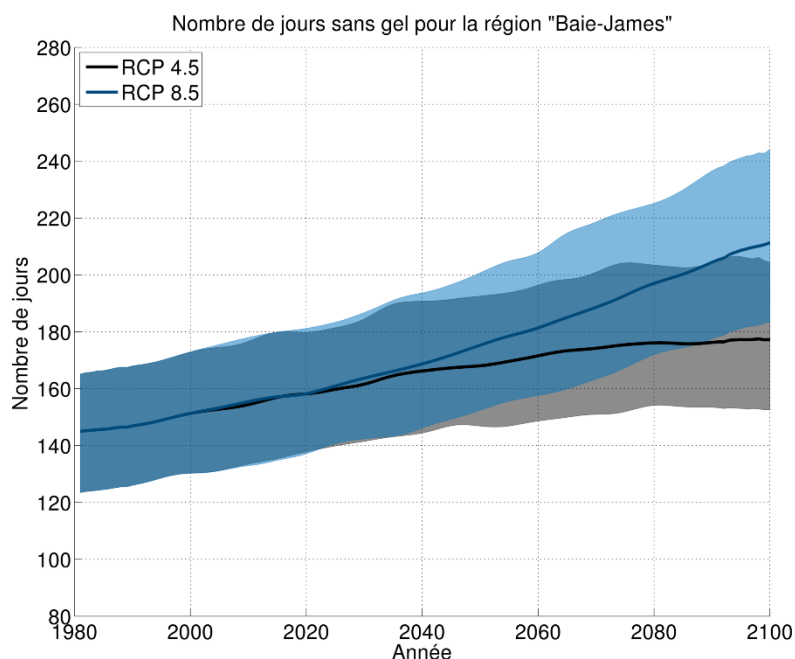


Figure 3.23 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

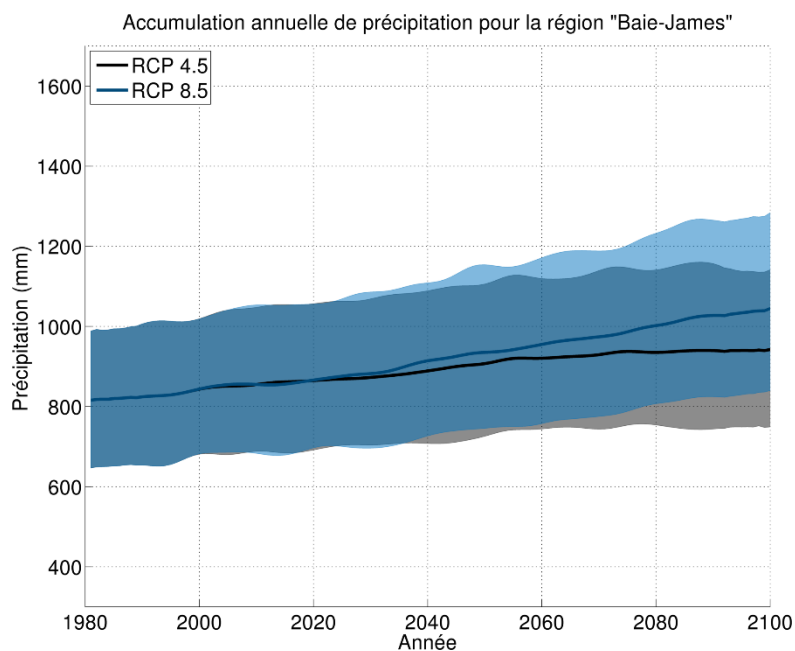


Figure 3.24 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

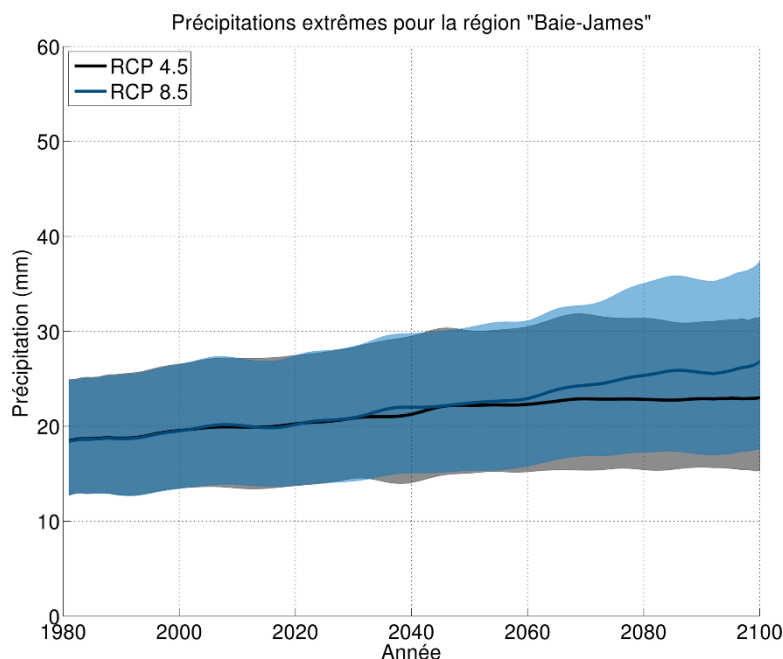


Figure 3.25 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

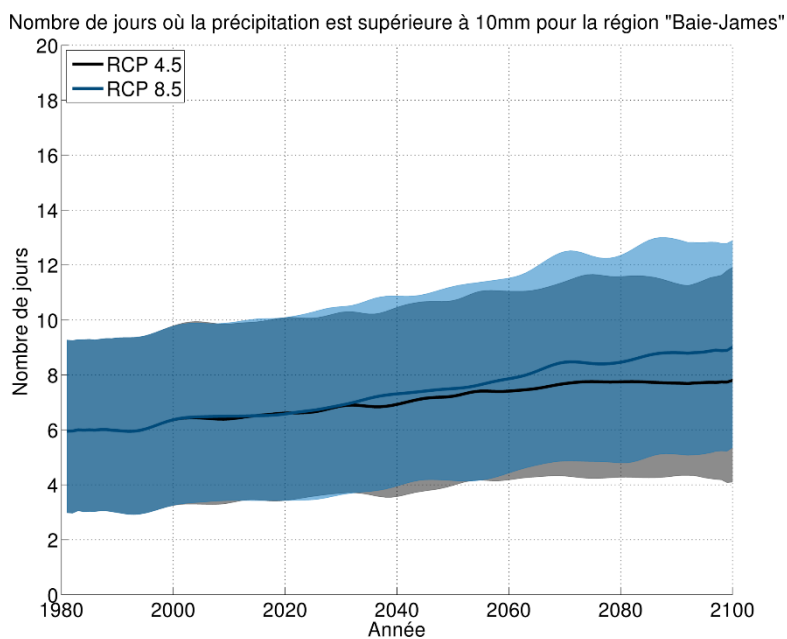


Figure 3.26 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

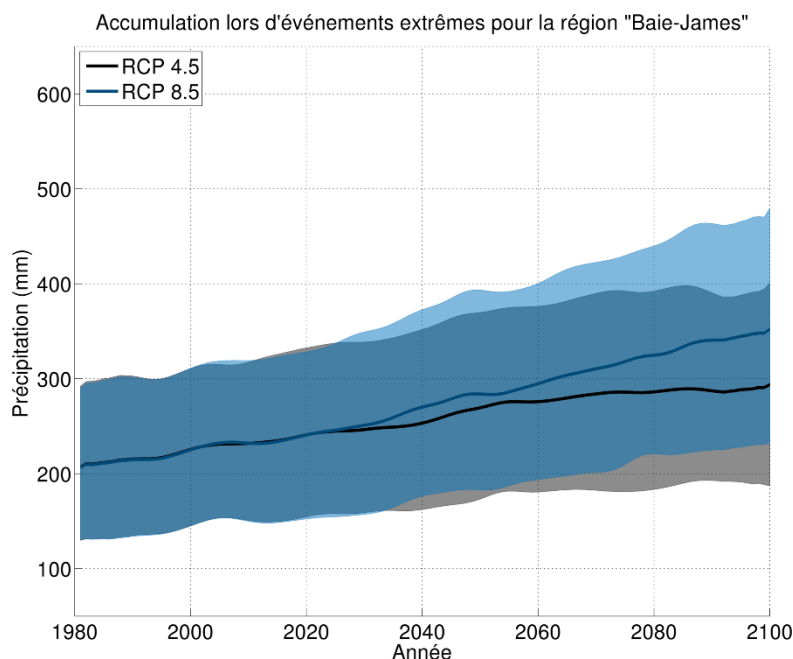


Figure 3.27 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

3.3.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

Tableau 3.2 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Baie James.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.21	2.31	2.92
RCP 8.5	1.34	3.19	5.66

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.9	3.65	4.82
RCP 8.5	2.07	5.15	8.65

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.34	4.75	6.53
RCP 8.5	2.63	7.1	12.96

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.36	2.59	3.25
RCP 8.5	1.51	3.5	6.27

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	11.37	20.9	26.98
RCP 8.5	12.01	29.22	51.61

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.51	9.58	12.64
RCP 8.5	4.97	13.26	21.43

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	6.52	16.13	18.88
RCP 8.5	7.84	19.15	32.9

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	10.38	23.54	30.74
RCP 8.5	12.11	31.76	51.09

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.55	1.19	1.58
RCP 8.5	0.61	1.57	2.49

3.4 CÔTE-NORD

3.4.1 Figures

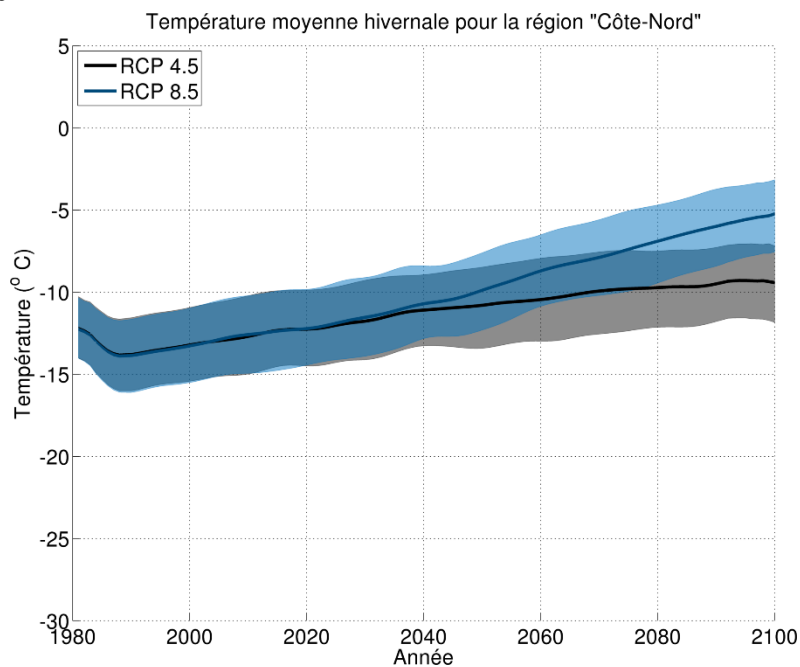


Figure 3.28 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

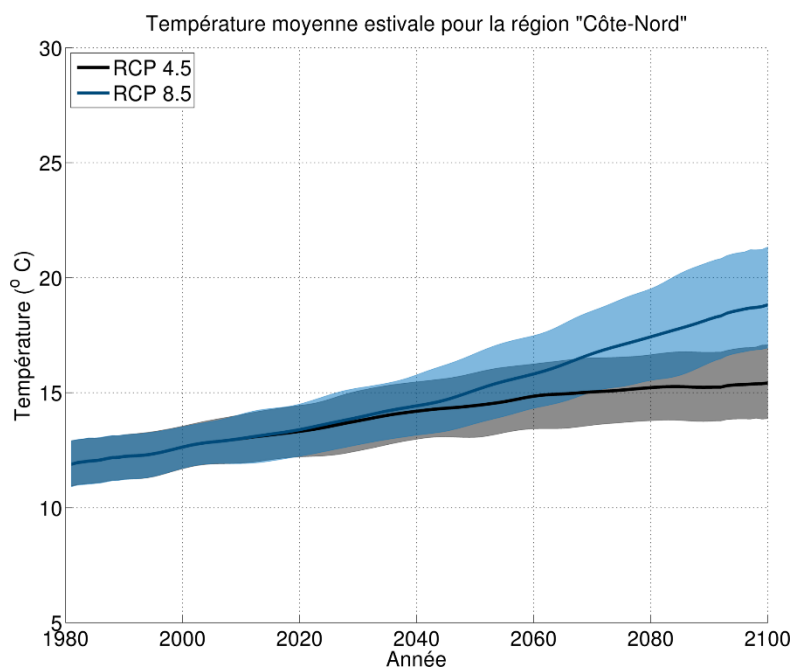


Figure 3.29 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

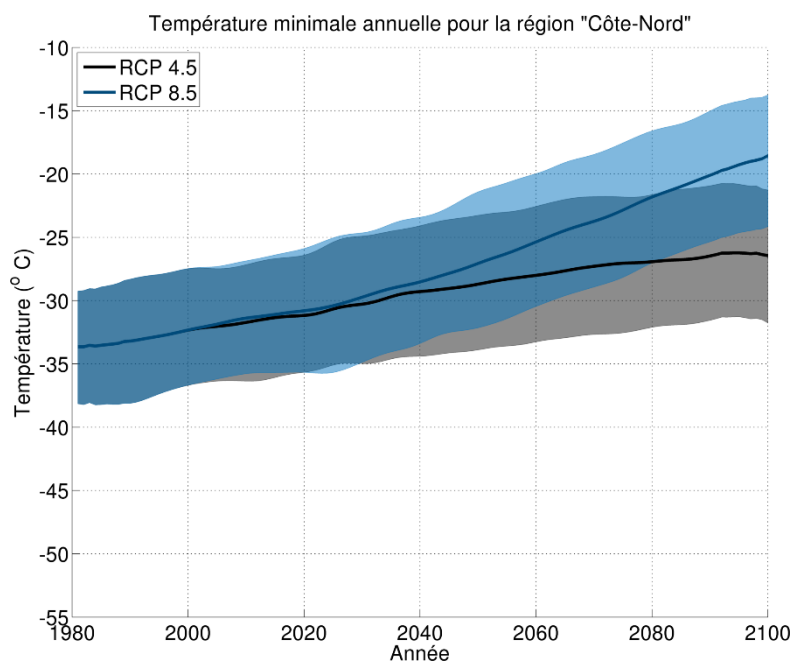


Figure 3.30 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

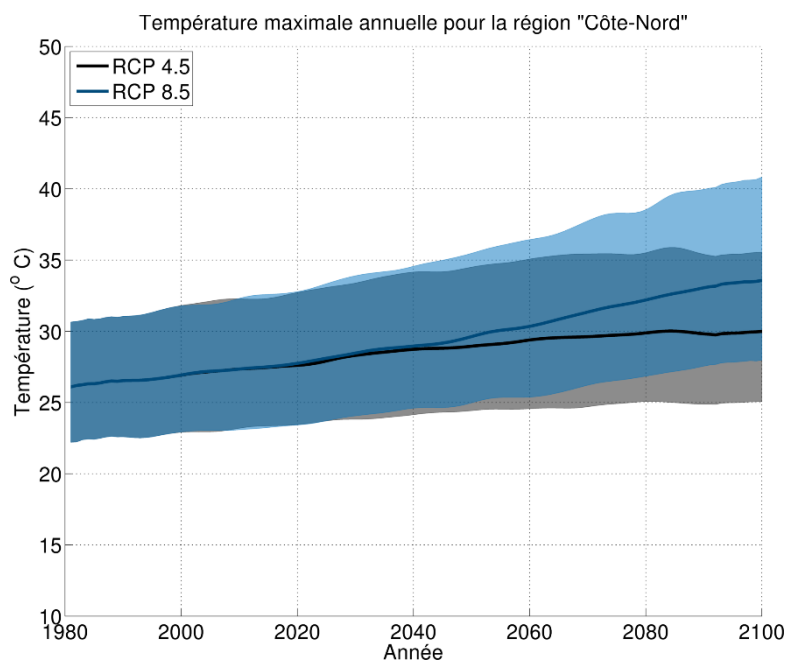


Figure 3.31 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

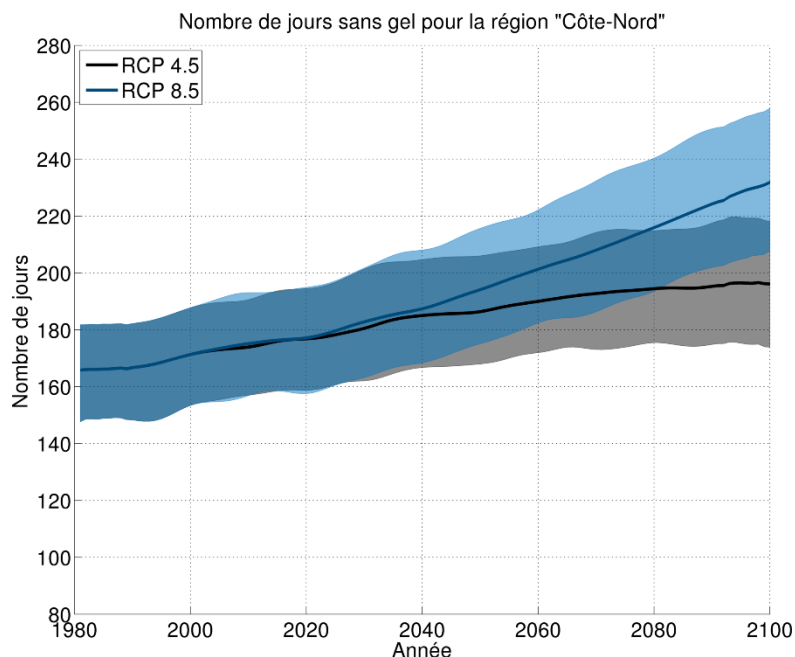


Figure 3.32 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

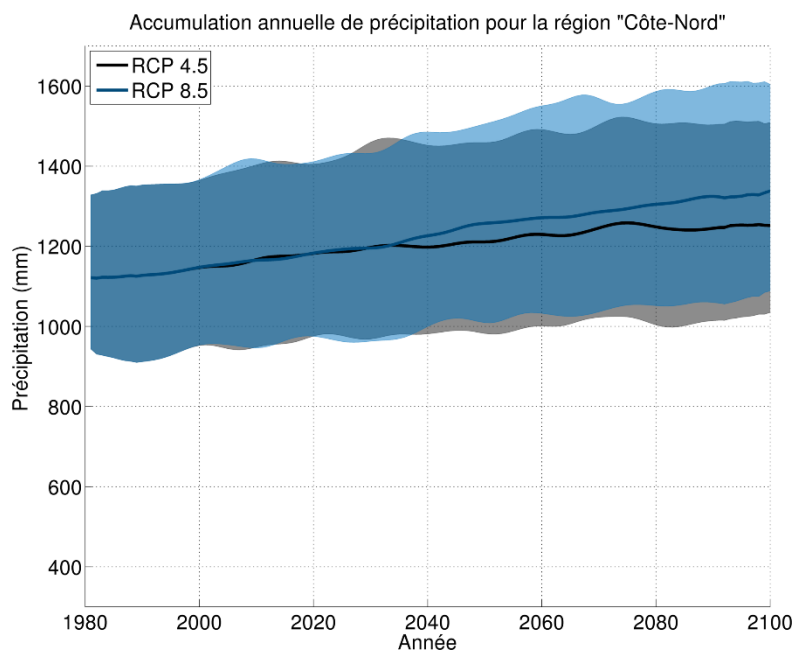


Figure 3.33 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

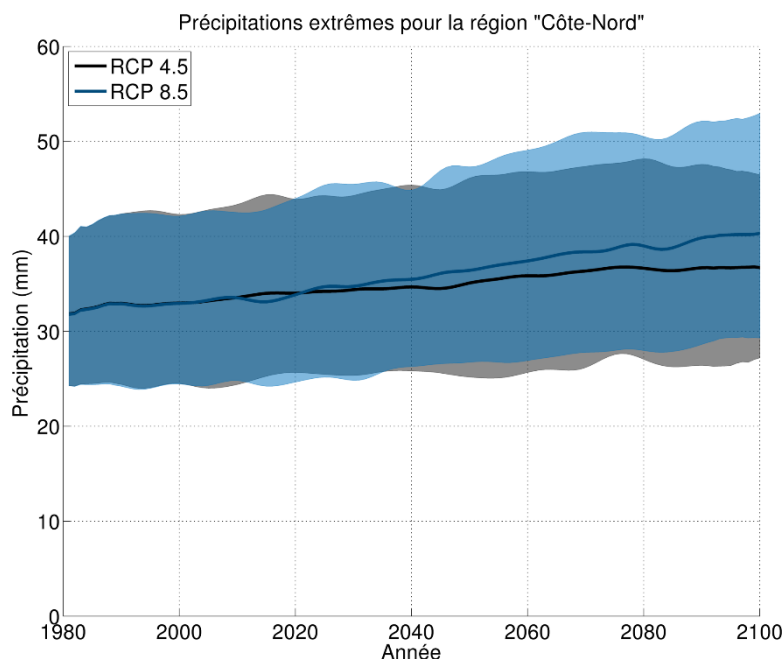


Figure 3.34 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

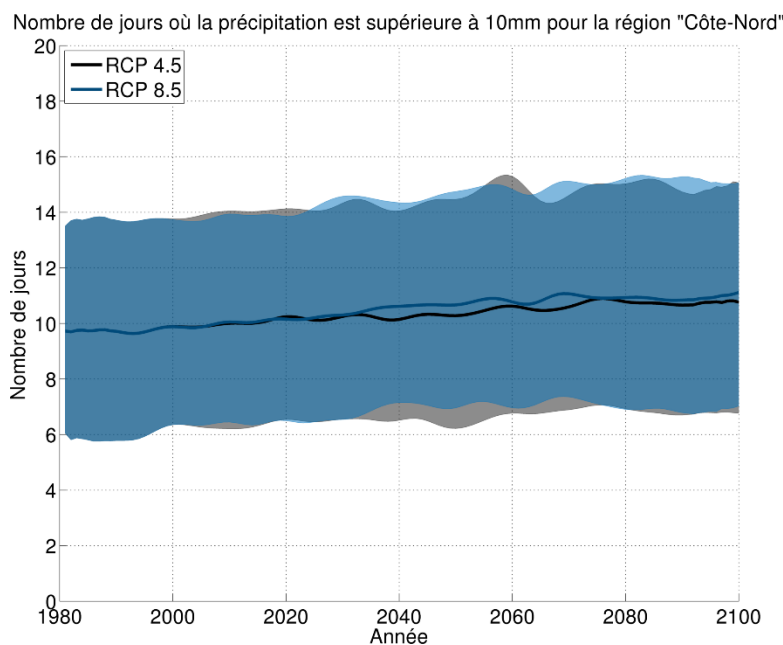


Figure 3.35 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

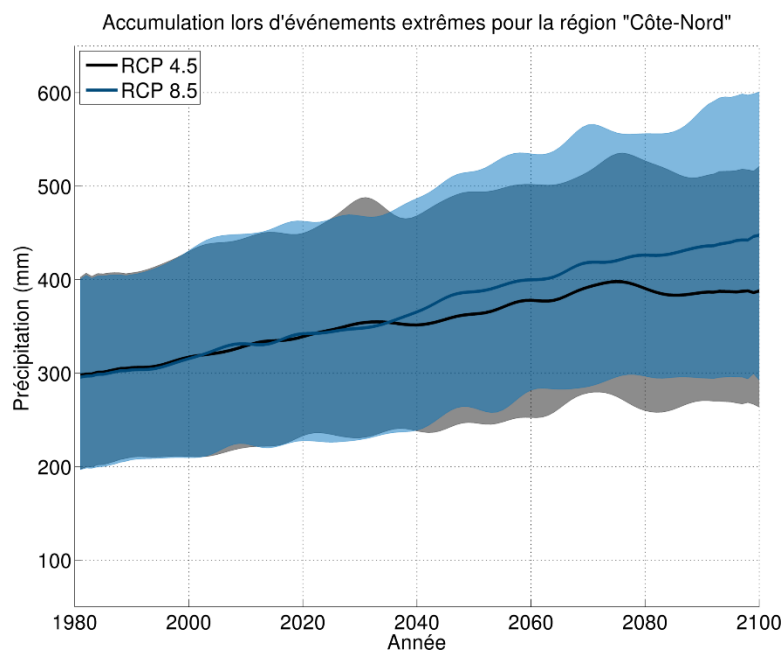


Figure 3.36 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

3.4.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

Tableau 3.3 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Côte Nord.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.15	2.22	2.8
RCP 8.5	1.27	3.07	5.43

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.57	2.9	3.87
RCP 8.5	1.7	4.19	7.06

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.2	4.44	6.05
RCP 8.5	2.55	6.55	11.78

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.25	2.44	3.12
RCP 8.5	1.43	3.32	5.93

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	10.05	19.27	25.59
RCP 8.5	11	28.39	51.18

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.6	7.22	9.94
RCP 8.5	4.65	10.76	15.3

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.16	7.84	11.63
RCP 8.5	4.6	12.9	19.69

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	11.04	19.07	25.24
RCP 8.5	10.8	27	38.43

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.31	0.63	0.95
RCP 8.5	0.44	1	1.11

3.5 FOSSE DU LABRADOR

3.5.1 Figures

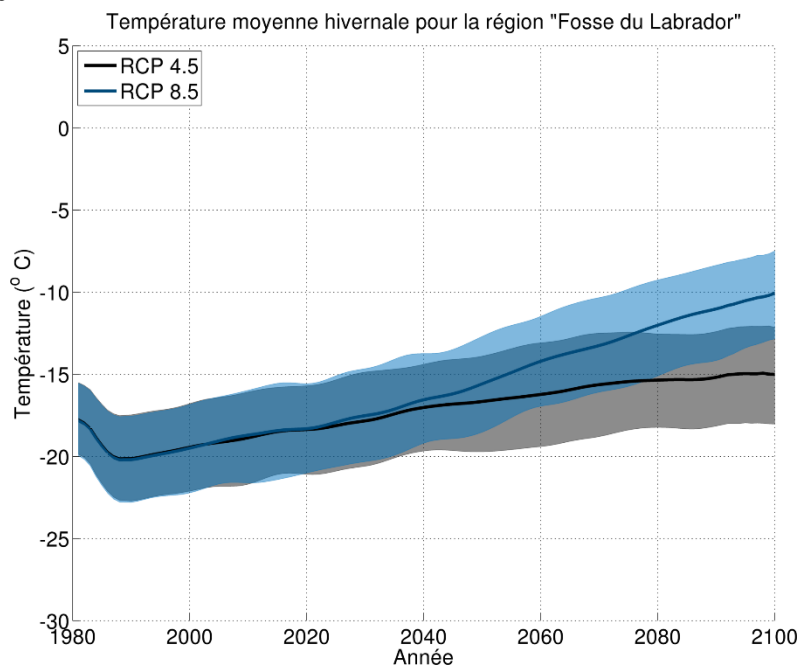


Figure 3.37 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

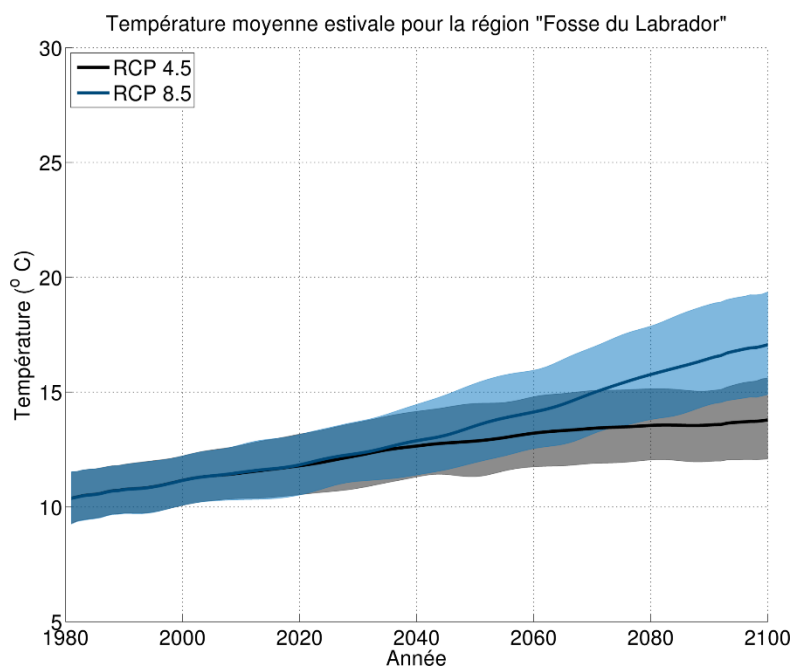


Figure 3.38 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

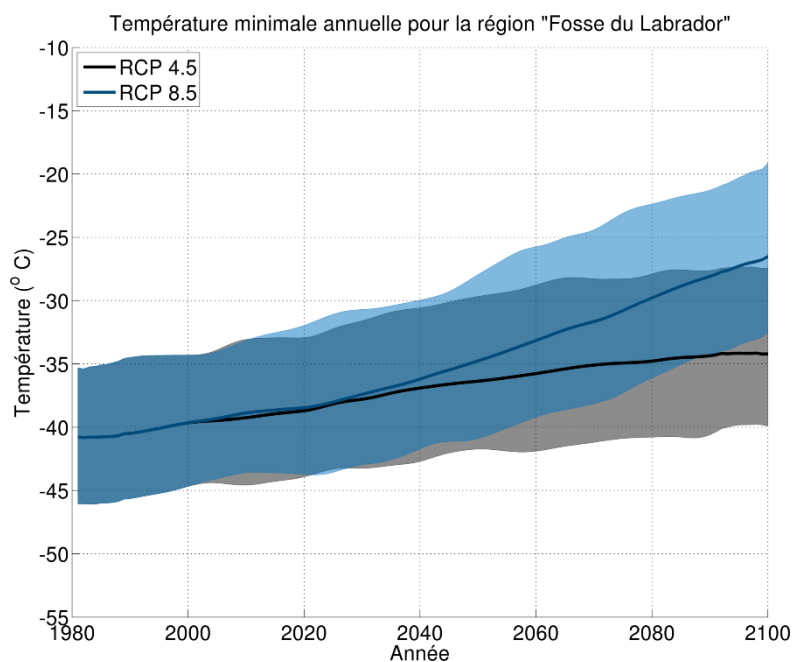


Figure 3.39 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

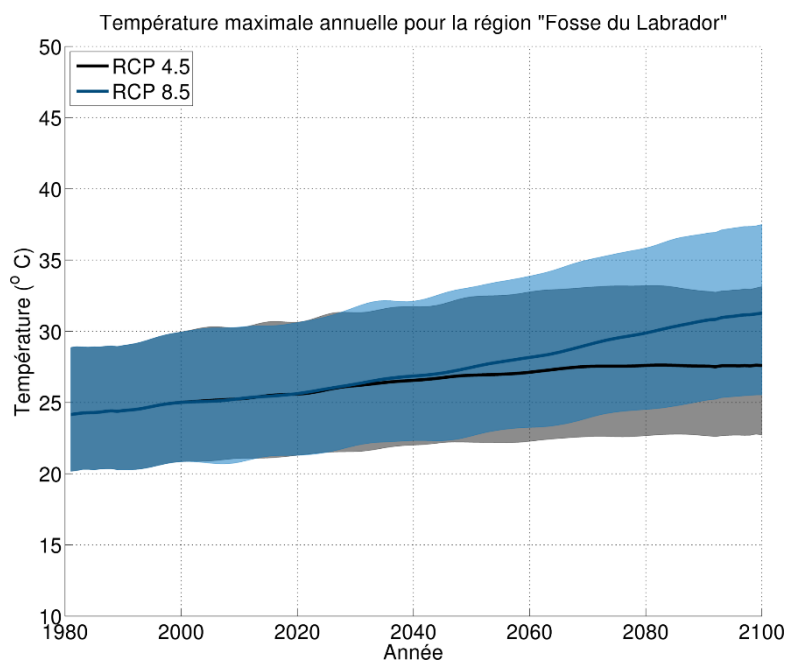


Figure 3.40 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

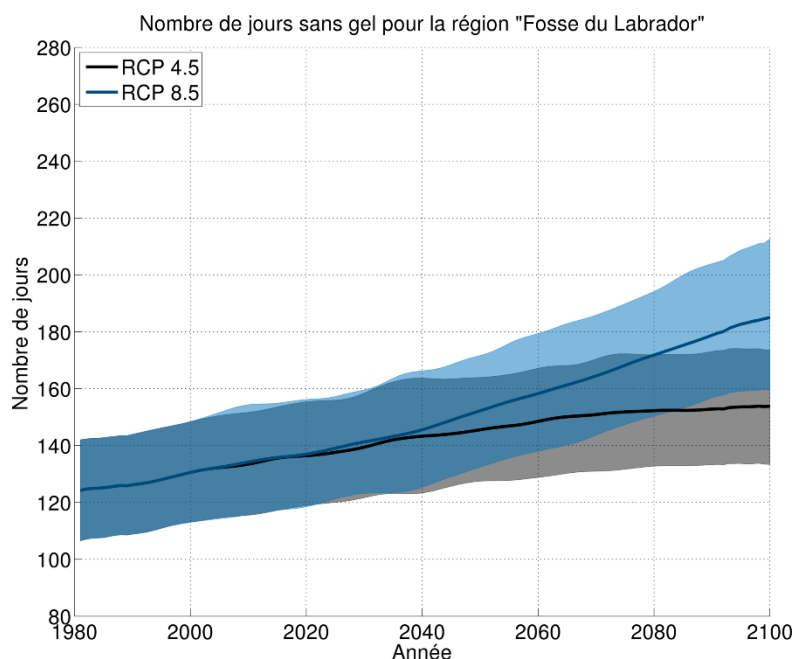


Figure 3.41 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

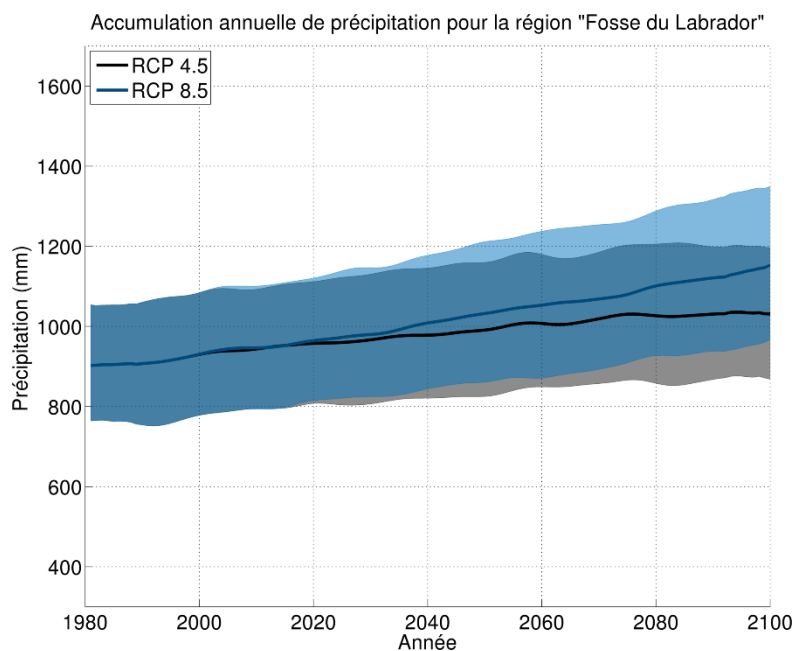


Figure 3.42 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

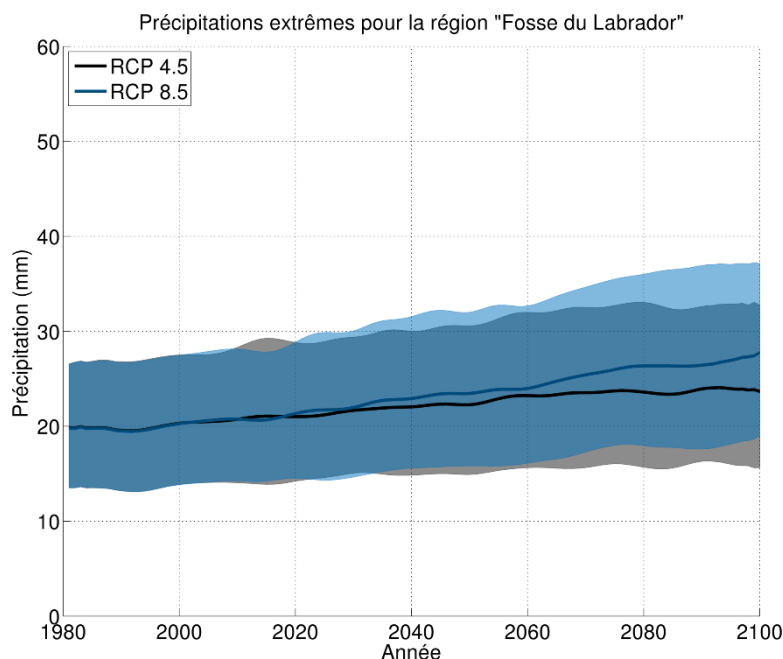


Figure 3.43 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

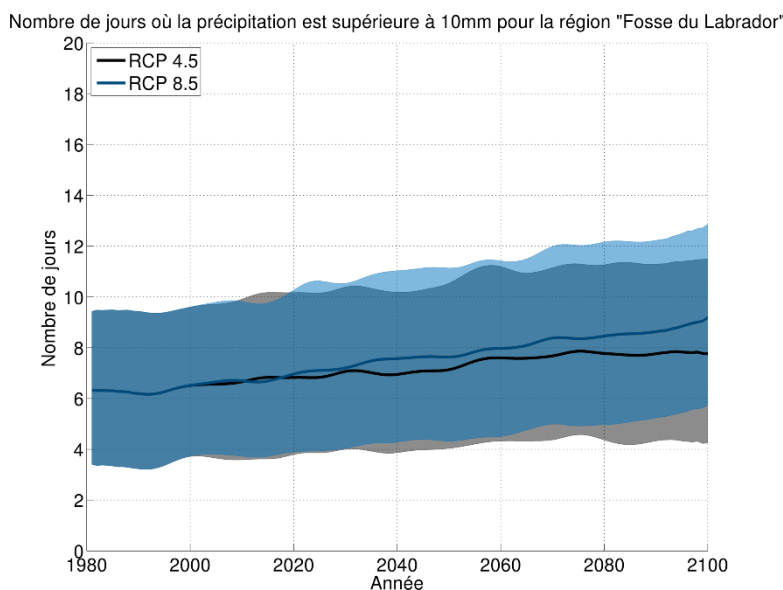


Figure 3.44 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

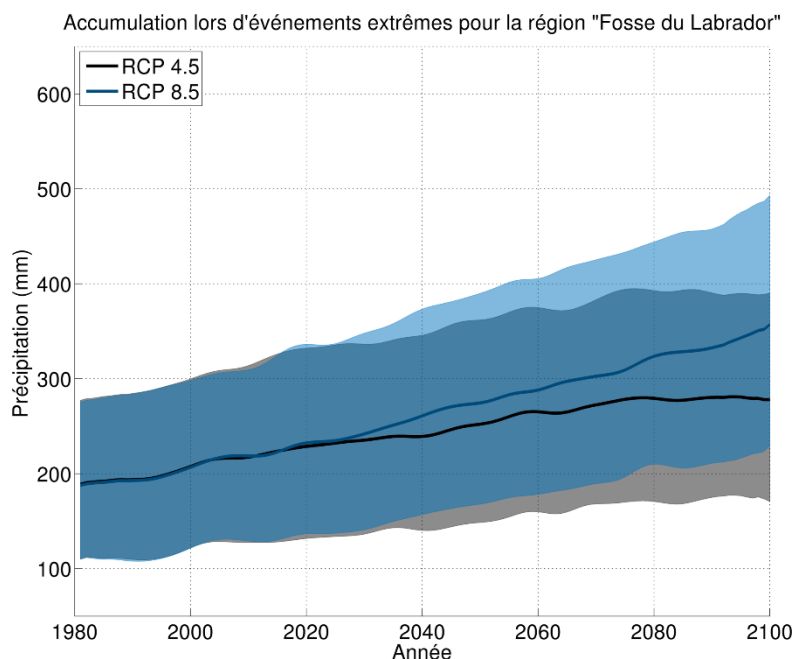


Figure 3.45 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

3.5.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

Tableau 3.4 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de la Fosse du Labrador.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.11	2.11	2.64
RCP 8.5	1.19	2.91	5.21

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.76	3.38	4.5
RCP 8.5	1.97	4.89	8.28

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.94	4.07	5.52
RCP 8.5	2.21	6.15	11.14

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.2	2.31	2.84
RCP 8.5	1.33	3.13	5.64

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	9.99	18.59	24.13
RCP 8.5	10.79	26.81	47.17

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.77	8.57	11.93
RCP 8.5	5.64	13.13	20.7

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	6.41	13.91	18.13
RCP 8.5	8.02	19.63	32.07

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	14.85	27.9	37.97
RCP 8.5	17.36	40.76	63.2

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.51	0.99	1.4
RCP 8.5	0.66	1.46	2.2

3.6 GRAND NORD

3.6.1 Figures

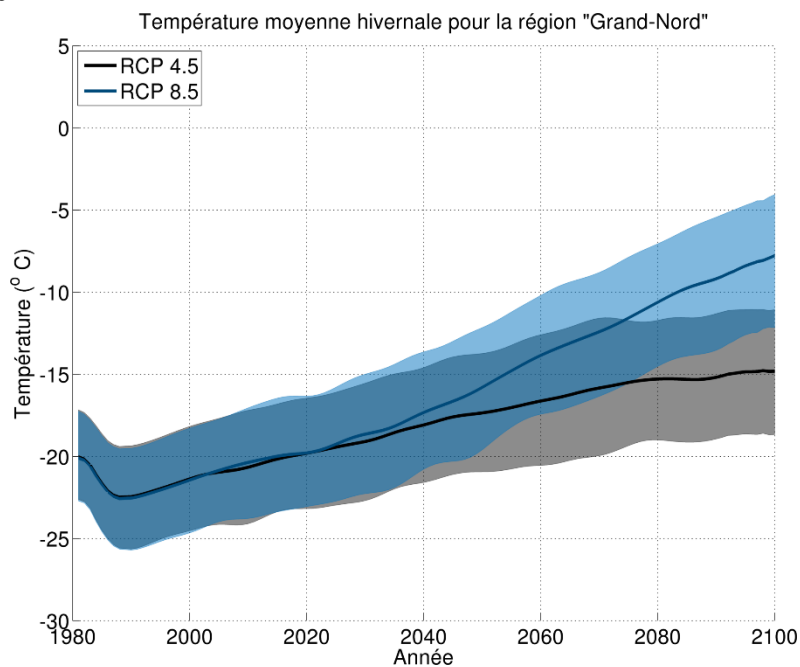


Figure 3.46 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

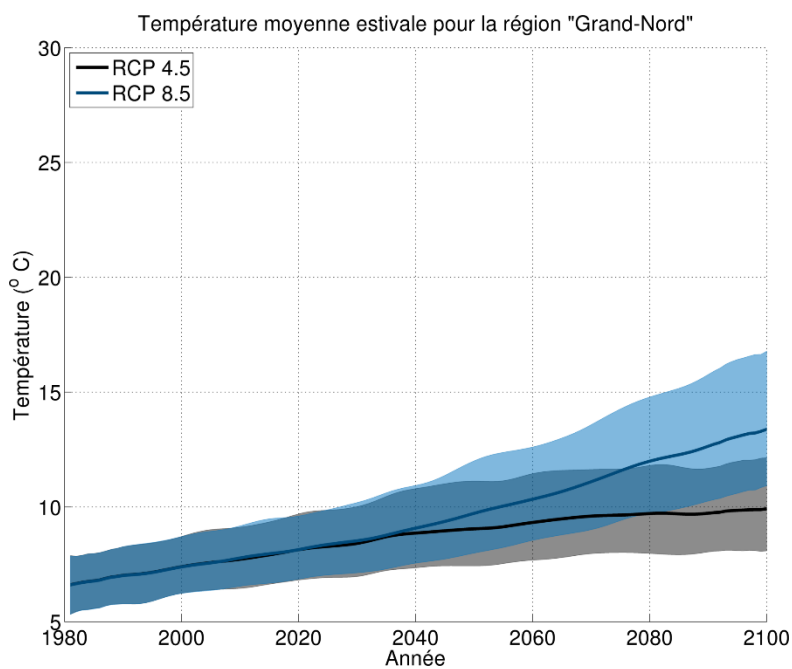


Figure 3.47 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

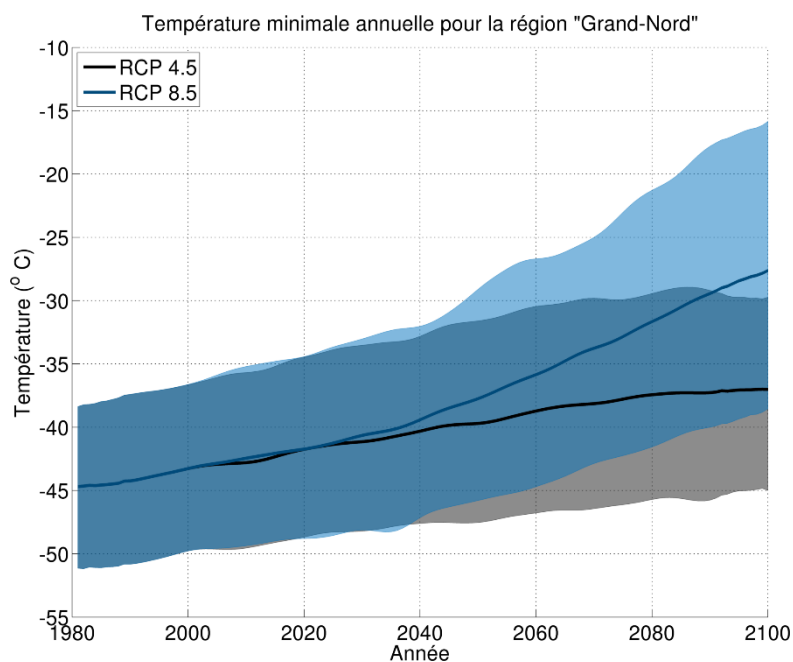


Figure 3.48 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

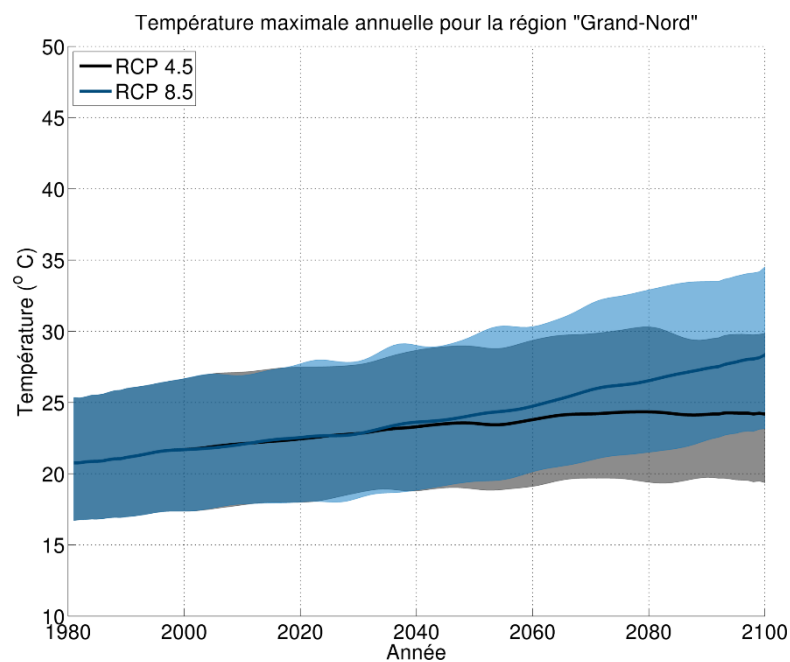


Figure 3.49 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

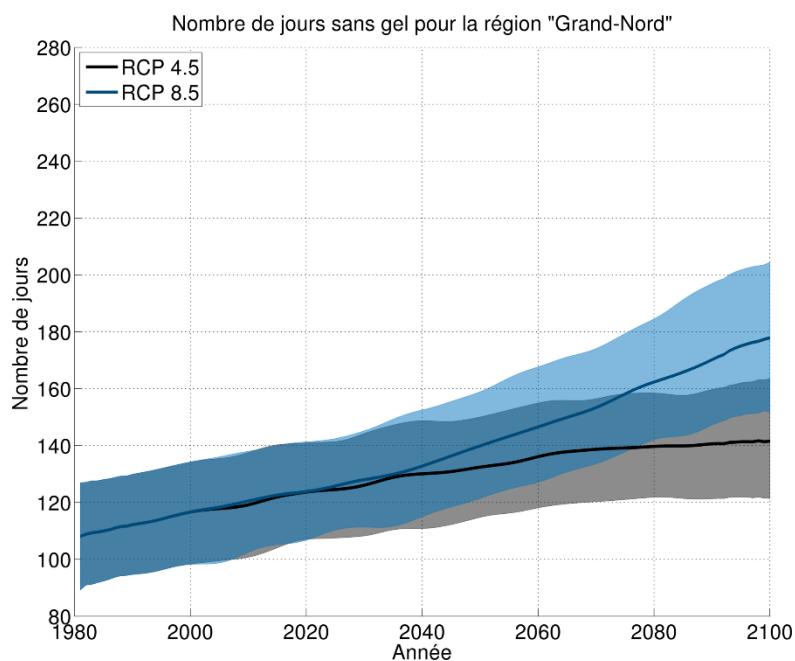


Figure 3.50 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

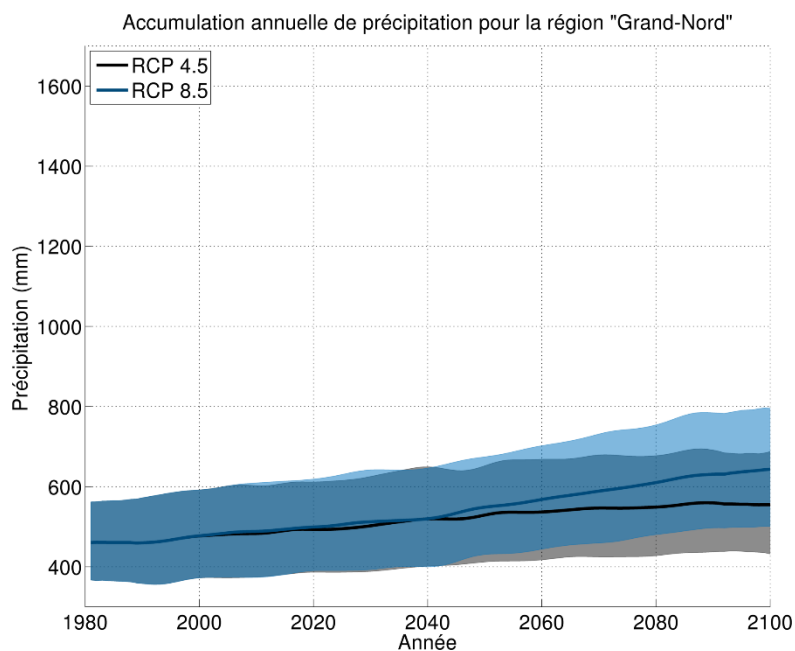


Figure 3.51 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

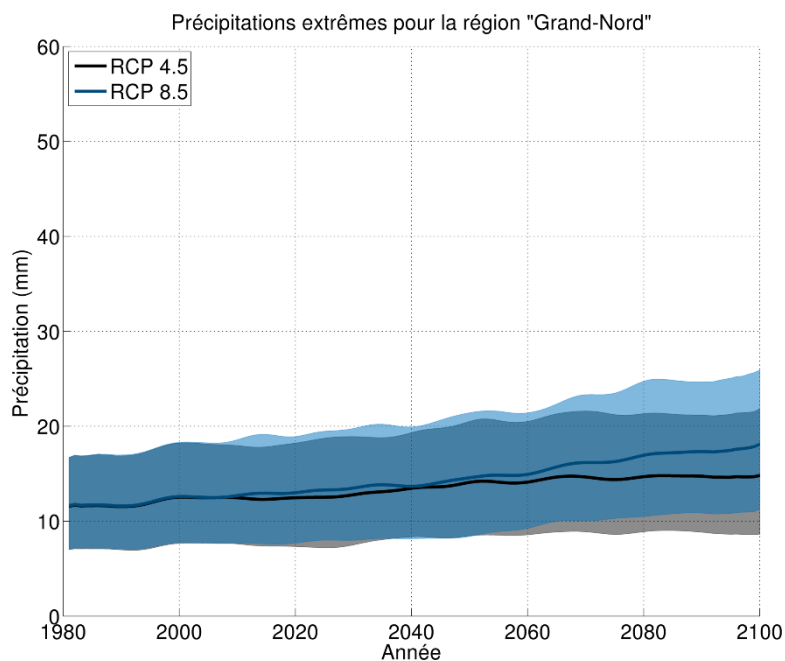


Figure 3.52 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

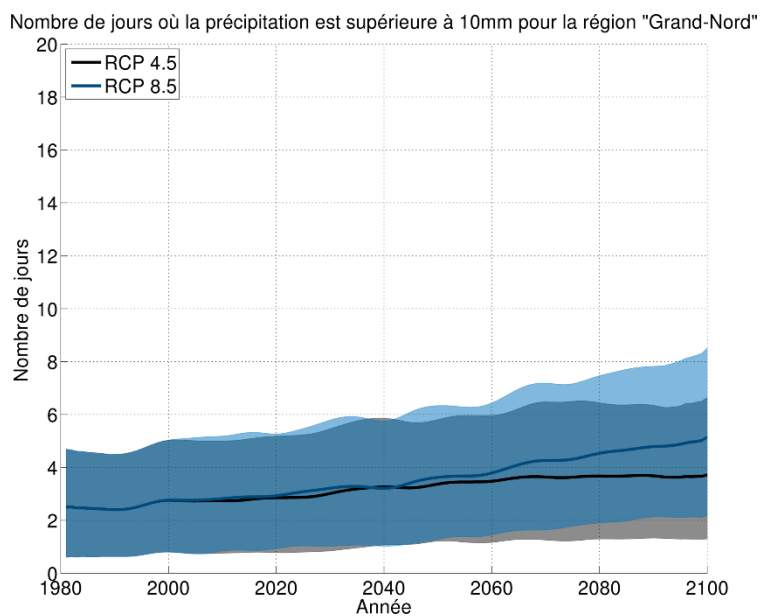


Figure 3.53 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

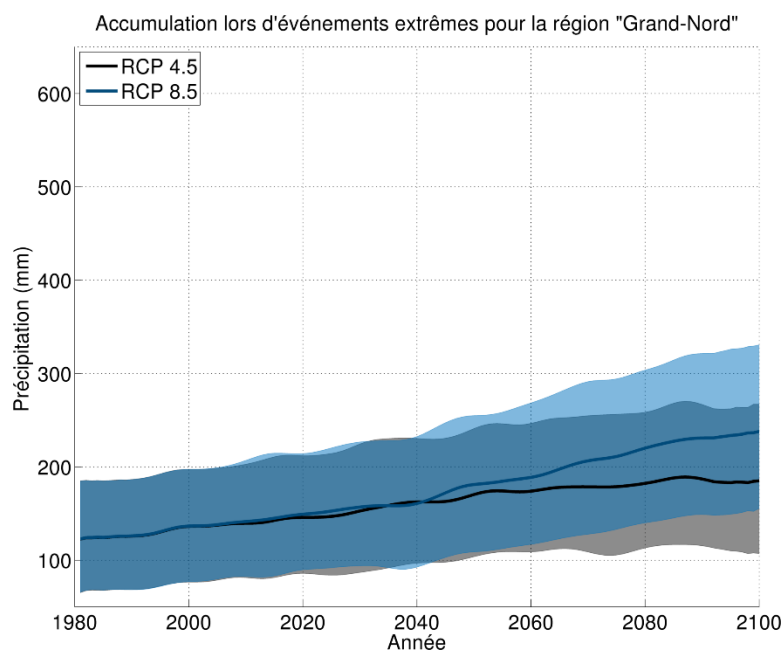


Figure 3.54 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

3.6.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

Tableau 3.5 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région du Grand Nord.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.12	2.02	2.55
RCP 8.5	1.19	2.87	5.18

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.53	4.96	6.66
RCP 8.5	2.81	7.12	12.06

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.27	4.61	6.36
RCP 8.5	2.56	7.13	13.23

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.24	2.29	2.8
RCP 8.5	1.35	3.08	5.67

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	11.24	20.31	26.18
RCP 8.5	11.9	29.12	52.57

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	6.29	13.32	17.67
RCP 8.5	7.34	18.48	31.85

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	4.83	17.18	21.44
RCP 8.5	10.57	23.42	41.57

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	13.92	30.42	39.7
RCP 8.5	15.66	41.12	71.12

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.36	0.84	1.06
RCP 8.5	0.49	1.15	2.06

3.7 MATAGAMI - CHIBOUGAMAU

3.7.1 Figures

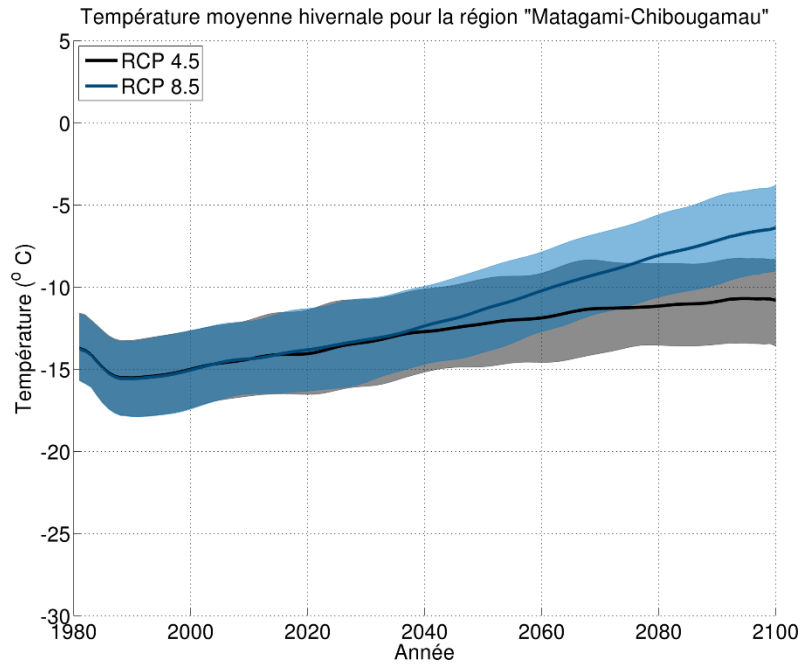


Figure 3.55 Évolution temporelle de la température moyenne hivernale (décembre, janvier et février). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

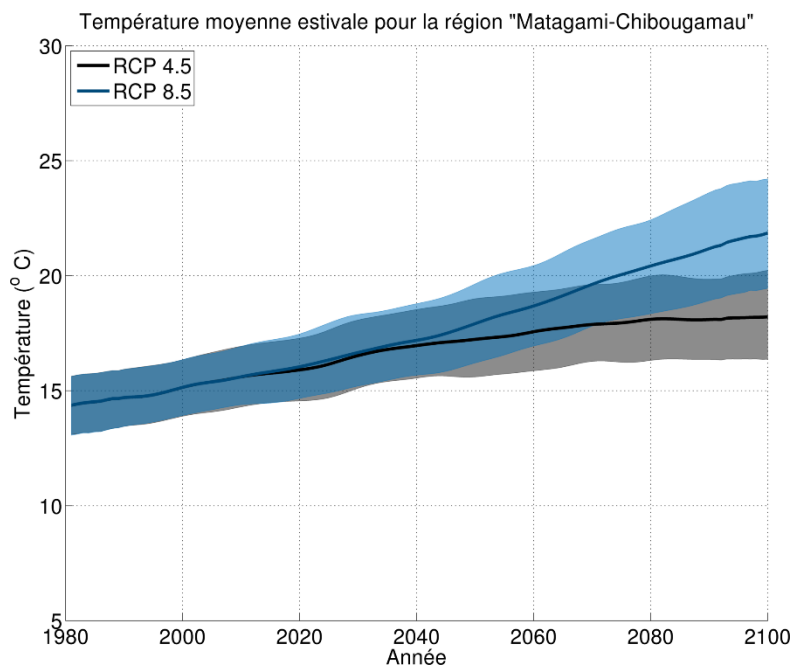


Figure 3.56 Évolution temporelle de la température moyenne estivale (juin, juillet et août). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

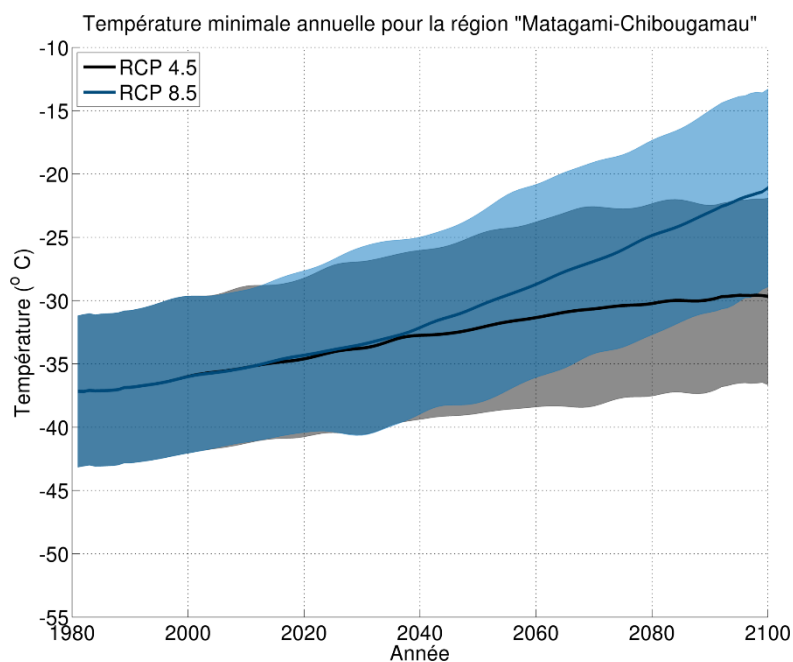


Figure 3.57 Évolution temporelle de la température minimale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

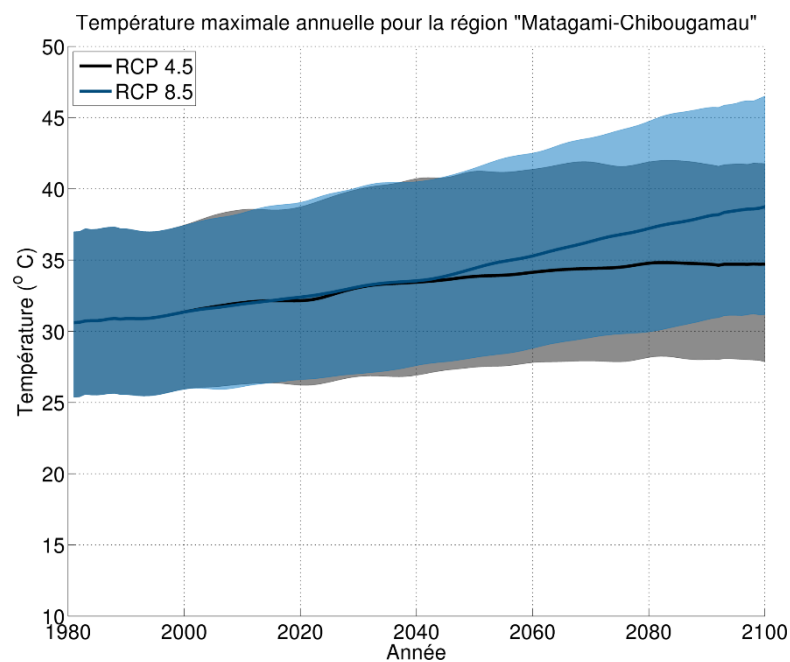


Figure 3.58 Évolution temporelle de la température maximale annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

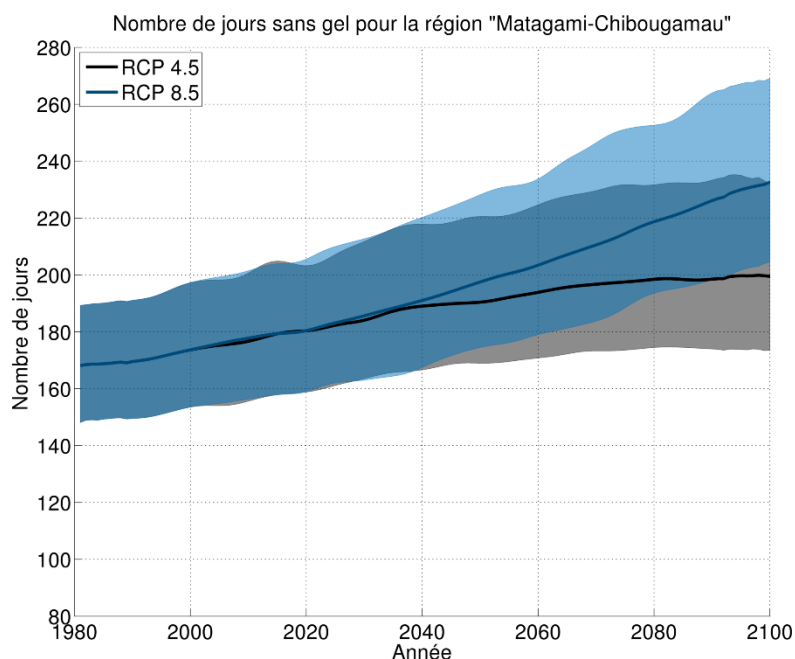


Figure 3.59 Évolution temporelle du nombre de jours sans gel ($T_{min} > 0$ Celsius). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

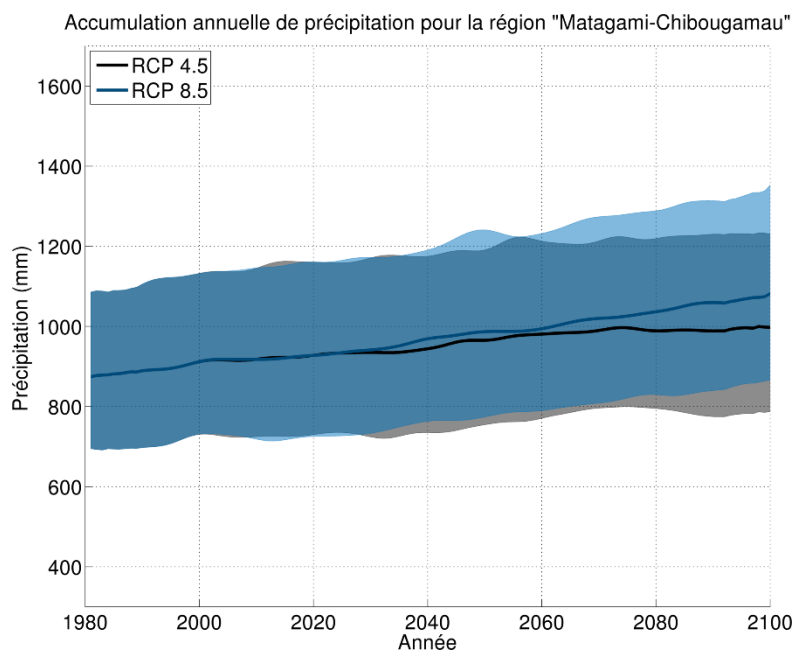


Figure 3.60 Évolution temporelle de l'accumulation annuelle de précipitation. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

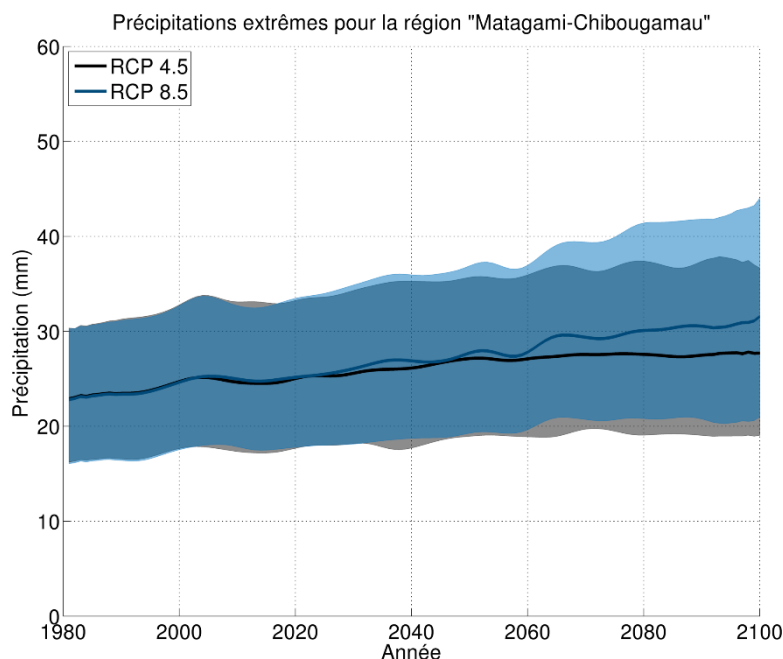


Figure 3.61 Évolution temporelle du 99^e centile de précipitation annuelle. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

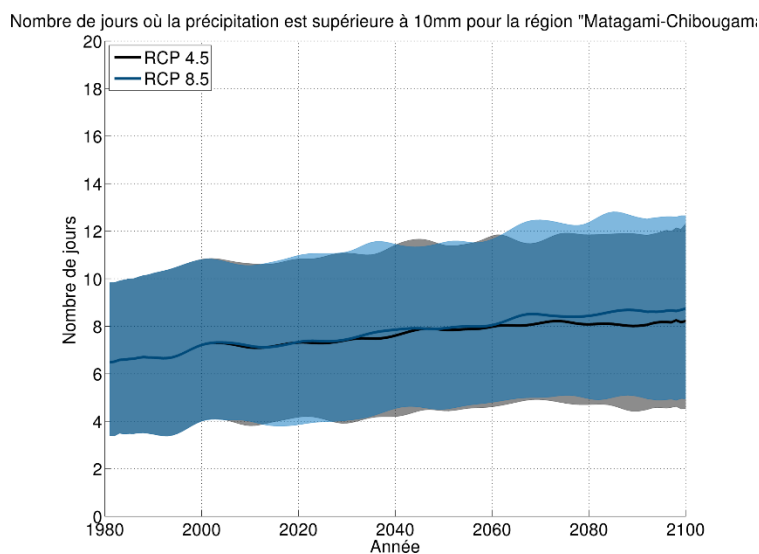


Figure 3.62 Évolution temporelle du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm. Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

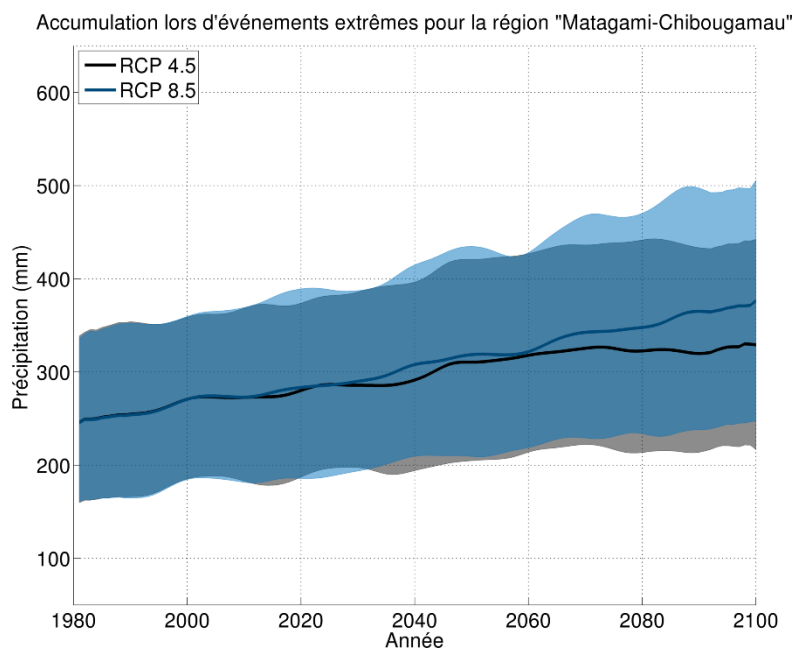


Figure 3.63 Évolution temporelle de l'accumulation lors d'événements de précipitation extrêmes (définie par le 90^e centile saisonnier). Les lignes pleines représentent la moyenne des simulations pour chacun des scénarios radiatifs. L'enveloppe représente l'incertitude (définie par le 10^e et 90^e centile) autour de cette moyenne.

3.7.2 Tableaux

Les tableaux suivants montrent les augmentations projetées par rapport à la climatologie 1981-2010 pour tous les horizons temporels et tous les indicateurs climatiques.

Tableau 3.6 Augmentation relative des indicateurs climatiques pour les trois horizons temporels et pour les deux scénarios RCP pour la région de Matagami-Chibougamau.

JJATemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.32	2.49	3.14
RCP 8.5	1.45	3.42	5.92

DJFTemp (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.66	3.23	4.22
RCP 8.5	1.76	4.48	7.62

AnnTasmin (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	2.37	4.66	6.35
RCP 8.5	2.57	6.93	12.54

AnnTasmax (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	1.5	2.81	3.49
RCP 8.5	1.6	3.74	6.52

FFD (Days)	2020	2050	2080
RCP 4.5	11.24	20.74	26.69
RCP 8.5	11.52	28.76	50.57

AnnPrec (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	3.76	8.24	10.67
RCP 8.5	4.18	10.5	16.64

P99 (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	5.1	12.68	14.58
RCP 8.5	7.13	16.49	25.7

AccPrecExt (%)	2020	2050	2080
RCP 4.5	7.81	19.63	24.13
RCP 8.5	9.88	23.38	36.34

NbDaysFr10mm (Celsius)	2020	2050	2080
RCP 4.5	0.43	1.03	1.23
RCP 8.5	0.49	1.18	1.63

4 RÉSULTATS QUALITATIFS

Les résultats suivants sont présentés de manière qualitative. La catégorie « consensus » renvoie au nombre relatif de simulations qui indique la même direction de changement. Par exemple, si 50% des simulations indiquent une augmentation et 50% des simulations indiquent une diminution, nous aurions un très faible consensus. La catégorie « confiance » renvoie directement à la dispersion des simulations. Par exemple, si les simulations ont très peu de dispersion (i.e. des augmentations et diminutions faible, ou toutes les simulations indiquent une amplitude similaire d'augmentation/diminution), la confiance en ces résultats serait élevée.

4.1 PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Tableau 4.1 Changement projeté pour les événements d'une période de retour de 20 ans pour la période 2080

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	15-17,5 ans	Élevé	Faible
Baie James	15-17,5	Élevé	Faible
Côte Nord	12,5-15	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	12,5-15	Élevé	Faible
Grand Nord	15-17,5	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	12,5-17,5	Élevé	Faible

Ces résultats indiquent qu'un événement qui revenait typiquement une fois tous les 20 ans devrait revenir de manière plus fréquente.

4.2 PÉRIODE DE FONTE

Tableau 4.2 Période de fonte de la neige pour la période 2080

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	Plus tôt	Élevé	Faible
Baie James	Plus tôt	Élevé	Faible
Côte Nord	Plus tôt	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	Plus tôt	Élevé	Faible
Grand Nord	Plus tôt	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	Plus tôt	Élevé	Faible

Typiquement, la fonte de la neige devrait survenir environ 1 mois plus tôt que durant la période historique 1971-2000.

4.3 ACCUMULATION MAXIMALE

Tableau 4.3 Accumulation maximale pour la période 2080

Région	Changement projeté	Consensus	Confiance
Abitibi	Baisse	Élevé	Faible
Baie James	Baisse	Élevé	Faible
Côte Nord	Baisse	Élevé	Faible
Fosse du Labrador	Légère baisse	Élevé	Faible
Grand Nord	Baisse	Élevé	Faible
Matagami - Chibougamau	Baisse	Élevé	Faible

La baisse devrait être plus importante dans les régions du « sud » (Abitibi, Matagami-Chibougamau, Côte-Nord) que dans les régions plus au nord (Baie-James, Grand Nord et Fosse du Labrador).

5 NIVEAU DU ST-LAURENT DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Une problématique importante pour le secteur minier demeure le transport du minerai par voie maritime. Dans un contexte de changements climatiques où le régime de précipitation est amené à changer tout comme une modification de l'intensité de l'évaporation causée par une augmentation de la température, il s'avère important d'estimer si le niveau du Saint-Laurent est amené à changer. Or, la littérature à ce sujet est peu disponible. D'un point de vue historique, il apparaît pertinent de noter que : « *De manière générale, l'hydraulicité du fleuve depuis la fin des années 1990 est plus faible sans pour autant atteindre les valeurs minimales observées durant les années 1960 et 1930.* » (Source : [Fiche Environnement Canada](#)).

La plupart des résultats dans la littérature scientifique se penchent sur les niveaux d'eau sur la région des Grand Lacs et non pas directement sur le St-Laurent. La problématique du Saint-Laurent est connectée aux Grands Lacs, mais aussi à la rivière des Outaouais. Par ailleurs, l'hydraulicité du Saint-Laurent reflète les impacts de la régularisation des apports hydrologiques et des autres interventions humaines, ce qui ajoute une couche de complexité dans l'analyse des résultats historiques, mais aussi les projections climatiques (par ex. : est-ce que l'influence de la régularisation des Grands Lacs a un effet plus ou moins important que ceux induits par les changements climatiques?).

Un impact significatif pour le niveau d'eau du Saint-Laurent est probablement le « Plan 2014 » adopté par la Commission Mixte Internationale (CMI). Ce plan est conçu pour :

« [...] rapprocher les niveaux du lac Ontario et du Saint-Laurent de leurs valeurs naturelles, ce qui permettra de rétablir la santé des écosystèmes. Il continuera de réduire les fluctuations vers les niveaux extrêmement hauts ou extrêmement bas, il maintiendra de meilleurs niveaux pour la navigation dans l'ensemble du système, il allongera souvent la saison de la navigation de plaisance et permettra une légère augmentation de la production hydroélectrique. »

Malgré la régulation des niveaux d'eau, il demeure tout de même pertinent d'estimer l'impact des changements climatiques sur les niveaux d'eau. Une étude récente montre que les minimums annuels dans le bassin des Grand Lacs seraient plus importants, tandis que les niveaux maximums annuels devraient rester similaire à la période historique 1971-1999 (Music et al. 2015).

Environnement Canada souligne que le niveau des Grands Lacs risque de diminuer sous l'augmentation de l'évaporation causée par une augmentation des températures. Cette diminution serait soit amplifiée ou diminuée selon le régime de précipitations futures. Selon leurs recommandations : « *il semble raisonnable de s'attendre à une baisse des apports en eau au fleuve.* » (Source : [Fiche Environnement Canada](#)). Par ailleurs, le rapport indique « *qu'il est extrêmement difficile de prévoir l'hydraulicité du fleuve dans quelques décennies. La variation temporelle des débits — et des niveaux associés — laisse entrevoir une remontée des débits, mais les scénarios de changements climatiques indiquent, dans presque tous les cas, une baisse du débit sortant des Grands Lacs au cours du prochain siècle.* »

Par ailleurs, une étude suggère plutôt que le niveau des Grand Lacs seraient appelé à augmenter dans les prochaines décennies (MacKay & Seglenieks 2013).

Dans une perspective de recherche scientifique, les conclusions les plus récentes suggèrent donc une incertitude encore élevée et un consensus qui demeure relativement faible. Étant donné la

vulnérabilité du secteur minier à une baisse du niveau d'eau du Saint-Laurent, il serait probablement aviser de tester la vulnérabilité de l'infrastructure minière actuelle à une légère baisse du niveau d'eau du St-Laurent.

Références

- Cubasch, U. et al., 2013. Introduction. In T. F. Stocker et al., eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 119–158.
- Hutchinson, M.F. et al., 2009. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4), pp.725–741. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/2008JAMC1979.1>.
- MacKay, M. & Seglenieks, F., 2013. On the simulation of Laurentian Great Lakes water levels under projections of global climate change. *Climatic Change*, 117(1-2), pp.55–67. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0560-z>.
- Moss, R.H. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), pp.747–756. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nature08823>.
- Music, B. et al., 2015. Present and future Laurentian Great Lakes hydroclimatic conditions as simulated by regional climate models with an emphasis on Lake Michigan-Huron. *Climatic Change*, 130(4), pp.603–618. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1348-8>.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A., 2011. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), pp.485–498. Available at: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.

Annexe A

6 DESCRIPTION DES FICHIERS EXCEL

6.1 DONNÉES

Les valeurs fournies dans les fichiers représentent les « deltas ». Cela représente l'augmentation projetée pour différents horizons et différentes variables.

Mean : moyenne des simulations

P10 : 10^e centile des simulations

P90 : 90^e centile des simulations

Nous avons utilisé deux scénarios RCP, le RCP 4.5 et le RCP 8.5. Nous avons calculé les indicateurs climatiques à partir de 42 simulations par scénarios RCP.

6.2 DÉFINITION DES INDICATEURS

- JJATemp : Température moyenne estivale pour juin, juillet et août
- DJFTemp : Température moyenne hivernale pour décembre, janvier et février
- AnnTasmin : Température minimale annuelle
- AnnTasmax : Température maximale annuelle
- FFD : « Frost-free days ». Le nombre de jours par année où la température minimale est supérieure à 0 Celsius
- AnnPrec : Accumulation de la précipitation durant l'année
- P99 : Le 99^e centile de la précipitation annuelle (précipitation intense)
- AccPrecExt : Pourcentage de l'accumulation lors d'événement extrême. Sommation des accumulations supérieure au 95^e centile historique (1981-2010). Voir l'indice R95pTOT sur le site web [ETCCDI](#) :
 - R95pTOT. Annual total PRCP when RR > 95p. Let RR_{wj} be the daily precipitation amount on a wet day w ($RR \geq 1.0\text{mm}$) in period i and let RR_{wn95} be the 95th percentile of precipitation on wet days in the 1981-2010 period. If W represents the number of wet days in the period, then:
 - $R95_{pj} = \sum_{w=1}^W RR_{wj}$ où $RR_{wj} > RR_{wn95}$
- NbDaysFr10mm : Nombre de jours durant l'année où la précipitation est supérieure à 10 mm

6.3 HORIZONS TEMPORELS DES FICHIERS EXCEL

Horizon 2020 : Moyenne de la période 2011-2040 moins la valeur historique.

Horizon 2050 : Moyenne de la période 2041-2070 moins la valeur historique.

Horizon 2080 : Moyenne de la période 2071-2100 moins la valeur historique.

Annexe 4

Questionnaires

Financé par



Sondage portant sur les impacts attribuables aux changements climatiques pour le secteur minier québécois

Questionnaire spécifique à l'exploration minière



**INSTITUT DE RECHERCHE EN
MINES ET EN ENVIRONNEMENT**



**Unité de recherche et de service
en technologie minérale
de l'Abitibi-Témiscamingue**

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971 Télécopieur : 819 797-6672

JUILLET 2016

Préambule

L'Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (URSTM-UQAT) a été mandatée par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) pour effectuer une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Les informations issues de ce travail alimenteront les réflexions du ministère dans l'élaboration de ses politiques et stratégies.

Bien qu'aujourd'hui l'industrie minière soit active sur tous les continents et dans toutes les conditions climatiques et que l'expertise nécessaire pour réaliser des travaux dans ces différents environnements soit disponible, il n'en demeure pas moins que les changements climatiques peuvent avoir des impacts sur le déroulement des activités minières dans une région donnée. L'industrie minière au Québec est-elle vulnérable à certains de ces impacts ? Ces impacts en viendront-ils à modifier ou affecter les pratiques de l'industrie ?

Pour nous aider à effectuer cette analyse, nous allons intégrer l'avis d'experts du secteur quant aux probabilités que les changements climatiques génèrent certains impacts sur les activités minières et sur les conséquences de ces impacts. Nous vous proposons donc ici de répondre à un questionnaire spécifique sur l'exploration minière qui nécessitera environ 30 minutes de votre temps. Le questionnaire vous amènera à vous prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci.

Notre enquête comprendra deux tours. Une fois que tous les experts participant à ce sondage auront répondu au premier tour, les réponses seront colligées. Au deuxième tour, nous vous communiquerons les résultats du premier, et vous aurez l'occasion d'expliquer ou de réviser vos réponses pour lesquelles votre opinion serait différente de celle de la majorité des autres experts. Le but est d'en arriver à des réponses les plus consensuelles possibles. Le consensus est souhaité, mais il ne sera pas forcé en vous obligeant de changer vos réponses.

Avant de participer à ce questionnaire, nous vous demandons de prendre le temps de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

- La communication se fera par courriel, de façon individuelle, afin que chacun des répondants ignore l'identité des autres. Toutes les réponses demeureront donc confidentielles.
- Des faits saillants des scénarios climatiques vous seront présentés afin que vous puissiez évaluer les probabilités que ces changements provoquent certains impacts sur les activités d'exploration minière. Les projections climatiques proviennent des travaux du consortium de recherche Ouranos, qui portent sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques¹.

¹ Les scénarios climatiques préparés par Ouranos seront présentés dans le rapport de l'*Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois*. La publication de ce rapport est à venir.

- Pour les besoins de cet exercice, vous devrez prendre pour hypothèse que les projections climatiques se réaliseront. Le but est d'évaluer le niveau de risque des impacts des changements climatiques et non pas de savoir si oui ou non ces changements surviendront. Ainsi, vous serez interrogés sur la **probabilité qu'un impact survienne en raison des changements climatiques** et non pas sur la probabilité que ces changements climatiques surviennent.
- L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un impact des changements climatiques ainsi que celle de la gravité des conséquences de cet impact sont souvent spécifiques à un site d'exploration précis. Néanmoins, pour les besoins de l'exercice, nous vous demandons de généraliser à l'échelle des différentes régions minières. Six régions caractérisées par une activité minière importante ont été identifiées (voir *Tableau 1*)².

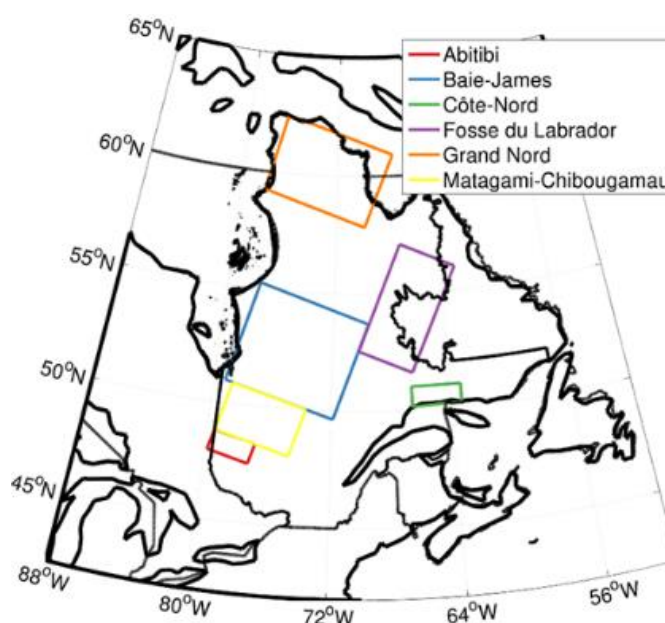


Tableau 1 : Régions minières identifiées pour le sondage

- Étant donné que les réalités du terrain et les conditions climatiques peuvent varier d'une région minière une l'autre, vous pouvez répondre aux questions différemment en fonction des régions lorsque cela s'applique. Vous pouvez répondre seulement pour les régions qui vous sont familières.
- À la suite de chaque question, une section commentaire vous permet de nous communiquer toutes informations ou précisions que vous jugez utiles. Vous pouvez également nous expliquer les raisons qui motivent votre choix de réponse.

² Pour plus de renseignement sur les activités minières dans les différentes régions du Québec, vous pouvez consulter les cartes du MERN au <http://mern.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp#mines>

- Nous sommes conscients que l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un impact et de la gravité des conséquences qui lui sont associées est un exercice qui peut paraître subjectif. Néanmoins, votre avis d'expert nous aidera à identifier les éléments les plus sensibles aux changements climatiques pour le secteur minier québécois et permettra d'orienter une réflexion sur le degré de vulnérabilité du secteur minier.
- Le contenu de ce document est **confidentiel**; le répondant s'engage donc à **ne pas en divulguer le contenu**.
- Les résultats de cette enquête seront intégrés au rapport de l'analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois qui sera remis au MERN. L'identité des participants demeure confidentielle.

Partie 1

Probabilité d'occurrence des impacts attribuables aux changements climatiques

Les changements climatiques considérés pour cette étude sont essentiellement les suivantes :

- Une augmentation des températures moyennes qui implique :
 - une diminution des jours de gel;
 - la fonte d'une partie du pergélisol;
 - l'augmentation des zones actives du pergélisol;
- Des changements au régime des précipitations qui impliquent :
 - une augmentation des précipitations annuelles moyennes;
 - l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrême de pluie;
 - l'augmentation des périodes de sécheresse pendant l'été.

Une première rencontre avec quelques experts du domaine a permis d'identifier un certain nombre d'impacts potentiels attribuables aux changements climatiques. Pour chacun qui sont envisagés, les faits saillants des modèles climatiques (jusqu'à 2080) vous sont présentés afin de vous aider à évaluer la probabilité que ces impacts surviennent.

Impact : Difficulté d'accès au territoire en raison de la diminution de la période de gel

Mise en contexte

Les variations de températures et le raccourcissement de la durée de l'hiver sont parmi les impacts anticipés les plus notables pour l'exploration minière. La diminution du nombre de jours de gel aura pour effet de rendre plus complexe l'accès au territoire, particulièrement sur les lacs et les zones humides (réduction de la durée de vie des routes de glace, glace plus mince, etc.). Cela pourrait restreindre les opérations de géophysique au sol et les forages dans ces zones normalement gelées.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Au centre et dans le nord du Québec, les hausses de la température moyenne projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100;
- On projette une forte réduction du nombre de jours de gel par an (avec température minimale inférieure à zéro) ainsi que du nombre de nuits et de jours froids. La saison de gel aura tendance à raccourcir, particulièrement dans le nord et le centre du Québec.

Tableau 1 : Augmentation de la température moyenne (°C) hivernale par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,52	-11,9	-9,38	-6,84	-15,22	-13,5	-10,7	-7,6	-18,46	-16,4	-13,3	-9,81

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,47	-11,8	-9,28	-6,41	-19,75	-17,8	-14,9	-12	-21,88	-19,1	-14,8	-9,82

Tableau 2 : Augmentation de la température minimale annuelle par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-39,37	-36,9	-32,7	-27,4	-36,38	-33,8	-29,5	-23,8	-38,96	-36,3	-29	-26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-32,68	-30,1	-26,1	-20,9	-40	-37,8	-33,9	-28,9	-43,69	-41,1	-36,6	-28

Tableau 3 : Augmentation du nombre de jours sans gel (nombre de jours) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
166	177	194	216	172	184	201	223	150	162	179	201

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
170	181	198	219	129	139	155	176	114	126	143	167

Question A-1

Sur une période d'une soixantaine d'années (2080), comment qualifiez-vous les probabilités qu'il y ait des pertes d'accessibilité au territoire attribuables à une diminution des périodes de gel?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : L'accessibilité aux sites d'exploration demeura semblable à celle que l'on connaît aujourd'hui	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Possibilité qu'un très faible nombre de sites soient moins ou pas accessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : Quelques sites pourraient avoir des problèmes d'accessibilité en raison de la diminution des périodes de gel.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites auront des problèmes temporaires d'accessibilité.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites auront des problèmes d'accessibilité	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perturbation du programme d'exploration en raison des changements au régime de précipitations

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes, mais surtout des événements extrêmes de précipitations compliqueront la logistique et la prévision des campagnes d'exploration. Cela pourrait générer des pressions par rapport à la réalisation des programmes d'exploration.

Citons par exemple l'entretien des chemins d'accès qui serait plus difficile. Les changements climatiques pourraient même aller jusqu'à entraîner la fermeture temporaire de routes. Les risques d'arrêt ou de perturbation des opérations ou de l'approvisionnement, ou encore les risques d'isolement des équipes sur le terrain occasionneront des coûts supplémentaires non seulement s'ils surviennent, mais aussi pour la prévoyance additionnelle qu'ils nécessiteront.

De plus, au stade des forages, l'eau utilisée est chargée de particules fines, plus rarement d'adjuvants chimiques de forage; elle doit donc être décantée avant d'être retournée dans l'environnement. L'augmentation des précipitations annuelles, des précipitations plus abondantes et des événements de précipitation extrême peuvent nécessiter une gestion plus serrée de l'eau de décantation, les réservoirs pouvant être portés à déborder. Cela pourrait générer des risques environnementaux.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations.
- Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour.
- On s'attend à des hausses significatives de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus fortes dans le nord que dans le sud.
- Les périodes de retour des événements de précipitations extrêmes seraient raccourcies de façon significative. En effet, un tel événement, dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005, pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065, soit avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l'ensemble du Québec.
- On projette une hausse de la fréquence des orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100.

³ Ouranos (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec. 114 p.

- À l'échelle du Québec, bien que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes annuelles ainsi que des événements de pluies abondantes, ils prévoient également un allongement de périodes sans précipitations pour la saison estivale.

Tableau 4 : Augmentation de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
853	889	940	990	889	937	994	1049	835	877	946	1014

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
1139	1192	1262	1313	922	974	1043	1112	471	505	558	621

Tableau 5 : Augmentation des précipitations annuelles du 99^e centile (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26	28	30	32	24	26	28	30	19	21	23	26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
33	34	37	39	20	22	24	27	12	13	20	17

Tableau 6 : Augmentation de l'accumulation de précipitations (en mm) lors d'événements extrêmes par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
281	308	339	373	262	288	323	357	220	247	290	333

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
311	345	395	431	202	237	284	329	132	153	186	264

Tableau 7 : Augmentation du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 (o sur l'axe des ordonnées) pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
7	7	8	8	7	7	8	9	6	7	8	9

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
10	10	11	11	6	7	8	9	3	3	4	5

Question A-2

En tenant compte des modifications au régime de précipitations pour 2080, quelle est la probabilité que ces modifications affectent le programme d'exploration?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Les programmes d'exploration ne sont pas affectés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Quelques programmes pourraient être affectés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des programmes ne seraient pas affectés	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : La majorité des programmes seraient affectés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : Pratiquement tous les programmes seraient affectés	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi
CN : Côte-Nord

MC : Matagami-Chibougamau
FL : Fosse du Labrador

BJ : Baie James
GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Question A-3

Dans ce contexte d'augmentation des événements extrêmes (pluies extrêmes, orages) sur une période d'une trentaine d'années, comment qualifiez-vous les probabilités que des pertes d'accessibilité temporaires surviennent ?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité d'occurrence	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites d'exploration demeureront accessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Possibilité qu'un très faible nombre de sites soient temporairement inaccessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des sites demeureront accessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : La majorité des sites seront temporairement inaccessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : Presque tous les sites auront des problèmes d'accessibilité temporaire.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Augmentation des coûts en raison des nouvelles conditions climatiques.

Mise en contexte :

Tel que présenté jusqu'à maintenant, les changements climatiques pourraient avoir différents impacts qui pourraient augmenter les coûts et les investissements nécessaires à la réalisation des travaux d'exploration.

Par exemple, les coûts reliés au transport pourraient être affectés par l'entretien supplémentaire des chemins d'accès en raison de l'augmentation des précipitations. Le raccourcissement des périodes de gel pourrait mener à une plus grande utilisation du transport aérien. Des événements extrêmes comme des feux de forêt ou des pluies abondantes pourraient mener à l'isolation des sites et des travailleurs de même qu'à l'arrêt des travaux, etc.

L'effet global des changements climatiques pourrait résulter éventuellement en une augmentation des coûts pour les entreprises.

Question A-4

Comment qualifiez-vous les probabilités que les conditions climatiques projetées génèrent des coûts supplémentaires comparativement à la situation actuelle ?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Pas de coûts supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Un nombre très limité de projets d'exploration auront des coûts supplémentaires	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des projets d'exploration ne subiront pas d'augmentation des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : La majorité des projets subiront une augmentation des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : Presque tous les projets d'exploration auront des coûts supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Autres impacts

Les impacts des changements climatiques qui vous ont été présentés sont issus d'une revue de la littérature ainsi que d'une consultation d'experts du secteur minier. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais d'une sélection des impacts jugés les plus significatifs.

Selon vous, d'autres impacts des changements devraient-ils être considérés dans ce questionnaire pour l'exploration minière?

Cliquez ici pour taper du texte.

Partie 2

Niveau d'intensité des conséquences des impacts des changements climatiques

Maintenant que vous avez donné votre avis sur la probabilité d'occurrence des impacts attribuables aux changements climatiques, nous vous demandons d'évaluer le degré d'intensité des conséquences possibles de ces impacts. Pour cette évaluation, nous vous demandons de considérer les conditions climatiques projetées telles que présentées précédemment.

Impact : Difficulté d'accès au territoire en raison de la diminution de la période de gel

Question B-1

En supposant que la diminution des périodes de gel provoque des pertes d'accessibilité au territoire, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Peu d'impact sur la réalisation des travaux; ajustements mineurs.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Perturbation du calendrier de réalisation des travaux et/ou coûts supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Difficulté importante à réaliser les travaux planifiés; moyens d'accès coûteux exigés	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Incapacité à réaliser les travaux planifiés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Instabilités des infrastructures en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

Dans la région du Grand Nord et au nord de la Fosse du Labrador, l'augmentation des températures moyennes provoquera, à certains endroits, la fonte d'une partie du pergélisol et l'augmentation des zones actives de celui-ci. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages. L'augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de tassements de terrain qui pourraient entraîner des dommages aux infrastructures.

Au stade de l'exploration initiale, on prévoit peu d'impact. Cependant, lorsque les cibles sont définies, il est nécessaire d'installer un camp de base dans les secteurs nordiques. Ce camp constitue souvent l'amorce du futur site de la mine. Il importe donc de prendre en compte dès ce stade les possibilités de la fragilité des sols.

Question B-2

En supposant que les changements climatiques provoquent des problèmes d'instabilité des infrastructures (piste d'atterrissage, route d'accès, bâtiments) dans un contexte de fonte du pergélisol, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Placez un X à l'endroit approprié pour chaque région.

Probabilité d'occurrence	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Faible : Légère augmentation des efforts de construction des infrastructures, faibles investissements requis de façon préventive.	☐	☐
Modérée : Investissements requis pour maintenir la stabilité des infrastructures.	☐	☐
Élevée : Occasionne des coûts supplémentaires et des difficultés logistiques élevées entraînant des difficultés à trouver des sites propices à la construction	☐	☐
Très élevée : Augmentation importante des coûts de construction et d'entretien; risques pour la stabilité des infrastructures.	☐	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Difficulté d'approvisionnement régulier en eau pendant l'été en raison de l'augmentation des périodes de sécheresse

Mise en contexte des impacts

L'exploration consomme peu d'eau; cependant, au stade des forages, il est nécessaire de disposer d'une alimentation régulière. L'augmentation des températures moyennes ainsi que l'allongement des périodes sans précipitation pour la saison estivale pourrait générer des périodes de sécheresse rendant l'approvisionnement en eau plus difficile.

Faits saillants des scénarios climatiques

- À l'échelle du Québec, bien que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes annuelles et des événements de pluies abondantes, ils prévoient également un allongement de périodes sans précipitations pour la saison estivale.
- Les projections d'humidité du sol (0-10 cm de profondeur) montrent des conditions plus sèches annuellement et encore davantage pour la saison estivale sur l'horizon 2081-2100.
- Les projections d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches à l'échelle annuelle et estivale dans le futur.
- La plupart des rivières du Sud du Québec peuvent s'attendre à une baisse des débits moyens en été, au printemps et en automne.

Question B-3

En supposant que les changements climatiques provoquent des problèmes d'alimentation en eau en saison estivale, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Perturbation des opérations très limitée sans arrêt des travaux	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Perturbations des opérations, arrêt de certains travaux sur de courte durée, légère augmentation des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Importantes perturbations des opérations, arrêt temporaire des travaux, augmentation significative des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Arrêts fréquents des travaux pouvant aller jusqu'à l'impossibilité des réaliser pendant l'été, augmentation majeure des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perturbation des opérations en raison des feux de forêt

Mise en situation

En raison de l'augmentation des températures moyennes et maximales ainsi que de l'accroissement des périodes sans précipitation pendant l'été, on anticipe une augmentation de la fréquence des feux de forêt en milieu boréal.

Question B-4

En supposant que les changements climatiques accroissent la fréquence des feux de forêt, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Perturbation des opérations très limitée sans arrêt des travaux	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Perturbations des opérations; arrêt de certains travaux sur de courtes périodes; légère augmentation des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Importantes perturbations des opérations; arrêt temporaire des travaux; conséquences sur la santé et la sécurité; augmentation significative des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Arrêts fréquents des travaux; conséquences majeures sur la santé et la sécurité; augmentation majeure des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perturbation du programme d'exploration en raison des changements au régime de précipitations

Mise en situation

Voir p. 7.

Question B-5

En supposant que les modifications au régime de précipitations affectent les programmes d'exploration, dans quelle mesure ces derniers seront-ils affectés?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Ajustements mineurs aux programmes d'exploration	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Modifications significatives aux programmes d'exploration.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Modifications importantes aux programmes d'exploration.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Abandon du projet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Question B-6

En supposant que les évènements extrêmes de précipitations provoquent des pertes temporaires d'accès aux sites, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Courte perte d'accès aux sites; perturbation des opérations très limités sans arrêt des travaux.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Perturbations des opérations; arrêt de certains travaux sur de courtes périodes; légère augmentation des coûts	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Importantes perturbations des opérations; arrêt temporaire des travaux; augmentation significative des coûts.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Impossibilité d'accéder aux sites; isolation complète des équipes de travailleurs sur le terrain; arrêts des travaux et coûts majeurs nécessaires pour remédier à la situation	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Augmentation des coûts en raison des nouvelles conditions climatiques

Mise en situation

Voir p. 11.

Question B-7

En supposant que les changements climatiques provoquent des augmentations de coûts, selon vous, quelle serait l'importance de ces augmentations?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Augmentation mineure des coûts	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Investissements requis pour adapter les installations.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Investissements majeurs requis pour des travaux correctifs et arrêt possible des travaux.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Coûts additionnels suffisamment importants pour considérer l'abandon du projet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Questions ouvertes

Questions C-1

Selon vous, dans le contexte des changements climatiques, quelles interventions devraient être envisagées par le gouvernement pour appuyer le développement minier?

Cliquez ici pour taper du texte.

Parmi les effets induits positifs des changements climatiques figurent l'approvisionnement et le transport maritime. La capacité d'opérer plus longuement permettra de meilleurs approvisionnements à partir du sud. De plus, il devrait se mettre en place de nouvelles routes maritimes arctiques.

Questions C-2

Quels impacts sur l'exploration minière pourrait avoir cet allongement de la période navigable et/ou l'ouverture de nouvelles voies maritimes?

Cliquez ici pour taper du texte.

Sondage portant sur les impacts attribuables aux changements climatiques pour le secteur minier québécois

Questionnaire spécifique à l'exploitation des sites miniers



**INSTITUT DE RECHERCHE EN
MINES ET EN ENVIRONNEMENT**



**Unité de recherche et de service
en technologie minérale
de l'Abitibi-Témiscamingue**

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971 Télécopieur : 819 797-6672

AOUT 2016

Préambule

L'Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (URSTM-UQAT) a été mandatée par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) pour effectuer une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Les informations issues de ce travail alimenteront les réflexions du ministère dans l'élaboration de ses politiques et stratégies.

Bien qu'aujourd'hui l'industrie minière soit active sur tous les continents et dans toutes les conditions climatiques et que l'expertise nécessaire pour réaliser des travaux dans ces différents environnements soit disponible, il n'en demeure pas moins que les changements climatiques peuvent avoir des impacts sur le déroulement des activités minières dans une région donnée. L'industrie minière au Québec est-elle vulnérable à certains de ces impacts ? Ces derniers en viendront-ils à modifier ou affecter les pratiques de l'industrie ?

Pour nous aider à effectuer cette analyse, nous allons intégrer l'avis d'experts du secteur quant aux probabilités que les changements climatiques génèrent certains impacts sur les activités minières et sur les conséquences de ces impacts. Nous vous proposons donc ici de répondre à un questionnaire spécifique à l'exploitation minière qui nécessitera environ 30 minutes de votre temps. Le questionnaire vous amènera à vous prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci.

Notre enquête comprendra deux tours. Une fois que tous les experts participant à ce sondage auront répondu au premier tour, les réponses seront colligées. Au deuxième tour, nous vous communiquerons les résultats du premier, et vous aurez l'occasion d'expliquer ou de réviser vos réponses pour lesquelles votre opinion serait différente de celle de la majorité des autres experts. Le but est d'en arriver à des réponses les plus consensuelles possibles. Le consensus est souhaité, mais il ne sera pas forcé en vous obligeant de changer vos réponses.

Avant de participer à ce questionnaire, nous vous demandons de prendre le temps de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

- La communication se fera par courriel, de façon individuelle, afin que chacun des répondants ignore l'identité des autres. Toutes les réponses demeureront donc confidentielles.
- Des faits saillants des scénarios climatiques vous seront présentés afin que vous puissiez évaluer les probabilités que ces changements provoquent certains impacts sur la restauration des sites miniers. Les projections climatiques proviennent des travaux du consortium de recherche Ouranos, qui portent sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques¹.

¹ Les scénarios climatiques préparés par Ouranos seront présentés dans le rapport de l'*Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois*. La publication de ce rapport est à venir.

- Pour les besoins de cet exercice, vous devrez prendre pour hypothèse que les projections climatiques se réaliseront. Le but est d'évaluer le niveau de risque des impacts des changements climatiques et non pas de savoir si oui ou non ces changements surviendront. Ainsi, vous serez interrogés sur la **probabilité qu'un impact survienne en raison des changements climatiques** et non pas sur la probabilité que ces changements climatiques surviennent.
- L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un impact des changements climatiques ainsi que celle de la gravité des conséquences de cet impact sont souvent spécifiques à un site d'exploration précis. Néanmoins, pour les besoins de l'exercice, nous vous demandons de généraliser à l'échelle des différentes régions minières. Six régions caractérisées par une activité minière importante ont été identifiées (voir *Tableau 1*)².

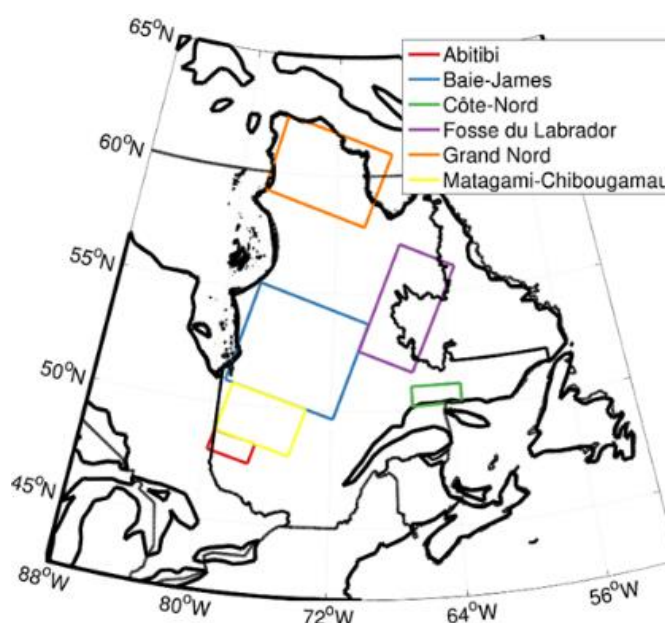


Tableau 1 : Régions minières identifiées pour le sondage

- Étant donné que les réalités du terrain et les conditions climatiques peuvent varier d'une région minière à une autre, vous pouvez répondre aux questions différemment en fonction des régions lorsque cela s'applique. Vous pouvez répondre seulement pour les régions qui vous sont familières.
- À la suite de chaque question, une section commentaire vous permet de nous communiquer toutes informations ou précisions que vous jugez utiles. Vous pouvez également nous expliquer les raisons qui motivent votre choix de réponse.

² Pour plus de renseignement sur les activités minières dans les différentes régions du Québec, vous pouvez consulter les cartes du MERN au <http://mern.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp#mines>

- Nous sommes conscients que l'évaluation de la probabilité d'occurrences d'un impact et de la gravité des conséquences qui lui sont associées est un exercice qui peut paraître subjectif. Néanmoins, votre avis d'experts nous aidera à identifier les éléments les plus sensibles aux changements climatiques pour le secteur minier québécois et permettra d'orienter une réflexion sur le degré de vulnérabilité du secteur minier.
- Le contenu de ce document est **confidentiel**; le répondant s'engage donc à **ne pas en divulguer le contenu**.
- Les résultats de cette enquête seront intégrés au rapport de l'analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois qui sera remis au MERN. L'identité des participants demeura confidentielle.

Partie 1

Probabilité d'occurrence des impacts attribuables aux changements climatiques

Les changements climatiques considérés pour cette étude sont essentiellement les suivants :

- Une augmentation des températures moyennes qui implique :
 - une diminution des jours de gel;
 - la fonte d'une partie du pergélisol;
 - l'augmentation des zones actives du pergélisol;
- Des changements au régime des précipitations qui impliquent :
 - une augmentation des précipitations annuelles moyennes;
 - l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrême de pluie;
 - l'augmentation des périodes de sécheresse pendant l'été.

Une première rencontre avec quelques experts du domaine a permis d'identifier un certain nombre d'impacts potentiels attribuables aux changements climatiques. Pour chacun qui sont envisagés, les faits saillants des modèles climatiques (jusqu'à 2080) vous sont présentés afin de vous aider à évaluer la probabilité que ces impacts surviennent.

Impact : Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

L'augmentation des températures moyennes, le raccourcissement de la durée de l'hiver et la diminution du nombre de jours de gel pourraient mener à la fonte du pergélisol dans certaines régions et à l'augmentation des zones actives. L'augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de tassements de terrain. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages de rétention tels que les digues des parcs à résidus, les bassins de décantations, les bassins de polissage et les bassins de rétention.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Au centre et dans le nord du Québec, les hausses de la température moyenne projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100;
- On projette une forte réduction du nombre de jours de gel par an (avec température minimale inférieure à zéro) ainsi que du nombre de nuits et de jours froids. La saison de gel aura tendance à raccourcir, particulièrement dans le nord et le centre du Québec.

Tableau 1 : Augmentation de la température moyenne (°C) hivernale par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,52	-11,9	-9,38	-6,84	-15,22	-13,5	-10,7	-7,6	-18,46	-16,4	-13,3	-9,81

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,47	-11,8	-9,28	-6,41	-19,75	-17,8	-14,9	-12	-21,88	-19,1	-14,8	-9,82

Tableau 2 : Augmentation de la température minimale annuelle par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-39,37	-36,9	-32,7	-27,4	-36,38	-33,8	-29,5	-23,8	-38,96	-36,3	-29	-26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-32,68	-30,1	-26,1	-20,9	-40	-37,8	-33,9	-28,9	-43,69	-41,1	-36,6	-28

Tableau 3 : Augmentation du nombre de jours sans gel (nombre de jours) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
166	177	194	216	172	184	201	223	150	162	179	201

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
170	181	198	219	129	139	155	176	114	126	143	167

Question A-1

En supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050 et qu'il n'y ait pas de modifications significatives apportées au design original des structures, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des problèmes d'instabilité des structures et des ouvrages de rétention dans un contexte de fonte du pergélisol?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Nul : La conception des ouvrages, selon les critères actuels, est suffisante pour que la stabilité soit maintenue en cas de dégel du pergélisol (pourrait se produire 1:1000 ans)	☐	☐
Rare : La majorité des ouvrages seront en mesure de maintenir leur stabilité; possibilité très faible que survienne une défaillance (pourrait se produire 1:100 ans)	☐	☐
Peu probable : Possibilité de défaillances (pourrait se produire 1:50 ans)	☐	☐
Probable : Plusieurs ouvrages ne seront pas en mesure de maintenir leur stabilité; plusieurs subiront une défaillance (pourrait se produire 1:10 ans).	☐	☐
Très probable : La majorité des ouvrages subiront une défaillance (pourrait se produire une fois par année)	☐	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau

Mise en contexte

Les projections climatiques prévoient que l'intensité et la fréquence des précipitations abondantes et extrêmes augmenteront pour toutes les régions minières, tout comme les précipitations annuelles moyennes. Pour les mines actives, cela signifie des quantités d'eau plus importantes à gérer et à traiter par des moyens actifs, ce qui génère des coûts supplémentaires.

Dans certains cas, la gestion de l'eau circulant à l'intérieur des ouvrages de rétention (parc à résidus, bassins de polissage et de décantation, etc.) est déjà un défi lors de périodes sensibles, comme par exemple au printemps lors de la fonte des neiges.

Il serait donc possible que des déversoirs et des évacuateurs de crue opèrent à leur capacité maximale et même plus. L'augmentation des volumes d'eau circulant à l'intérieur de ces ouvrages génère donc des risques environnementaux en raison des probabilités de débordements et de relâchements d'eaux contaminées dans l'environnement.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations.
- Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour.
- Pour le nord et le centre du Québec, les modèles s'accordent aussi sur des augmentations, mais plus modestes, des précipitations en été et en automne.
- On s'attend à des hausses significatives de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus substantielles dans le nord que dans le sud.
- Les périodes de retour des événements de précipitations extrêmes seraient raccourcies de façon significative. En effet, un événement dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005 pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065, avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l'ensemble du Québec.
- On projette une hausse de la fréquence des orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100.

Tableau 4 : Augmentation de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
853	889	940	990	889	937	994	1049	835	877	946	1014

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
1139	1192	1262	1313	922	974	1043	1112	471	505	558	621

Tableau 5 : Augmentation des précipitations annuelles du 99^e centile (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26	28	30	32	24	26	28	30	19	21	23	26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
33	34	37	39	20	22	24	27	12	13	20	17

Tableau 6 : Augmentation de l'accumulation de précipitations (en mm) lors d'événements extrêmes par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
281	308	339	373	262	288	323	357	220	247	290	333

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
311	345	395	431	202	237	284	329	132	153	186	264

Tableau 7 : Augmentation du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
7	7	8	8	7	7	8	9	6	7	8	9

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
10	10	11	11	6	7	8	9	3	3	4	5

Question A-2

Dans ce contexte, en supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050, comment qualifiez-vous les probabilités que les capacités des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue soient insuffisantes?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites seront en mesure de supporter les volumes supplémentaires d'eau sans intervention.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Nombre très limité de sites avec des capacités insuffisantes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des sites seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques sites ayant des capacités insuffisantes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi
CN : Côte-Nord

MC : Matagami-Chibougamau
FL : Fosse du Labrador

BJ : Baie James
GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Possibilités de défaillances des ouvrages de retenue

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes et surtout des événements extrêmes de précipitations pourraient générer des pressions sur les ouvrages de retenue tels que des barrages et les digues des parcs à résidus. Il faut également considérer que pour les sites en opération depuis plusieurs années, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Cela génère des risques environnementaux par rapport aux probabilités qu'il y ait des défaillances des ouvrages de retenue et par conséquent des relargages de rejets liquides et solides dans l'environnement. On entend par défaillance tout bris qui entraîne une fuite plus ou moins importante de liquide et/ou de matériel solide.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 7 à 9.

Question A-3

Dans ce contexte, en supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des défaillances des ouvrages de retenue?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites seront en mesure de supporter les volumes supplémentaires d'eau sans intervention.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Nombre très limité de sites avec une défaillance d'ouvrage de retenue.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des sites seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques défaillances ponctuelles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de défaillances d'ouvrages sur plusieurs sites.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; défaillances des ouvrages de retenues fréquentes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Instabilité des fosses et des ouvertures minières

Mise en contexte

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrême de précipitation pourrait également générer des problèmes d'instabilité des pentes des fosses et des ouvertures minières. De tels événements pourraient avoir des conséquences très élevées, notamment en ce qui concerne la santé et la sécurité des travailleurs.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 7 à 9.

Question A-4

En supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des problèmes d'instabilité des fosses ou des ouvertures minières dans un contexte d'augmentation des précipitations extrêmes?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Toutes les mines seront en mesure de supporter les volumes supplémentaires d'eau sans intervention.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Nombre très limité de mines ayant des problèmes d'instabilité.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu Probable : La majorité des mines seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques problèmes d'instabilité.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs mines n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de problèmes d'instabilité.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des mines n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; problèmes d'instabilité fréquents.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perte d'accessibilité aux sites miniers

Mise en contexte : Dans certaines régions, les sites miniers sont éloignés et souvent isolés. De plus, les entreprises y sont, la plupart du temps, responsables de la construction et de l'entretien du réseau routier ou ferroviaire donnant accès aux sites. Pour la région de l'Abitibi-Témiscamingue et pour certains projets miniers de la Côte-Nord, l'accès aux projets miniers est beaucoup plus facile en raison de la proximité du réseau de transport public ou des chemins multiusages.

Les changements climatiques pourraient avoir des impacts sur les infrastructures routières (route, aéroport, chemin de fer) et, par conséquent, augmenter les coûts engendrés par leur entretien. Les principaux impacts sont en lien avec la fonte du pergélisol ou encore avec l'augmentation des précipitations plus abondantes. Les dommages causés pourraient résulter en la fermeture temporaire de routes, de voies ferrées ou de pistes d'atterrissage, ce qui pourrait perturber la chaîne d'approvisionnement ou encore provoquer l'arrêt des opérations. Dans certains cas extrêmes, des isolements temporaires de sites miniers pourraient survenir.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 4-5 et 7 à 9.

Question A-5

En supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des problèmes d'accès aux sites miniers dans le contexte des changements climatiques?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites seront accessibles à long terme.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Possibilité qu'un très faible nombre de sites soient temporairement inaccessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu Probable : La majorité des sites seront accessibles à long terme; quelques sites pourraient être temporairement inaccessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites seront temporairement inaccessibles par la route.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites auront des problèmes d'accessibilité à long terme.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de l'apport en eau fraîche

Mise en contexte

La diminution de l'apport en eau fraîche pendant la saison estivale ou l'augmentation de l'évapotranspiration pourrait augmenter la concentration des contaminants dans l'eau recyclée utilisée pour le traitement du minerai. Cela pourrait causer des problèmes de rendement à l'usine de traitement.

Faits saillants des scénarios climatiques

- À l'échelle du Québec, bien que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes annuelles et des événements de pluies abondantes, ils prévoient également un allongement des périodes sans précipitations pour la saison estivale.
- Au centre et dans le nord du Québec, les hausses de température moyenne projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100.
- Les projections d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches annuellement et encore davantage pour la saison estivale sur l'horizon 2081-2100.

Tableau 8 : Augmentation de la température moyenne estivale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
15,88	17,35	19,32	21,08	14,94	16,39	17,92	20,12	12,96	14,29	16,15	18,62

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
12,44	13,71	14,89	17,87	10,95	12,14	13,86	16,16	7,19	8,38	10,06	12,37

Tableau 9 : Augmentation de la température maximale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
32,02	33,64	36,54	38,61	31,16	32,77	39,63	37,49	27,88	29,39	31,39	34,15

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26,73	28,16	30,05	32,66	24,71	26,04	27,85	30,36	21,43	22,78	28,02	30,1

Question A-6

Dans ce contexte, en supposant que les mines présentement en production le soient toujours en 2050, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des problèmes de rendement à l'usine de traitement en raison de difficultés d'apport en eau fraîche pendant l'été?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites auront un apport suffisant en eau fraîche.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Faible possibilité qu'un très faible nombre de sites aient des problèmes d'approvisionnement en eau fraîche.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu Probable : La majorité des sites n'auront pas de problèmes d'approvisionnement en eau fraîche; possibilité que quelques sites aient des problèmes d'apport en eau fraîche affectant le rendement de l'usine de traitement.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites auront des problèmes d'apport en eau fraîche affectant le rendement de l'usine.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites auront des problèmes d'apport en eau fraîche affectant le rendement de l'usine.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Autres impacts

Les impacts des changements climatiques qui vous ont été présentés sont issus d'une revue de la littérature ainsi que d'une consultation d'experts du secteur minier. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais d'une sélection des impacts jugés les plus significatifs.

Selon vous, d'autres impacts des changements devraient-ils être considérés dans ce questionnaire pour l'exploitation minière?

Cliquez ici pour taper du texte.

Partie 2

Niveau d'intensité des conséquences des impacts des changements climatiques

Maintenant que vous avez donné votre avis sur la probabilité d'occurrences des impacts attribuables aux changements climatiques, nous vous demandons d'évaluer le degré d'intensité des conséquences possibles de ces impacts. Pour cette évaluation, nous vous demandons de considérer les conditions climatiques projetées telles que présentées précédemment.

Impact : Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Question B-1

En supposant que les changements climatiques provoquent des instabilités des structures et ouvrages de rétention dans un contexte de fonte du pergélisol, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐

A : Abitibi
MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James
CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador
GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Défaillances des ouvrages de gestion et de traitement de l'eau

Question B-2

En supposant que les changements climatiques provoquent des capacités insuffisantes des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement, l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Question B-3

En supposant que les changements climatiques provoquent des défaillances des ouvrages de retenue, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement, l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Instabilité des fosses et des ouvertures minières

Question B-4

En supposant que les changements climatiques provoquent des problèmes d'instabilité des fosses ou des ouvertures minières, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Légère augmentation des coûts et efforts d'entretien des infrastructures; faibles investissements requis de façon préventive.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Investissements requis pour maintenir la stabilité des fosses ou des ouvertures; pas d'arrêt de la production et de danger pour la santé et la sécurité des travailleurs.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Investissements majeurs requis pour des travaux correctifs et arrêt possible de la production; danger pour la santé et la sécurité des travailleurs limité	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Investissements majeurs nécessaires et arrêts fréquents de la production; danger pour la santé et la sécurité des travailleurs	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perte d'accessibilité aux sites miniers

Question B-5

En supposant que les changements climatiques provoquent des problèmes d'accès aux sites, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Légère augmentation des coûts et efforts d'entretien des infrastructures; faibles investissements requis de façon préventive.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Investissements requis pour maintenir l'accès.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Investissements majeurs requis pour des travaux correctifs et arrêt possible de la production.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Investissements majeurs nécessaires et arrêts fréquents de la production.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de l'apport en eau fraîche

Question B-6

En supposant que les changements climatiques provoquent des difficultés d'apport en eau fraîche affectent le rendement des mines, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Légère perturbation des opérations; maintien de la production; adaptations mineures.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Perturbation des opérations; diminution du rendement; adaptations nécessaires pour maintenir la production.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Perturbation des opérations pouvant aller jusqu'à l'arrêt temporaire de la production; adaptations nécessaires pour le maintien des opérations	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Arrêts fréquents de la production; adaptations majeurs nécessaires pour remédier à la situation.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Sondage portant sur les impacts attribuables aux changements climatiques pour le secteur minier québécois

Questionnaire spécifique à la restauration minière



**INSTITUT DE RECHERCHE EN
MINES ET EN ENVIRONNEMENT**



**Unité de recherche et de service
en technologie minérale
de l'Abitibi-Témiscamingue**

445, boul. de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Téléphone : 819 762-0971 Télécopieur : 819 797-6672

JUILLET 2016

Préambule

L'Unité de recherche et de service en technologie minérale de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (URSTM-UQAT) a été mandatée par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) pour effectuer une analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois. Les informations issues de ce travail alimenteront les réflexions du ministère dans l'élaboration de ses politiques et stratégies.

Bien qu'aujourd'hui l'industrie minière soit active sur tous les continents et dans toutes les conditions climatiques et que l'expertise nécessaire pour réaliser des travaux dans ces différents environnements soit disponible, il n'en demeure pas moins que les changements climatiques peuvent avoir des impacts sur le déroulement des activités minières dans une région donnée. L'industrie minière au Québec est-elle vulnérable à certains de ces impacts ? Ces derniers en viendront-ils à modifier ou affecter les pratiques de l'industrie ?

Pour nous aider à effectuer cette analyse, nous allons intégrer l'avis d'experts du secteur quant aux probabilités que les changements climatiques génèrent certains impacts sur les activités minières et sur les conséquences de ces impacts. Nous vous proposons donc ici de répondre à un questionnaire spécifique sur la restauration minière qui nécessitera environ 30 minutes de votre temps. Le questionnaire vous amènera à vous prononcer, d'une part, sur la probabilité d'occurrence des impacts des changements climatiques et, d'autre part, sur la gravité des conséquences de ceux-ci.

Notre enquête comprendra deux tours. Une fois que tous les experts participant à ce sondage auront répondu au premier tour, les réponses seront colligées. Au deuxième tour, nous vous communiquerons les résultats du premier, et vous aurez l'occasion d'expliquer ou de réviser vos réponses pour lesquelles votre opinion serait différente de celle de la majorité des autres experts. Le but est d'en arriver à des réponses les plus consensuelles possibles. Le consensus est souhaité, mais il ne sera pas forcé en vous obligeant de changer vos réponses.

Avant de participer à ce questionnaire, nous vous demandons de prendre le temps de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

- La communication se fera par courriel, de façon individuelle, afin que chacun des répondants ignore l'identité des autres. Toutes les réponses demeureront donc confidentielles.
- Des faits saillants des scénarios climatiques vous seront présentés afin que vous puissiez évaluer les probabilités que ces changements provoquent certains impacts sur la restauration des sites miniers. Les projections climatiques proviennent des travaux du consortium de recherche Ouranos, qui portent sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques¹.

¹ Les scénarios climatiques préparés par Ouranos seront présentés dans le rapport de l'*Analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois*. La publication de ce rapport est à venir.

- Pour les besoins de cet exercice, vous devrez prendre pour hypothèse que les projections climatiques se réaliseront. Le but est d'évaluer le niveau de risque des impacts des changements climatiques et non pas de savoir si oui ou non ces changements surviendront. Ainsi, vous serez interrogés sur la **probabilité qu'un impact survienne en raison des changements climatiques** et non pas sur la probabilité que ces changements climatiques surviennent.
- L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un impact des changements climatiques ainsi que celle de la gravité des conséquences de cet impact sont souvent spécifiques à un site d'exploration précis. Néanmoins, pour les besoins de l'exercice, nous vous demandons de généraliser à l'échelle des différentes régions minières. Six régions caractérisées par une activité minière importante ont été identifiées (voir *Tableau 1*)².

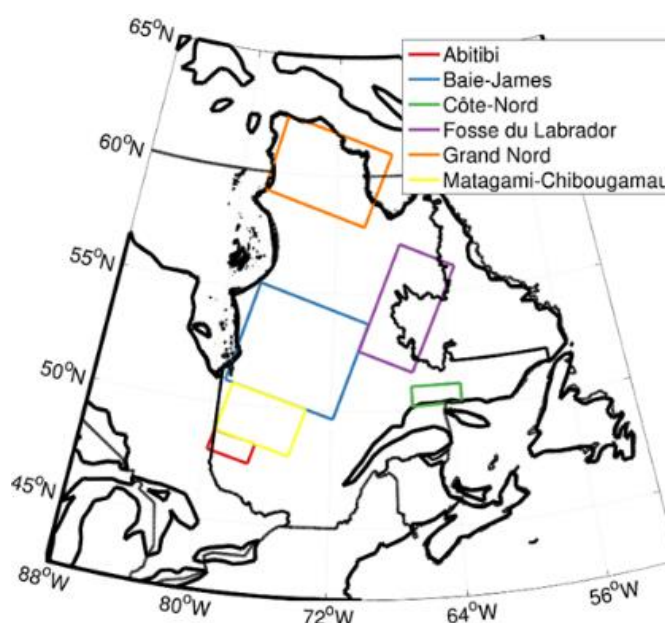


Tableau 1 : Régions minières identifiées pour le sondage

- Étant donné que les réalités du terrain et les conditions climatiques peuvent varier d'une région minière à une autre, vous pouvez répondre aux questions différemment en fonction des régions lorsque cela s'applique. Vous pouvez répondre seulement pour les régions qui vous sont familières.
- À la suite de chaque question, une section commentaire vous permet de nous communiquer toutes informations ou précisions que vous jugez utiles. Vous pouvez également nous expliquer les raisons qui motivent votre choix de réponse.

² Pour plus de renseignement sur les activités minières dans les différentes régions du Québec, vous pouvez consulter les cartes du MERN au <http://mern.gouv.qc.ca/cartes/index.jsp#mines>

- Nous sommes conscients que l'évaluation de la probabilité d'occurrences d'un impact et de la gravité des conséquences qui lui sont associées est un exercice qui peut paraître subjectif. Néanmoins, votre avis d'experts nous aidera à identifier les éléments les plus sensibles aux changements climatiques pour le secteur minier québécois et permettra d'orienter une réflexion sur le degré de vulnérabilité du secteur minier.
- Le contenu de ce document est **confidentiel**; le répondant s'engage donc à **ne pas en divulguer le contenu**.
- Les résultats de cette enquête seront intégrés au rapport de l'analyse de risques et de vulnérabilité liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois qui sera remis au MERN. L'identité des participants demeure confidentielle.

Partie 1

Probabilité d'occurrence des impacts attribuables aux changements climatiques

Les changements climatiques considérés pour cette étude sont essentiellement les suivantes :

- Une augmentation des températures moyennes qui implique :
 - une diminution des jours de gel;
 - la fonte d'une partie du pergélisol;
 - l'augmentation des zones actives du pergélisol;
- Des changements au régime des précipitations qui impliquent :
 - une augmentation des précipitations annuelles moyennes;
 - l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrême de pluie;
 - l'augmentation des périodes de sécheresse pendant l'été.

Une première rencontre avec quelques experts du domaine a permis d'identifier un certain nombre d'impacts potentiels attribuables aux changements climatiques. Pour chacun qui sont envisagés, les faits saillants des modèles climatiques (jusqu'à 2080) vous sont présentés afin de vous aider à évaluer la probabilité que ces impacts surviennent.

Impact : Diminution de la performance des recouvrements isolants

Mise en contexte

L'augmentation des températures moyennes, le raccourcissement de la durée de l'hiver et la diminution du nombre de jours de gel pourraient mener à la fonte du pergélisol dans certaines régions et à l'augmentation des zones actives. Cela pourrait mener au dégel et à l'exposition des résidus entreposés dans le pergélisol, provoquant ainsi la génération de drainage minier contaminé (acide ou neutre). Ce phénomène s'applique seulement à la région où l'entreposage des résidus dans le pergélisol et l'utilisation d'un recouvrement isolant est de mise, soit le Grand-Nord.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Au centre et dans le nord du Québec, les hausses de la température moyenne projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100;
- On projette une forte réduction du nombre de jours de gel par an (avec température minimale inférieure à zéro) ainsi que du nombre de nuits et de jours froids. La saison de gel aura tendance à raccourcir, particulièrement dans le nord et le centre du Québec.

Tableau 1 : Augmentation de la température moyenne (°C) hivernale par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,52	-11,9	-9,38	-6,84	-15,22	-13,5	-10,7	-7,6	-18,46	-16,4	-13,3	-9,81

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-13,47	-11,8	-9,28	-6,41	-19,75	-17,8	-14,9	-12	-21,88	-19,1	-14,8	-9,82

Tableau 2 : Augmentation de la température minimale annuelle par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-39,37	-36,9	-32,7	-27,4	-36,38	-33,8	-29,5	-23,8	-38,96	-36,3	-29	-26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
-32,68	-30,1	-26,1	-20,9	-40	-37,8	-33,9	-28,9	-43,69	-41,1	-36,6	-28

Tableau 3 : Augmentation du nombre de jours sans gel (nombre de jours) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
166	177	194	216	172	184	201	223	150	162	179	201

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
170	181	198	219	129	139	155	176	114	126	143	167

Question A-1

Dans ce contexte, sur une période d'une soixantaine d'années (2080), comment qualifiez-vous les probabilités qu'il y ait diminution de la performance des recouvrements isolants?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Grand Nord
Nul : La conception des recouvrements isolants, selon les critères actuels, est suffisante pour que la performance soit complètement maintenue en cas de dégel du pergélisol.	☐
Rare : La conception des recouvrements isolants selon les critères actuels est suffisante pour que la performance soit complètement maintenue en cas de dégel du pergélisol, à moins de circonstances exceptionnelles.	☐
Peu probable : Plus de chances de ne pas se produire que de se produire (diminution de la performance attribuable au dégel du pergélisol).	☐
Probable : Plus de chances de se produire que de ne pas se produire (diminution de la performance attribuable au dégel du pergélisol).	☐
Très probable : Une diminution de la performance du recouvrement est attendue, à moins de circonstances exceptionnelles.	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Dommages aux matériaux de recouvrement en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

L'augmentation des zones actives de pergélisol peut être à l'origine de tassements de terrain qui pourraient entraîner des dommages aux matériaux de recouvrement (e.g. géomembranes, couche d'argile), provoquant des infiltrations et exposant les résidus miniers qui ultimement, pourraient générer des problèmes de drainage minier contaminé.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 4 et 5.

Question A-2

Sur une période de cent ans, comment qualifiez-vous les probabilités d'occurrence associées à des dommages aux matériaux de recouvrement (p. ex. géomembranes, couche d'argile) ?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité d'occurrence	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Nul : Les matériaux de recouvrement installés sur les sites, selon les critères actuels, seront en mesure de supporter le dégel du pergélisol.	☐	☐
Rare : La majorité des matériaux de recouvrement seront en mesure de supporter le dégel du pergélisol; possibilité qu'un très faible nombre de sites restaurés subissent une défaillance.	☐	☐
Peu probable : Possibilité que quelques matériaux de recouvrement restaurés subissent une défaillance.	☐	☐
Probable : Plusieurs matériaux de recouvrement n'ont pas la capacité de supporter le dégel du pergélisol; plusieurs sites restaurés sont susceptibles de subir une défaillance	☐	☐
Très probable : La majorité des matériaux de recouvrement n'ont pas la capacité de supporter le dégel du pergélisol; la majorité sont susceptibles de subir une défaillance.	☐	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Mise en contexte

Dans la région du Grand Nord et au nord de la Fosse du Labrador, l'augmentation des températures moyennes provoquera, à certains endroits, la fonte d'une partie du pergélisol et l'augmentation des zones actives. Cela pourrait avoir pour conséquence d'affecter l'intégrité structurale et la stabilité des ouvrages.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 4 et 5.

Question A-3

Dans un contexte de fonte du pergélisol, sur une période d'une soixantaine d'année (2080), comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des problèmes d'instabilité des structures et ouvrages de rétention après la fermeture de la mine?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité d'occurrence	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Nul : La conception des ouvrages, selon les critères actuels, est suffisante pour que la stabilité soit maintenue en cas de dégel du pergélisol (pourrait se produire 1:1000 ans)	☐	☐
Rare : La majorité des ouvrages seront en mesure de maintenir leur stabilité; possibilité très faible qu'il y ait une défaillance (pourrait se produire 1:100 ans)	☐	☐
Peu probable : Possibilité de défaillances (pourrait se produire 1:50 ans)	☐	☐
Probable : Plusieurs ouvrages ne seront pas en mesure de maintenir leur stabilité; plusieurs subiront une défaillance (pourrait se produire 1:10 ans).	☐	☐
Très probable : La majorité des ouvrages subiront une défaillance (pourrait se produire une fois par année)	☐	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Capacité insuffisante des déversoirs et/ou évacuateurs de crue

Mise en contexte

Les projections climatiques prévoient que l'intensité et la fréquence des précipitations abondantes et extrêmes augmenteront pour toutes les régions minières, tout comme les précipitations annuelles moyennes.

Certain modes de restauration exigent l'entreposage de volume d'eau, tels que le recouvrement en eau ou la méthode de la nappe surélevée. Ces méthodes impliquent la présence de déversoir et/ou d'évacuateurs de crue. Or, dans un contexte des changements climatique, il serait possible que des déversoirs et des évacuateurs de crue opèrent à leur capacité maximale et même plus. De telles situations génèreraient des risques environnementaux par rapport aux probabilités qu'il y ait des débordements et des relargages de rejets liquides et solides dans l'environnement. Il faut considérer que, pour les sites déjà restaurés, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques.

Faits saillants des scénarios climatiques

- Partout au Québec, les modèles climatiques s'accordent sur des hausses hivernales et printanières des cumuls de précipitations.
- Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à des augmentations de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour.
- Pour le nord et le centre du Québec, les modèles s'accordent aussi sur des augmentations, mais plus modestes, des précipitations en été et en automne.
- On s'attend à des hausses significatives de précipitations abondantes et extrêmes, et ce, pour toutes les régions du Québec. Les augmentations seront généralement plus substantielles dans le nord que dans le sud.
- Les périodes de retour des événements de précipitations extrêmes seraient raccourcies de façon significative. En effet, un événement dont la période de retour est de 20 ans sur l'horizon 1986-2005 pourrait survenir plus fréquemment vers 2046-2065, avec une période de retour autour de 7 à 10 ans, et ce, pour l'ensemble du Québec.
- On projette une hausse de la fréquence des orages. Ces derniers produiraient des quantités de précipitations de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'on s'approche de l'année 2100.

Tableau 4 : Augmentation de la précipitation annuelle (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
853	889	940	990	889	937	994	1049	835	877	946	1014

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
1139	1192	1262	1313	922	974	1043	1112	471	505	558	621

Tableau 5 : Augmentation des précipitations annuelles du 99^e centile (en mm) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26	28	30	32	24	26	28	30	19	21	23	26

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
33	34	37	39	20	22	24	27	12	13	20	17

Tableau 6 : Augmentation de l'accumulation de précipitations (en mm) lors d'événements extrêmes par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
281	308	339	373	262	288	323	357	220	247	290	333

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
311	345	395	431	202	237	284	329	132	153	186	264

Tableau 7 : Augmentation du nombre de jours avec une précipitation supérieure à 10 mm par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
7	7	8	8	7	7	8	9	6	7	8	9

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
10	10	11	11	6	7	8	9	3	3	4	5

Question A-4

Dans ce contexte, sur une période d'une soixantaine d'années (2080), comment qualifiez-vous les probabilités que les capacités des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue soient insuffisantes?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites restaurés seront en mesure de supporter les volumes supplémentaires d'eau sans intervention.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Nombre très limité de sites avec des capacités insuffisantes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des sites restaurés seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques sites ayant des capacités insuffisantes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites restaurés n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires.	☐	☐	☐	☐	☐	☒

A : Abitibi
CN : Côte-Nord

MC : Matagami-Chibougamau
FL : Fosse du Labrador

BJ : Baie James
GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Possibilités de défaillances des ouvrages de retenue

Mise en contexte

Certains modes de restauration exigent la présence de digues de retenue, notamment le recouvrement en eau et la nappe surélevée. L'augmentation des précipitations moyennes et surtout des événements extrêmes de précipitations pourrait générer des pressions sur les ouvrages de retenue tels que les digues des parcs à résidus. Il faut également considérer que pour les sites déjà restaurés, les conceptions des infrastructures ont été faites en fonction des données climatiques actuelles et historiques. Par conséquent, elles ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Cela génère des risques environnementaux par rapport aux probabilités qu'il y ait des défaillances des ouvrages de retenue et par conséquent des relargages de rejets liquides et solides dans l'environnement. On entend par défaillance tout bris qui entraîne une fuite plus ou moins importante de liquide et/ou de matériel solide.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 9 à 11.

Question A-5

Dans ce contexte, sur une d'une soixantaine d'années, comment qualifiez-vous les probabilités que surviennent des défaillances des ouvrages de retenue sur des sites restaurés?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites restaurés seront en mesure de supporter les volumes supplémentaires d'eau sans intervention.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Nombre très limité de sites avec une défaillance d'ouvrage de retenue.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : La majorité des sites restaurés seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de quelques défaillances ponctuelles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; possibilité de défaillances d'ouvrages sur plusieurs sites.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; défaillances des ouvrages de retenues fréquentes.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau

Mise en contexte

Le contrôle de drainage contaminé par réduction des infiltrations d'eau est réalisé à partir de systèmes de recouvrement. Deux catégories principales de recouvrement sont utilisées : les systèmes conventionnels, faisant intervenir des matériaux naturels (p. ex. : couverture d'argile), et les systèmes utilisant des matériaux géosynthétiques (p. ex. géomembrane).

L'augmentation des précipitations moyennes et extrêmes pourrait également diminuer la performance de ces barrières à l'infiltration d'eau, provoquant ainsi des infiltrations et exposant les résidus miniers, qui ultimement pourraient générer des problèmes de drainage minier contaminé.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 9 à 11.

Question A-6

Dans le contexte des changements climatiques, sur une période d'une soixantaine d'années (2080), comment qualifiez-vous les probabilités que les changements climatiques entraînent une diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau résultant en la génération d'un effluent contaminé?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Toutes les barrières à l'eau installées sur les sites, selon les critères actuels, seront en mesure de supporter les volumes d'eau supplémentaires sans générer d'effluent contaminé.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Possibilité qu'un très faible nombre de sites restaurés avec la technique de barrière à l'eau subissent des infiltrations à travers le recouvrement résultant en des effluents contaminés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu probable : Possibilité que quelques sites restaurés subissent des infiltrations d'eau à travers le recouvrement et produisent des effluents contaminés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs barrières à l'eau n'auront pas la capacité de supporter les volumes d'eau supplémentaires; plusieurs sites sont susceptibles de subir des infiltrations à travers le recouvrement et de produire des effluents contaminés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés avec une technique de barrière à l'infiltration d'eau sont susceptibles de subir des infiltrations à travers le recouvrement et de générer des effluents contaminés.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perte d'accessibilité aux sites restaurés

Mise en contexte

L'augmentation des précipitations moyennes et surtout des événements extrêmes de précipitations pourraient générer des pressions sur l'entretien des chemins d'accès et même aller jusqu'à entraîner la fermeture temporaire de routes donnant accès aux sites miniers restaurés. En plus de générer des coûts d'entretien supplémentaires, la perte d'accès aux sites restaurés pourrait rendre le suivi de ces derniers plus difficile.

Faits saillants des scénarios climatiques

Voir pages 9 à 11.

Question A-7

Dans ce contexte, sur une période d'une soixantaine d'année, comment qualifiez-vous les probabilités qu'il y ait des pertes d'accessibilité des sites restaurés?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : Tous les sites restaurés seront accessibles par la route à long terme.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Possibilité qu'un très faible nombre de sites restaurés soient temporairement inaccessibles par la route.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu Probable : La majorité des sites restaurés seront accessibles par la route à long terme; quelques sites pourraient être temporairement inaccessibles.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites restaurés seront temporairement inaccessibles par la route.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés auront des problèmes d'accessibilité à long terme.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de la performance des barrières à l'oxygène

Mise en contexte

En climat humide, où les précipitations annuelles sont importantes et l'évaporation potentielle relativement faible, le contrôle du drainage contaminé peut être effectué à partir de systèmes de recouvrement qui réduisent le flux d'oxygène. Sachant que le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est plus faible que dans l'air (environ 10 000 fois), cette approche implique l'utilisation de techniques qui permettent le maintien d'un haut degré de saturation au sein d'une des composantes des systèmes (p. ex. : les recouvrements avec nappe surélevée, les couvertures avec effets de barrière capillaire [CEBC] ou le recouvrement en eau).

L'augmentation des températures moyennes ainsi que l'allongement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitation pour la saison estivale pourraient diminuer la performance des barrières à l'oxygène. Une telle situation pourrait occasionner des flux d'oxygène plus importants, provoquant ainsi l'oxydation des résidus miniers et l'exfiltration d'un effluent contaminé.

Il faut toutefois aussi considérer que les scénarios climatiques prévoient également une augmentation des précipitations annuelles moyennes pour toutes les régions du Québec, ce qui pourrait compenser en partie le bilan hydrique annuel.

Faits saillants des scénarios climatiques

- À l'échelle du Québec, bien que les scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations moyennes annuelles et des événements de pluies abondantes, ils prévoient également un allongement des périodes sans précipitation pour la saison estivale.
- Au centre et dans le nord du Québec, les hausses de température moyenne projetées sont d'environ 3 à 6 degrés pour 2041-2070 et de 5 à 10 degrés pour 2071-2100.
- Les projections d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches annuellement et encore davantage pour la saison estivale sur l'horizon 2081-2100.

Tableau 8 : Augmentation de la température moyenne estivale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
15,88	17,35	19,32	21,08	14,94	16,39	17,92	20,12	12,96	14,29	16,15	18,62

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
12,44	13,71	14,89	17,87	10,95	12,14	13,86	16,16	7,19	8,38	10,06	12,37

Tableau 9 : Augmentation de la température maximale (°C) par rapport à la moyenne de la période 1981-2010 pour toutes les régions minières étudiées

Abitibi				Matagami-Chibougamau				Baie-James			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
32,02	33,64	36,54	38,61	31,16	32,77	39,63	37,49	27,88	29,39	31,39	34,15

Côte-Nord				Fosse du Labrador				Grand-Nord			
Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080	Moyenne 1981-2010	2020	2050	2080
26,73	28,16	30,05	32,66	24,71	26,04	27,85	30,36	21,43	22,78	28,02	30,1

Question A-8

Dans ce contexte, sur une période d'une soixantaine d'année (2080), comment qualifiez-vous les probabilités que les barrières à l'oxygène subissent des diminutions de la performance dues aux sécheresses et la période de jour sans pluie?

Cochez selon vos choix de réponses.

Probabilité	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Nul : La conception des barrières à l'oxygène, selon les critères actuels, est suffisante pour que la performance soit maintenue en cas de périodes prolongées sans pluie.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Rare : Faible possibilité qu'un très faible nombre de sites restaurés utilisant une barrière à l'oxygène subissent une diminution du degré de saturation de la barrière faite en géomatériaux ou une diminution de l'épaisseur du couvert aqueux résultant en la production d'effluent contaminé.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Peu Probable : La majorité des sites utilisant une barrière à l'oxygène ne subiront pas de diminution du degré de saturation de la barrière à l'oxygène ou une diminution de l'épaisseur du couvert aqueux.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Probable : Plusieurs sites utilisant une barrière à l'oxygène ne seront pas en mesure de maintenir leur performance; plusieurs sites restaurés subiront une diminution du degré de saturation de la barrière ou diminution de l'épaisseur du couvert aqueux résultant en la production d'effluent contaminé.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très probable : La majorité des sites restaurés avec une barrière à l'oxygène subiront une diminution du degré de saturation de la barrière ou une diminution de l'épaisseur du couvert aqueux.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Autres impacts

Les impacts des changements climatiques qui vous ont été présentés sont issus d'une revue de la littérature ainsi que d'une consultation d'experts du secteur minier. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais d'une sélection des impacts jugés les plus significatifs.

Selon vous, d'autres impacts des changements devraient-ils être considérés dans ce questionnaire pour la restauration minière?

Cliquez ici pour taper du texte.

Partie 2

Niveau d'intensité des conséquences des impacts des changements climatiques

Maintenant que vous avez donné votre avis sur la probabilité d'occurrences des impacts attribuables aux changements climatiques, nous vous demandons d'évaluer le degré d'intensité des conséquences possibles de ces impacts. Pour cette évaluation, nous vous demandons de considérer les conditions climatiques projetées telles que présentées précédemment.

Impact : Diminution de la performance des recouvrements isolants

Question B-1

En supposant que les changements climatiques provoquent des diminutions de la performance des recouvrements isolants, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Région du Grand Nord
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Dommages aux matériaux de recouvrement en raison de la fonte du pergélisol

Question B-2

En supposant que les changements climatiques provoquent des dommages aux matériaux de recouvrement (p. ex. géomembranes, couche d'argile), selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Placez un X à l'endroit approprié pour chaque région.

Intensité des conséquences	Région du Grand Nord	Nord de la fosse du Labrador
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Instabilité des structures et des ouvrages de rétention en raison de la fonte du pergélisol

Question B-3

En supposant que les changements climatiques provoquent des problèmes d'instabilité des structures et ouvrages de rétention, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Capacité insuffisante des déversoirs et/ou évacuateurs de crue

Question B-4

En supposant que les changements climatiques provoquent des capacités insuffisantes des déversoirs et/ou des évacuateurs de crue, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Possibilités de défaillances des ouvrages de retenue

Question B-5

En supposant que les changements climatiques provoquent des défaillances des ouvrages de retenue, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de la performance des barrières à l'infiltration d'eau

Question B-6

En supposant que les changements climatiques provoquent des diminutions de la performance des barrières à l'infiltration d'eau, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

MC : Matagami-Chibougamau

BJ : Baie James

CN : Côte-Nord

FL : Fosse du Labrador

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Perte d'accessibilité aux sites restaurés

Question B-7

*En supposant que les changements climatiques provoquent des **pertes d'accessibilité** aux sites restaurés, selon vous, quelle serait l'intensité typique des **conséquences** d'une telle situation?*

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Légère augmentation des coûts et des efforts d'entretien des infrastructures; faibles investissements requis de façon préventive.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Investissements requis pour maintenir l'accès.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Investissements majeurs requis pour des travaux correctifs; perte temporaire d'accès au site par voie terrestre.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Investissements majeurs nécessaires; pertes d'accès au site prolongée.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Impact : Diminution de la performance des barrières à l'oxygène

Question B-8

En supposant que les changements climatiques provoquent des diminutions de la performance des barrières à l'oxygène, selon vous, quelle serait l'intensité typique des conséquences d'une telle situation?

Cochez selon vos choix de réponses.

Intensité des conséquences	Régions					
	A	MC	BJ	CN	FL	GN
Faible : Qualité de l'environnement peu affectée; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont conservées.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modérée : Réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu et son utilisation sont affectées avec possibilité de réparation; dommages limités au site.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Élevée : Forte réduction de la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont affectées; dommages affectant le territoire (1 km et plus)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Très élevée : Forte réduction la qualité de l'environnement; l'intégrité environnementale du milieu récepteur et son utilisation sont compromises de façon permanente	☐	☐	☐	☐	☐	☐

A : Abitibi

BJ : Baie James

FL : Fosse du Labrador

MC : Matagami-Chibougamau

CN : Côte-Nord

GN : Grand Nord

Commentaires (facultatif) : Cliquez ici pour taper du texte.

Annexe 5

Étude de cas de sites restaurés

Financé par



Discussion : études de cas

Deux études de cas, impliquant deux méthodes de restauration distinctes, sont présentées ci-dessous : le recouvrement en eau (site minier Louvicourt) et la CEBC (site minier Les Terrains Aurifères [LTA]). Ces deux sites sont situés dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, à proximité de Val-d'Or et de Malartic (Québec). Cette région est soumise à un climat humide avec des températures minimales et maximales moyennes de -4,5 et 7,5°C (température moyenne annuelle de 1,5°C); les précipitations annuelles sont de l'ordre de 900 mm (MDDELCC, 2015).

Site minier Louvicourt : recouvrement en eau

La mine Louvicourt¹, située à 20 km à l'est de Val-d'Or et opérationnelle entre juillet 1994 et juillet 2005, a produit des concentrés de cuivre, d'or et d'argent, de zinc ainsi que des résidus miniers (environ 6,62 millions de tonnes ou 3,9 Mm³ de rejets de concentrateur) constitués essentiellement de pyrite (entre 30 et 50 %) (Li *et al.*, 1997). Étant donné que ces résidus produits lors des opérations de traitement possédaient un fort potentiel de génération d'acide, ils ont été disposés sous une couche aqueuse afin de contrôler la formation d'un drainage minier contaminé à long terme). L'étang artificiel d'une superficie de 105,4 hectares a également permis d'entreposer 142 000 m³ de résidus miniers lors de la réhabilitation finale du site en 2007 (pour plus d'information, voir Ouellet *et al.*, 2011). Il est à noter que ce système de recouvrement ne dispose pas d'une couche de protection²; la formation d'un biofilm à la surface des résidus empêcherait naturellement leur remise en suspension (MEND, 2007).

Afin de déterminer l'efficacité de la méthode de restauration ainsi que l'épaisseur de la couche aqueuse nécessaire pour contrôler la production d'un drainage contaminé, différents scénarios ont été testés préalablement (*e.g.*, Li *et al.*, 1997; MEND, 2000a). À la suite de ces travaux, une épaisseur d'eau moyenne de 1 m a été proposée au milieu des années 1990. L'emplacement du système a été judicieusement sélectionné en fonction de la proximité du concentrateur ainsi que des conditions hydrogéologiques et géotechniques du site. Concrètement, ce dernier est constitué de fondations (étanches) à faibles conductivités hydrauliques, afin de garantir un bilan hydrique positif et le maintien de la couche aqueuse à long terme. Il est à noter que les digues de confinement (construites en 1993 et de 2,5 km de long) ont évidemment été conçues pour résister à l'érosion de surface et interne ainsi qu'aux cycles de gel/dégel (pour plus d'information, voir Julien *et al.*, 2003).

Dans le cas de la restauration du site Louvicourt, les principaux paramètres climatiques qui ont été pris en considération concernant la présence d'événements de précipitations extrêmes et de périodes sèches. En effet, le recouvrement en eau sur le site Louvicourt a été conçu pour :

¹ La mine Louvicourt a été la première à être restaurée au Canada à partir d'une installation anthropique (i.e., conception de digues de confinement étanches sur 2,5 km).

² Selon Vigneault *et al.* (2007), la formation d'un biofilm à la surface des résidus empêcherait naturellement leur remise en suspension.

- faire face à des événements de précipitations extrêmes en limitant les risques de surverse (e.g., hauteur de revanche de 2 m; construction d'un déversoir d'urgence permettant l'évacuation d'une CMP³;
- garantir le maintien de la couche aqueuse au-dessus des rejets miniers en périodes plus sèches pour contrôler la formation du DMA.

Bien que ces informations soient en adéquation avec les sources de vulnérabilité établies pour cette méthode de restauration, les informations publiques disponibles ne permettent pas d'étudier plus rigoureusement les risques dans le contexte des changements climatiques au Québec. Pour ce faire, des informations concernant les périodes de retour des événements extrêmes, notamment utilisées dans la conception des ouvrages de dérivation, devraient être disponibles. En effet, dans le cas du site Louvicourt et en admettant une augmentation généralisée des précipitations moyennes et extrêmes dans les prochaines années, les quantités d'eau à gérer devraient être plus importantes.

Site minier Les Terrains Aurifères (LTA) : CEBC

Le site minier LTA, situé à 8,5 km à l'est de Malartic, a généré environ 10 millions de tonnes de rejets de concentrateur relativement inertes dans les années 1930, puis 8 millions de tonnes de rejets ayant un fort potentiel de génération d'acide (environ 6 % de pyrite) à la fin des années 1970 (réouverture). Ces rejets de concentrateur ont été entreposés au sein d'un parc d'une soixantaine d'hectares ceinturé par la topographie naturelle et trois digues de confinement. Les travaux de restauration ont eu lieu en 1996 et ont impliqué la conception d'une CEBC constituée de résidus miniers inertes. La couverture comprend 0,5 m de sable pour le bris capillaire, 0,8 m de résidus miniers à granulométrie fine et non générateurs d'acide pour la barrière à l'oxygène ainsi que 0,3 m d'un matériau à granulométrie plus grossière (sable et gravier) pour diminuer les effets de l'évaporation (i.e., couche de protection). Il est à noter qu'avant la mise en place du système de recouvrement, des travaux en cellules expérimentales de terrain ainsi que des simulations numériques ont été réalisés pour valider l'efficacité du système; les effets des cycles de gel/dégel et la résistance à l'érosion de surface ont notamment été évalués (pour plus d'information, voir les rapports MEND, 1999; 2000).

Dans le cas de la restauration du site LTA, les principaux paramètres climatiques qui ont été pris en considération concernent l'absence de précipitation en périodes sèches et la présence d'événements de précipitations extrêmes. En effet, la CEBC sur le site LTA a été conçue pour :

- garantir la stabilité du taux de saturation de la couche à granulométrie fine, afin de limiter la diffusion de l'oxygène à long terme et, plus particulièrement, lors de périodes sèches (environ 2 mois);

³ La CMP a été déterminée en assumant la combinaison d'une précipitation maximale probable et de conditions de ruissellement les plus défavorables (Julien *et al.*, 2003). Aucune information sur les périodes de retour des événements de précipitations et de crues maximales probables calculées n'est toutefois précisée dans la documentation publique; les CMP devraient être en conformité avec l'encadrement des activités proposé dans la *Directive 019* ainsi que les recommandations de sécurité sur les barrages (ACB, 2013).

- faire face à des événements de précipitations extrêmes ayant une période de retour de 1000 ans.

Dans le contexte des changements climatiques au Québec et, plus particulièrement, d'une augmentation généralisée des précipitations moyennes et extrêmes, ces travaux montrent que la performance des CEBC ne serait pas remise en question à long terme. Bien au contraire, une augmentation des précipitations garantirait des taux de saturation élevés de la barrière à l'oxygène. Toutefois, l'augmentation des températures en période sèche (*i.e.*, accroissement de l'évaporation potentielle) pourrait affecter la stabilité de ces taux, et ce, plus particulièrement pour les parties inclinées du système (pour plus d'information, voir Maqsoud *et al.*, 2005, 2011). En définitive, les essais réalisés sur le site LTA confirment bien que la source principale de vulnérabilité des CEBC correspond à la stabilité des taux de saturation des matériaux à granulométrie fine.

Références

- Julien, M.R., Lemieux, M., Cayouette, J., Talbot, D., 2003. Performance and Monitoring of the Louvicourt Mine Tailings Disposal Area, 21 p.
- Li, M.G., Aube, B., St-Arnaud, L., 1997. Considerations in the use of shallow water covers for decommissioning reactive tailings. In Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, BC (Vol. 31, pp. 115-130).
- Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Cissokho, F., Aubertin, M., 2005. Suction break to reduce slope effects on cover used as gas barrier. In Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint International Conference of the Association of Hydrogeologists – Canadian National Chapter and the Canadian Geotechnical Society, Saskatoon, Sask., 19–21 September 2005. BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C. Session 10D, Paper 614.
- Maqsoud, A., Bussiere, B., Aubertin, M., Chouteau, M., Mbonimpa, M., 2011. Field investigation of a suction break designed to control slope-induced desaturation in an oxygen barrier. Canadian Geotechnical Journal, 48(1), 53-71.
- MDDELCC, 2015. Normales climatiques du Québec 1981-2010. Développement durable, Environnement et Lutte contre les Changements climatiques.
<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/normales/index.asp>
- MEND, 1999. Construction and Instrumentation of a Multi-Layer Cover Les Terrains Aurifères (LTA). MEND Report 2.22.4.a. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/2.22.4a-E.pdf>
- MEND, 2000a. Reactivity assessment and subaqueous oxidation rate modelling for Louvicourt tailings - Final Report. MEND Report 2.12.1.d. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2121d.pdf>

- MEND, 2000b. Suivi du comportement du recouvrement multicouche les terrains aurifères. Report 2.22.4.b. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2224BF.pdf>
- MEND, 2007. Assessing the long term performance of a shallow water cover to limit oxidation of reactive tailings at Louvicourt Mine. Report 2.12.2. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada. <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/2.12.2.pdf>
- Ouellet, R., Filion, M. P., Edwards, M., Davies, G. W., 2011. Louvicourt mine: a recent mine closure case study.

Tableau E-1 : Résumé de la vulnérabilité des principaux éléments d'un parc à résidus face aux changements climatiques

Éléments d'un ouvrage de rétention typique		Commentaires sur la vulnérabilité aux changements climatiques
Confinement des résidus miniers	Digues «étanches» (construites en tout ou en partie avec des sols de faible perméabilité)	Dans les secteurs de pergélisol, la conception des digues doit tenir compte des variations de température attendues dans le futur. L'érosion de la pente aval des digues est vulnérable aux changements climatiques.
	Digues perméables (construites avec des résidus ou des sols perméables)	Les éléments vulnérables sont les fossés de collecte des eaux au pied des digues, s'ils étaient maintenus après la fin de l'exploitation, et la distance minimale à conserver entre les étangs d'eau et la crête des digues, s'il y a lieu.
	Éléments d'imperméabilisation de l'aire de stockage constitués de sols naturels ou importés, ou d'une géomembrane	Les sols naturels (argile et till) ne sont pas vulnérables aux changements climatiques. La durabilité des géomembranes n'est pas affectée par les changements climatiques.
Contrôle des eaux contaminées	Fossés de collecte, bassins de captage, de polissage et de traitement, tours de décantation, pompes sur radeaux, déversoirs/évacuateurs de crues, etc.	Les ouvrages de collecte et de contrôle des eaux contaminées sur les sites miniers sont vulnérables aux changements climatiques. Toutefois, l'opérateur étant présent pour les opérations de traitement, cela fait en sorte que les ouvrages sont surveillés périodiquement et que les ressources humaines et financières sont disponibles pour apporter toute modification devenue nécessaire.
Contrôle des eaux de ruissellement	Déversoir/évacuateurs de crues (pour éviter le débordement d'eau par-dessus les digues) après la fin des travaux de restauration	Comme l'intensité et la fréquence des précipitations extrêmes augmenteront à la suite des changements climatiques, les calculs de la CMP effectués dans le futur devraient générer des valeurs de débit plus élevées que celles obtenues au moment de la conception. Ainsi, les gestionnaires de sites miniers devront augmenter la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crues afin de maintenir le niveau de sécurité déterminé pour le site.
	Fossés de surface (pour protéger la pérennité du couvert végétal) et empêcher l'érosion des résidus après la fin des travaux de restauration	Les fossés sont généralement conçus pour une crue de conception déterminée au moment des travaux de fermeture. Pour maintenir le niveau de sécurité déterminé pour les ouvrages, la capacité des fossés devra être accrue si l'intensité des précipitations correspondant à la récurrence de conception devait changer suite aux changements climatiques. Ceci s'applique aussi aux systèmes de protection contre l'érosion appliqués en surface ou dans les pentes des parcs à résidus.

Tableau E-2 : Résumé de la vulnérabilité des méthodes de restauration face aux changements climatiques

Méthodes de restauration		Commentaires sur la vulnérabilité aux changements climatiques
Prévention du DMA par réduction des infiltrations d'eau	Recouvrements alternatifs et conventionnels (multicouches)	Les systèmes alternatifs ne sont pas recommandés en climat humide et sont vulnérables aux changements climatiques. Pour les systèmes conventionnels, l'augmentation des précipitations pourrait conduire à long terme à de la percolation avec les résidus réactifs. Bien que les géomembranes ne soient pas affectées par les changements climatiques (mais dans le temps), la stabilité physique des pentes des systèmes conventionnels est vulnérable face à l'augmentation des événements de précipitations extrêmes (fréquence, durée et intensité).
Prévention du DMA par réduction du flux d'oxygène	Recouvrements en eau	Face à une augmentation des événements de précipitation extrêmes (fréquence, durée et intensité), les gestionnaires de sites miniers devront augmenter la capacité des déversoirs et des évacuateurs de crues. Face à une augmentation des températures (<i>i.e.</i> , l'évaporation potentielle) et des événements extrêmes (<i>i.e.</i> , vents violents), les recouvrements en eau sont également vulnérables (e.g., diminution de la couche aqueuse, remise en suspension).
	Recouvrement avec nappe surélevée	Les recouvrements avec nappe surélevée sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques : stabilité de la nappe phréatique et de la saturation de la couche de rétention face à une augmentation des températures (<i>i.e.</i> , l'évaporation potentielle); stabilité physique des ouvrages face à une augmentation des événements de précipitations extrêmes. Les gestionnaires de sites miniers devront également accroître la capacité des déversoirs, des évacuateurs de crues et des fossés.
	Couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC)	Les CEBC ne sont pas vulnérables aux changements climatiques. Toutefois, face à une augmentation des températures (<i>i.e.</i> , l'évaporation potentielle) et de la durée des périodes sèches, les CEBC pourraient être affectées temporairement (<i>i.e.</i> diminution du taux de saturation de la couche de rétention).
Prévention du DMA par annulation de la cinétique d'oxydation des sulfures	Recouvrements isolants	En climat nordique, face au réchauffement climatique (<i>i.e.</i> , fonte du pergélisol et augmentation de la couche active), les recouvrements isolants sont particulièrement vulnérables.

Tableau E-3 : Liste des facteurs à considérer au moment de la conception d'un parc à résidus et vulnérabilité aux changements climatiques

Référence : Bulletin 153 de la Commission internationale des grands barrages (CIGB, 2013)	
Note : Les facteurs qui sont vulnérables aux changements climatiques sont identifiés par l'usage du caractère gras	
Choix du site	Les éléments qui méritent une attention particulière lors du choix du site pour un parc à résidus miniers sont les suivants : • Caractéristiques des zones limitrophes (topographie du site, usage des territoires limitrophes, potentiel minéral du site, activités humaines, accessibilité, distance de l'usine de traitement, etc.); • Contexte hydrogéologique, vulnérabilité des eaux souterraines; • Caractéristiques du milieu hydrique, zones inondables, etc. • Caractéristiques des sols de fondation (propriétés géotechniques et hydrogéologiques); • Exigences en matière de gestion de l'eau, taille des bassins versants, volume d'eau à dévier, facilité à construire des déversoirs et des évacuateurs de crues robustes à long terme. • Sensibilité du milieu récepteur; • Potentiel d'agrandissement du parc à résidus en vue d'une augmentation des activités minières dans l'avenir.
Durée de vie attendue de l'ouvrage	Les critères de conception doivent être établis en tenant compte de la durée de vie prévue du barrage et des exigences en matière de fermeture; celles-ci peuvent avoir une incidence importante sur le choix du site et la conception du barrage minier.
Risques liés aux gradients hydrauliques et à l'érosion interne	L'érosion interne des matériaux formant les digues en terre constitue une défaillance critique, et ces ouvrages doivent être conçus de manière à réduire le plus possible les gradients hydrauliques, en prévoyant notamment l'aménagement de filtres et de drains robustes. Les gradients hydrauliques peuvent être réduits en évitant d'installer un épaulement amont trop perméable et en maximisant l'accumulation de résidus contre la paroi amont de la digue. L'accumulation de résidus peut contribuer à colmater les fissures en cas de fracture ou d'érosion interne du noyau. Les gradients peuvent, en outre, être réduits en maintenant loin du barrage le bassin d'eau présent à la fermeture, ce qui comporte l'avantage supplémentaire de réduire les conséquences potentielles d'un glissement ou d'une érosion du barrage.
Drains et niveaux piézométriques	La digue doit être conçue pour survivre à une perte d'efficacité des drains avec le temps et à l'effet d'une telle détérioration sur le niveau piézométrique. On peut envisager d'adoucir la pente aval de la digue, ce qui est favorable à sa stabilité et à la création de gradients de sortie qui limitent les possibilités d'érosion interne.
Matériaux géosynthétiques	Bien que certaines juridictions considèrent que la durée de vie des géotextiles et des géomembranes peut atteindre jusqu'à 300 ans, aucune donnée n'existe pour permettre une extrapolation sur de longues périodes. À long terme, les digues doivent donc rester performantes même si la géomembrane, les filtres ou les drains en matériaux géosynthétiques se dégradent avec le temps. Ces éléments doivent être devenus superflus ou des systèmes doivent pouvoir être mis en place pour atténuer l'effet de ces dégradations.

Altération atmosphérique et dégradation des propriétés des matériaux	L'altération atmosphérique due aux changements de température tels que les cycles de gel/dégel peuvent provoquer la dégradation des enrochements en diminuant leur densité ou en modifiant leur granulométrie et leur résistance. L'altération chimique causée par l'oxydation des sulfures et par la percolation des précipités peut également entraîner l'obturation des filtres et des drains. Dans certains environnements, l'activité biologique peut aussi réduire la perméabilité et les performances des filtres et des drains.
Effets attribuables à la consolidation des résidus et de la fondation	La consolidation à long terme des résidus et des sols de fondation peut s'accompagner d'un tassement ainsi que d'une modification de la topographie qui peut altérer le mode de drainage ou provoquer des fissures dans la couverture sèche. La consolidation peut également mener à une réduction de perméabilité (qui peut réduire la percolation ou élever le niveau phréatique).
Effets attribuables à la température	Une hausse des températures, résultant du réchauffement climatique, peut provoquer le dégel du pergélisol ainsi que du noyau gelé de certains barrages ou remblais. À l'inverse, une baisse des températures peut entraîner le développement d'un pergélisol et le gel des drains. Une évolution à long terme des températures peut s'accompagner de changements par rapport aux précipitations et aux orages qui auront une incidence sur le drainage, l'envasement et la végétation. De longues périodes de chaleur ou de sécheresse peuvent engendrer une fissuration du sol par dessiccation, permettant à l'eau de pénétrer la couverture sèche ou le noyau du remblai à la suite d'un orage.

Conception des déversoirs	Les déversoirs sont nécessaires pour permettre le passage contrôlé des écoulements de crue qui traversent le parc à résidus. Une défaillance de ceux-ci peut entraîner une érosion importante et, dans le pire des cas, la rupture du barrage. Les facteurs à prendre en compte pour la conception d'un déversoir de longue durée de vie sont les suivants : • Il faut éviter d'utiliser des structures de décantations et des ouvrages de vidange de fond (enterrés) pour la fermeture à cause des risques à long terme de dégradation du béton, de dommages sismiques, de changements dans les contraintes appliquées, etc. • Autant que possible, les déversoirs doivent être aménagés de manière à minimiser la hauteur de chute et, donc, réduire l'énergie à disperser. • L'utilisation de béton devrait être évitée pour réduire le risque, à long terme, de dégradation et, donc, d'avoir à entretenir l'ouvrage. Les déversoirs devraient être excavés dans le roc sain ou en utilisant de l'enrochement de carrière compétent. • Des considérations sur le long terme doivent donc tenir compte de la possibilité de sédimentation dans le bassin d'eau libre et des risques géologiques tels que des glissements de terrain ou des éboulements qui pourront réduire la capacité de détournement des eaux de crue. Dans ces cas, le déversoir doit être conçu pour un débit maximal non détourné. Les débits de conception doivent également tenir compte de la probabilité que les canaux de dérivation s'obturent durant la crue nominale à cause de la dégradation naturelle des canaux, de la chute d'arbres ou de débris, d'un blocage par la glace, de l'instabilité des pentes ou de l'érosion. • Les débits de conception doivent aussi être modifiés lorsque l'urbanisation augmente ou que la perte de végétation entraîne une augmentation des coefficients de ruissellement. • Le déversoir doit être positionné de manière à minimiser les géorisques. Lorsqu'un tel positionnement est impossible, le déversoir doit être d'une taille telle qu'un blocage partiel n'ait pas d'incidence néfaste sur l'évacuation des eaux. Sinon, l'aménagement d'un déversoir de secours doit être envisagé. • En hiver, le gel peut bloquer le déversoir par la formation de glace. Cet effet peut être atténué en y aménageant une section à capacité réduite dans laquelle se concentreront les écoulements hivernaux plus faibles qui auront moins tendance à geler. Le gel doit également être pris en considération dans le contexte des changements climatiques qui pourraient altérer les conditions sur le long terme.
Effets à long terme des séismes	Le choix de la période de retour pour les séismes doit prendre en considération la durée de vie après fermeture qui peut atteindre 1000 ans, voire plus. L'approche basée sur la conception durable doit donc être conservatrice et viser la résistance de la digue confrontée à un séisme de grande magnitude.

Effets du drainage minier acide (DMA) et du lessivage neutre des métaux (lixiviation)	Les risques de DMA peuvent être réduits de manière significative en saturant les résidus en eau. Cette solution peut toutefois avoir des effets secondaires tels qu'un relèvement du niveau phréatique qui peut affecter la stabilité de l'ouvrage et augmenter les phénomènes d'infiltration. Pour certains résidus, il est également possible de séparer les sulfures au cours du traitement du minerai et de gérer ensuite séparément les résidus neutres et ceux contaminés. Il est également possible de minimiser les infiltrations sur le long terme en adoptant des techniques de dépôt des résidus appropriées qui visent à tirer un profit maximal des propriétés bénéfiques des résidus ou en utilisant des revêtements ou des couvertures conçues pour réduire les infiltrations ou maintenir la saturation du milieu. Les performances des couvertures ne peuvent néanmoins être assurées sur le long terme à cause des différents processus physiques qui peuvent intervenir. Les changements climatiques peuvent de plus limiter les possibilités de maintenir une couverture saturée sur le long terme.
Changements climatiques	Ces changements varient en fonction de la géographie, certaines régions devant faire face à un temps plus sec tandis que d'autres sont confrontées à des conditions plus humides. Le changement du régime des précipitations peut se traduire par une fréquence plus élevée d'événements violents, ce qui devra motiver une rectification du débit maximum théorique envisagé pour les ouvrages d'évacuation de l'eau. Les changements climatiques pourraient également affecter les vitesses d'évaporation et la configuration des vents, facteurs à prendre en considération pour déterminer l'équilibre hydrique à atteindre après fermeture des barrages et la performance à long terme des couvertures et de la végétation. Plus la période couverte par les données météorologiques concernant le site est longue, plus fiables seront les facteurs hydrologiques utilisés lors de la conception du barrage et plus facile sera l'évaluation des impacts attribuables aux changements climatiques.
Contrôle de l'érosion à long terme	Le terrain réhabilité après fermeture du site ne doit pas être endommagé par l'érosion et la formation de rigoles susceptibles de détruire les couvertures et d'exposer les résidus à l'oxydation et à la dégradation, ce qui pourrait avoir des conséquences environnementales négatives. Une végétation adéquate devra être choisie pour la protection permanente des surfaces. Certaines espèces sont mieux adaptées que d'autres pour résister à des périodes de sécheresse et ont des systèmes racinaires plus à même de protéger la surface du sol contre l'érosion. Généralement, les facteurs supplémentaires suivants doivent être pris en considération : • Dommages occasionnés par la faune ou les incendies; • Érosion éolienne et érosion hydrique; • Effets attribuables aux activités humaines et à la faune (castors). Le contrôle de l'érosion à long terme est nécessaire pour maintenir l'intégrité de la digue. Il ne faut pas hésiter à imiter la nature en concevant une digue géomorphologiquement stable à longue échéance. Le modèle naturel peut aussi être appliqué pour la création d'une topographie naturelle susceptible d'améliorer la stabilité écologique et l'acceptabilité sociale et esthétique du site. Le contrôle de l'érosion à long terme doit tenir compte des aspects suivants : • Le talus du barrage de stériles peut être concave afin de réduire les forces érosives des écoulements qui s'accumulent au pied du barrage.

	• L'utilisation de matériaux compétents, inertes et résistants à l'érosion doit être évaluée en tenant compte du fait qu'elle peut amoindrir l'esthétique du barrage ou réduire les possibilités de mettre en place une couverture végétale. L'utilisation de couvertures végétales doit tenir compte de la stabilité écologique à long terme. • Il faut envisager de prolonger la crête amont de la digue jusqu'à la retenue grâce à des remblais. Une telle modification permet de diminuer les risques d'érosion aval de la crête. • La présence de cours d'eau près du pied de la digue peut nécessiter des mesures de protection contre l'érosion ou une diversion permanente des cours d'eau pour éliminer les risques associés aux éventuelles crues importantes. • À long terme, une couverture « humide » aménagée après fermeture finit toujours par se combler par sédimentation et se transforme alors en couverture sèche, ou possiblement en marécage.
Risques géologiques et autres	La conception durable de la digue doit prendre en compte la possibilité d'occurrences d'évènements isolés mais aussi celle d'une accumulation d'évènements qui peuvent survenir après la fermeture du site. Les dangers potentiels à prendre en compte sont notamment les glissements de terrain, les éboulements, les avalanches et les coulées de débris. Ces phénomènes peuvent être déclenchés par des précipitations abondantes ou des séismes. Les glissements de terrain et les avalanches peuvent donner naissance à une onde de crue dans la retenue d'eau, si ce type de couverture a été retenu lors de la fermeture du parc à résidus. Une revanche supplémentaire peut donc s'avérer nécessaire pour empêcher tout débordement. Les coulées de débris peuvent bloquer les déversoirs ou les canaux de dérivation et aussi entraîner un débordement. Il est possible de minimiser les risques de blocage d'un déversoir en le concevant de manière très conservatrice et en lui conférant une structure très robuste.
Faune	Des animaux peuvent creuser des galeries dans le noyau du barrage ou dans la couverture sèche et nuire ainsi sérieusement à sa performance (perte de la couverture humide ou perforation de la couverture sèche). On peut aussi citer la dégradation de la végétation par surpâturage, qui peut entraîner la perte totale de la couverture végétale et des dommages ultérieurs par érosion.
Flore	Avec le temps, la végétation présente dans le secteur du parc à résidus peut envahir l'ouvrage alors qu'il atteint son équilibre naturel. Les racines imposantes des gros arbres risquent de pénétrer le noyau de la digue ou le système de couverture. Ces arbres peuvent aussi tomber et endommager la digue ou la couverture sèche, ou même bloquer le déversoir. Comme il est impossible, à long terme, d'empêcher la végétation de pénétrer sur le parc à résidus, le plan de fermeture doit tenir compte de cette éventualité. Réciproquement, dans les climats arides ou les régions soumises à des extrêmes climatiques, il se peut que la couverture végétale mise en place lors de la fermeture ne soit pas durable.

Humains	L'impact humain peut inclure une utilisation inappropriée des terres, des activités d'excavation sur les couvertures sèches ou dans les remblais qui composent les digues et le prélèvement de matériaux faisant partie de la structure des déversoirs ou des remblais. Parmi les autres impacts humains possibles, on peut citer le sabotage et le vandalisme. Il est difficile de gérer stratégiquement ce type d'impacts à long terme. Il n'est pas possible d'interdire perpétuellement l'accès au public. Les barrières et autres structures ne durent pas indéfiniment. Cela suppose la présence permanente d'une autorité responsable qui devra garantir et contrôler l'utilisation appropriée des terrains en question.
Érosion éolienne des résidus	L'effet des poussières peut être atténué grâce à la mise en place d'une couverture végétale durable à long terme ou de couvertures jouant le rôle de barrières physiques, telles que des couvertures en gravier grossier ou de roche. Il est nécessaire d'envisager la possibilité et les conséquences d'une éventuelle dégradation de la couverture.