

Titre: Impact de la hausse d'intensité des précipitations extrêmes causée
par les changements climatiques dans la gestion de l'eau de
surface des aires d'entreposage des rejets miniers
Title:

Auteur: Pier-Luc Labonté-Raymond
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Labonté-Raymond, P.-L. (2020). Impact de la hausse d'intensité des précipitations
extrêmes causée par les changements climatiques dans la gestion de l'eau de
surface des aires d'entreposage des rejets miniers [Mémoire de maîtrise,
Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/5229/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5229/>
PolyPublie URL:

Directeurs de
recherche: Thomas Pabst, & Bruno Bussière
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Impact de la hausse d'intensité des précipitations extrêmes causée par les
changements climatiques dans la gestion de l'eau de surface des aires
d'entreposage des rejets miniers**

PIER-LUC LABONTÉ-RAYMOND

Département des génies civil, géologiques et des mines

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

Génie Minéral

Avril, 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

Impact de la hausse d'intensité des précipitations extrêmes causée par les changements climatiques dans la gestion de l'eau de surface des aires d'entreposage des rejets miniers

Présenté par **Pier-Luc LABONTÉ-RAYMOND**

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

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

Elmira HASSANZADEH, présidente

Thomas PABST, membre et directeur de recherche

Bruno BUSSIÈRE, membre et codirecteur de recherche

Aytaç GÖKSU, membre

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d’abord remercier mon directeur de recherche pour son support et son implication tout au long de ce projet de maîtrise. Je remercie aussi mon codirecteur Bruno Bussière pour son apport dans le projet.

Je désire aussi remercier Émilie Bresson, Gabriel Gobeil et Philippe Roy pour leur collaboration et leur expertise concernant tout l’aspect climatique de ce projet.

Je remercie aussi Joel Beauregard, Pierre-Alain Jacques et Yvan Poirier de l’URSTM pour leur aide sur le terrain. Merci à Jeanne Lavoie-Deraspe, Vincent Gozdz et Alexis Couture-Lavoie, de la Mine Canadian Malartic pour leur collaboration essentielle dans ce projet.

Merci à Francis Filion, Aytaç Göksu et Nicolas Pépin de Golder Associés pour leur implication et leur expertise.

Merci également à toute l’équipe et à mes collègues de l’IRME-Polytechnique et du G2H avec qui j’ai partagé des beaux moments tout au long de mon parcours.

RÉSUMÉ

Les opérations minières génèrent une grande quantité de rejets qui sont généralement entreposés en surface dans des parcs à résidus ceinturés de digues ou dans des haldes à stériles. Les instabilités géotechniques des aires d'entreposage sont fréquentes et couramment causées par des épisodes de pluie extrêmes. Or, les changements climatiques entraîneront une augmentation importante de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes au Québec d'ici la fin du siècle, notamment en Abitibi. Les projections climatiques dans cette région prévoient une augmentation moyenne de l'intensité des précipitations maximales probables (PMP) entre 15 et 30% d'ici 2100. Une hausse des précipitations extrêmes pourrait affecter la performance et l'intégrité des infrastructures de gestion de l'eau de surface et augmenter le risque de rupture par débordement en crête et/ou de déversement d'eaux minières dans l'environnement. Les changements climatiques doivent donc être intégrés à la planification de la gestion des eaux minières.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était donc de développer une approche méthodologique permettant d'intégrer les projections climatiques de modèles climatiques régionaux (MRC), dans la conception des infrastructures de gestion des eaux de surface. Cette méthodologie a été appliquée au site de la Mine Canadian Malartic en Abitibi.

Les précipitations et le ruissellement ont tout d'abord été mesurés à la mine Canadian Malartic au cours de l'été et de l'automne 2018, de manière à déterminer les caractéristiques hydrologiques du parc à résidus et de la halde à stériles. Ces mesures de terrain ont été utilisées pour calibrer un modèle numérique de ruissellement et d'écoulement au moyen du code Mike Hydro River.

Les valeurs de PMP sur 24h de printemps et d'été/automne ont été évaluées à l'aide de données climatiques provenant de 11 simulations de MCR couvrant les périodes de 2041-2070 et 2071-2100 pour les scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5. Ces valeurs ont été calculées en utilisant une approche statistique et une approche météorologique. Les hausses de débits de pointe moyennes pour les deux méthodes étaient de 17% pour 2041-2070, et 22% pour 2071-2100 pour le RCP4.5. Elles étaient de 32% pour 2041-2070, et de 44% pour 2071-2100 avec le RCP8.5. Les débits de pointe attendus avec les PMP de printemps étaient plus faibles que pour l'été/automne, mais une PMP de printemps pourrait entraîner un volume total de ruissellement plus important qu'une PMP d'été en raison de la fonte des neiges. La méthodologie développée dans cette étude peut être résumée selon les étapes suivantes :

1. calcul des données climatiques projetées à partir d'un MCR propre au site d'intérêt.
2. caractérisation des bassins versants constitués par les parcs à résidus et les haldes à stériles à partir de mesures d'écoulement dans les fossés collecteurs.
3. calibration et validation d'un modèle numérique d'écoulement reproduisant le ruissellement lors des événements extrêmes.
4. extrapolation de ce modèle pour les différentes crues de projet selon le niveau de risque des infrastructures.
5. dimensionnement des infrastructures de gestion des eaux de surface en fonction des débits de pointe et des volumes de ruissellement totaux calculés.

La méthodologie développée dans cette étude pourrait permettre, à partir de projections climatiques propres au site étudié, de données de terrain et de simulations numériques, de dimensionner de manière résiliente face aux événements extrêmes les infrastructures de gestion de l'eau de surface des aires d'entreposage des rejets miniers.

ABSTRACT

Mine operations generate large quantities of solid waste, which are generally stored on surface in tailings ponds surrounded by dikes or in waste rock piles. Geotechnical instabilities of storage facilities are frequent and commonly caused by extreme rainfall events. Climate change is expected to significantly increase the intensity and frequency of extreme precipitation in Quebec by the end of the century, including in Abitibi. Climate projections in this region predict an average increase of the intensity of maximum probable precipitation (PMP) between 15 and 30% by 2100. An increase in PMP could affect the performance and integrity of the surface water management infrastructure and increase the risk for overtopping and dam failure as well as the discharge of mine water to the environment. Climate change must therefore be integrated in the design of surface water infrastructure at an early stage.

The main objective of this master's project was therefore to develop a methodological approach to integrate climate projections from regional climate models (RCM), into the design of surface water management infrastructure. This methodology was applied to the Canadian Malartic Mine site located in Abitibi.

Precipitation and runoff were first measured at the Canadian Malartic mine during the summer and fall of 2018, to determine the hydrological characteristics of the tailings storage facility and the waste rock pile. These field measurements were then used to calibrate a rainfall-runoff model using Mike Hydro River software.

Spring and summer/fall 24-h PMP values were calculated using climate data from 19 RCM simulations covering 2041-2070 and 2071-2100 periods, both for RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios. PMP were calculated using a statistical approach and a meteorological approach. The average peak discharge in ditches increased with both methods by 17% for 2041-2070, and by 22% for 2071-2100 for RCP4.5. The increase was 32% for 2041-2070, and 44% for 2071-2100 with the RCP8.5 scenario. The expected peak discharge associated with the spring PMP was lower than for the summer/fall, but a spring PMP could cause a greater total runoff volume than a summer PMP because of snowmelt.

The methodology developed in this project can be summarized according to the following steps:

1. calculation of climate data projected from a regional climate model and adapted to the site of interest.
2. characterization of the hydrological properties of the watersheds on site (including the tailings ponds and the waste rock piles) using discharge measurements in collector ditches.
3. calibration and validation of a numerical model to simulate runoff during rainfall events.
4. extrapolation of this model for the different project floods depending on the risk associated with each infrastructure.
5. design of surface water management infrastructure according to peak flows and calculated total runoff volumes.

The methodology developed in this study could help design surface water management infrastructure for the mine waste storage facilities that are resilient to extreme precipitation events, based on climate projections specific to the studied site studied, field data and numerical simulations.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XXI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.1.1 Gestion de l’eau de surface sur les sites miniers	2
1.1.2 Règlementation en vigueur au Québec.....	2
1.2 Objectifs du projet de recherche.....	5
1.3 Principales retombées du projet et originalité	6
1.4 Contenu du mémoire	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	8
2.1 Gestion et restauration des sites d’entreposage de rejets miniers	8
2.1.1 Roches stériles.....	8
2.1.2 Résidus miniers	8
2.1.3 Restauration des aires d’entreposage	8
2.1.4 Stabilité des aires d’entreposage	9
2.2 Changements climatiques et précipitations	10
2.2.1 Scénarios d’émissions	10

2.2.2	Modélisations climatiques.....	11
2.2.3	Changements climatiques attendus au Québec	13
2.3	Infiltration et écoulement de l'eau en surface	14
2.3.1	Taux et capacité d'infiltration	14
2.3.2	Écoulement en surface et ruissellement	15
2.4	Précipitations	18
2.4.1	Hyétogramme	19
2.4.2	Hydrogramme.....	20
2.4.3	Précipitation maximale probable (PMP)	24
2.4.4	Écoulement en surface	24
2.5	Simulations numériques	30
2.5.1	Utilisation des simulations numériques dans le domaine minier et pour l'évaluation des effets des changements climatiques	30
2.5.2	Mike Hydro River	31
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	34
3.1	Description du site de la Mine Canadian Malartic	34
3.1.1	Historique du site	34
3.2	Suivi des débits et hauteurs d'eau dans les fossés collecteurs	36
3.2.1	Installation des capteurs	37
3.2.2	Bassin versant Sud	40
3.2.3	Bassin versant Sud-Est.....	41
3.3	Simulations numériques	42
3.3.1	Bassins versants.....	42
3.3.2	Fossés collecteurs	43
3.3.3	Calibration du modèle numérique	44

3.3.4	Données météorologiques et climatiques	46
3.3.5	Simulation des PMP d'été/automne	50
3.3.6	Simulations des PMP d'hiver	51
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SURFACE WATER MANAGEMENT ON TAILINGS STORAGE FACILITIES : A CASE STUDY IN ABITIBI REGION (QUEBEC, CANADA).....		
4.1	Abstract	53
4.2	Introduction	54
4.3	Methodology	56
4.3.1	Site description.....	56
4.3.2	Catchment characteristics.....	56
4.3.3	Monitoring.....	57
4.3.4	Numerical simulations and calibration procedure.....	58
4.3.5	Climate data.....	59
4.3.6	Snowmelt simulation.....	64
4.4	Field and numerical results	65
4.4.1	Measured rainfall and runoff.....	65
4.4.2	Numerical simulation of surface hydrology during summer 2018	68
4.4.3	Summer/fall PMP simulations	72
4.4.4	Spring PMP and snow cover meltdown simulations.....	74
4.5	Results analysis and discussion.....	75
4.5.1	Monitoring and calibration.....	75
4.5.2	Impact of RCP scenarios on PMF	77
4.5.3	Impact of snowmelt on PMF.....	78
4.5.4	Synthesis of the proposed methodology.....	78

4.6	Conclusion.....	79
4.7	Acknowledgements	80
4.8	References	80
CHAPITRE 5 ANALYSES PARAMÉTRIQUES ET RÉSULTATS ADDITIONNELS		86
5.1	Analyses paramétriques.....	86
5.1.1	Coefficient n de Manning.....	86
5.1.2	Saturation initiale du stockage en surface	87
5.1.3	Taux d'évaporation	88
5.1.4	Capacité de stockage en surface.....	90
5.2	Conclusions sur les analyses paramétriques.....	92
5.3	Mesures de conductivité électrique spécifique.....	92
CHAPITRE 6 SYNTHÈSE, DISCUSSION ET CONCLUSIONS		95
6.1	Synthèse de l'étude.....	95
6.2	Discussion	97
6.3	Conclusions et recommandations.....	100
RÉFÉRENCES.....		102
ANNEXE		117

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Coordonnées de localisation des capteurs des Stations de mesure. UTM NAD 83, Zone 17.....	38
Tableau 4.1 : Calculated PMP at Canadian Malartic Mine site for reference period and future periods (2041-2070 and 2071-2100) using meteorological and statistical method.	63
Tableau 4.2 : Monthly rainfall and number of days with over 5 mm of rain during monitoring period compared to nearest meteorological station (Val d'Or A) monthly mean during reference period (1971-2000).....	66
Tableau 4.3 : Watershed properties used in the NAM rainfall-runoff model. Watershed location is shown in Figure 4.1.	71
Tableau 4.4 : Calculated total runoff volume over the 7 days simulation and peak discharges for statistical and meteorological PMP for reference period, 2041-2070 and 2071-2100 periods using RCP4.5 and 8.5 at North Measuring station.	73
Tableau 4.5 : Calculated total runoff volume over the 7 days simulation and overflow volumes for statistical and meteorological PMP for reference period, 2041-2070 and 2071-2100 periods using RCP4.5 and 8.5 at South Measuring station.	74
Tableau 4.6 : Calculated peak discharges at North Measuring station for 2071-2100 RCP8.5 PMP varying the Overland flow runoff coefficient parameter using the meteorological method. The value obtained in the calibration process was 0.71.	76
Tableau 5.1 : Niveaux d'eau maximums simulés lors du débit de pointe ($4.98 \text{ m}^3/\text{s}$) à la Station de mesure Nord pour une PMP de 158 mm en fonction du coefficient n de Manning. La valeur calibrée dans cette étude était $n = 0,03$	87
Tableau 5.2 : Débits de pointe et ruissellement total simulés en fonction du degré de saturation initiale du stockage en surface, à la Station de mesure Nord pour une PMP de 158 mm. Le stockage en surface a été fixé à 20 mm.	88
Tableau 5.3 : Débit de pointe simulé pour 4 événements majeurs en fonction du taux d'évaporation (en %), par rapport aux valeurs utilisées pour 2018. L'écart moyen des débits de pointe dans	

le fossé collecteur Nord pour les 4 événements et le total d'eau ruisselée sur les bassins NW et N, pour l'ensemble de la période (21 juin au 31 octobre), sont aussi présentés.89

Tableau 5.4 : Débit de pointe simulé pour 4 événements de précipitation majeurs en fonction de la capacité de stockage en surface. L'écart moyen des débits de pointe pour les 4 événements et le total d'eau ruisselée sur l'ensemble de la période (21 juin au 31 octobre) sont aussi présentés.91

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Évolution des émissions de CO ₂ selon les différents scénarios RCP (tiré de IPCC, 2014).....	11
Figure 2.2 Profil de teneur en eau simplifié lors d'un événement typique d'infiltration (les différentes zones caractéristiques sont indiquées; tiré de Hillel, 1998).	14
Figure 2.3 Distribution d'une pluie synthétique de 24 heures de type II (adapté de NRCS, 2007).	19
Figure 2.4 : Principales composantes d'un hydrogramme (adapté de Viessman et al., 1996).	20
Figure 2.5 Comparaison d'un hydrogramme triangulaire avec un hydrogramme adimensionnel pour un FDM = 0,2083 (tiré de NRCS, 2007).	23
Figure 2.6 Exemple de canal jaugeur installé dans un fossé (tiré de Tullis & barfuss, 2009)	25
Figure 2.7 Exemple de déversoir avec une ouverture en V (tiré de Buytaert et al., 2014)	26
Figure 2.8 : Coefficients n de Manning pour des canaux stables sans végétation (Tiré de Phillips & Tadayan, 1998).	28
Figure 2.9 Structure du calcul de ruissellement du modèle NAM. Les équations du calcul de ruissellement en surface, de ruissellement hypodermique et de débit de base sont aussi présentées (Adapté de DHI, 2002)	33
Figure 3.1 : Halde à stériles et parc à résidus de la Mine Canadian Malartic. La localisation des stations de mesure est indiquée par des étoiles rouges, les fossés sont indiqués en bleu. Les bassins versants sont identifiés en brun (Photo tirée de Google Earth, 2017).	36
Figure 3.2 : Capteur amont de la Station de Mesure Nord installé dans un fossé collecteur sur le site de la Mine Canadien Malartic (Station de mesure Nord). La chaudière orange remplie de roches permettait de maintenir le tube crépiné (noir). Le capteur de pression d'eau était placé à l'intérieur du tube. Le sceau et le tube étaient perforés afin de permettre l'écoulement de l'eau.	38
Figure 3.3 : Fossé collecteur au sud du bassin versant NW. Les pentes de la halde mixte sont visibles sur la droite de la photo.	39

- Figure 3.4 : Station de mesure Nord, deux capteurs sont installés dans les chaudières orange alors qu’une troisième (au centre de la photo) est placée à l’air libre et mesure la pression atmosphérique. L’emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne dans le coin supérieur gauche. La flèche jaune indique la direction de l’écoulement.40
- Figure 3.5 : Station de mesure Sud, située en aval de la jonction des fossés Ouest 1 et Ouest 2 (à droite de la photo) deux capteurs sont installés dans les chaudières orange. L’emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne dans le coin supérieur gauche. La section est rectiligne et située tout juste avant une chute significative du profil du fossé menant au Bassin SW (à gauche sur la photo). La flèche jaune indique la direction de l’écoulement.41
- Figure 3.6 : Portion amont du Fossé collecteur Sud excavé dans le roc.42
- Figure 3.7 : Station de mesure du Sud-Est. Le fossé est chargé de sédiments, la pente est presque nulle et le fossé est beaucoup plus large que pour les stations Nord et Sud. L’emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne à droite.42
- Figure 3.8 : Changements projetés des précipitations et températures pour la région de Malartic (région agrandie) par MRCC5 et CMIP5. Les variations sont établies par rapport à la période de référence 1970-2000 pour RCP4.5 et 8.5 à l’horizon 2080. Les simulations des MCG utilisés par CMIP5 sont BNU-ESM, INM-CM4, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-LR, NorESM1-M, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS et IPSL-CM5A-LR (tiré de Gobeil, 2019).48
- Figure 4.1 : Waste rock pile and tailings storage facility at Canadian Malartic Mine. Locations of the measuring stations are indicated with red stars. Ditches are indicated in blue. Watersheds are also identified with brown lines (photo from Google Earth, 2017).57
- Figure 4.2 : Dispersion chart of CRCM5 and CMIP5 climate projections compared to the 1970-2000 reference period (adapted from Gobeil, 2018).61
- Figure 4.3 : SCS Type II rainfall distribution of PMP simulated in this study (adapted from NRCS, 2007).64
- Figure 4.4 : Measured rainfall from June 20 to October 31 at Canadian Malartic Mine weather station. Four major events (precipitation > 35 mm/d) are identified (also see Figure 4.5).66

- Figure 4.5 : Time distribution of 4 major rainfall events measured during summer 2018 at Canadian Malartic Mine. The horizontal scale is the same for all four rainfall events (total length = 33 hours). Dashed lines show the rainfall duration used for calibration.....67
- Figure 4.6 : Observed (red line) and simulated (green line) water levels (masl) and observed daily rainfall (black bars) at a) North Measuring station and b) South Measuring station.70
- Figure 4.7 : Water elevation at North (a) and South (b) Measuring station following Reference period PMP using statistical (294 mm) and meteorological (128 mm) method. Day 1 corresponds to the beginning of the precipitation. Arrows show peak discharge and (a) total runoff volume and(b) total runoff volume and overflow during the 7 days simulation.....72
- Figure 4.8 : 2071-2100 simulated spring and summer/fall PMF using meteorological method and RCP8.5 at North Measuring station. PMP is applied in the middle of day 2, when runoff from snowmelt is maximal.....75
- Figure 5.1 : Élévation et conductivité électrique spécifique de l'eau à la Station de mesure Sud pendant la période d'instrumentation (20 juin-31 octobre). La hauteur de pluie quotidienne entraînant les baisses de conductivité électrique spécifiques est indiquée (flèches noires)...94

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire [L^2]
A_m	Aire mouillée [L^2]
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
C	Coefficient de ruissellement de la méthode rationnelle [-]
CC	Changement climatique
CCCSN	<i>Canadian Climate Change Scenario Network</i>
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CMP	Crue maximale probable
CN	Curve Number [-]
C_{snow}	Coefficient de fonte [$L \cdot T^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]
DMA	Drainage minier acide
DUH	Somme des fractions (q_i/q_p) de l'hydrogramme adimensionnel [-]
e	Erreur absolue [-]
EAM	Erreur absolue moyenne [-]
FDM	Facteur de décharge maximale de l'hydrogramme unitaire [$L^3 \cdot T^{-1}$]
g	Accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$) [$L \cdot T^{-2}$]
GCM	General circulation model
GES	Gaz à effet de serre
GHG	<i>Greenhouse gas</i>
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat
h_f	Charge hydraulique au front de mouillage [L]
H_{RU}	Hauteur de ruissellement [L]
i	Intensité d'une averse [$L \cdot T^{-1}$]

I_a	Infiltration/Perte initiale (mm)
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
INRS	Institut national de la recherche scientifique
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i>
K	Coefficient de transport du canal d'écoulement (m^3/s)
k_p	Coefficient de perte d'énergie de la méthode décharge pente-section [-]
K_m	Facteur de fréquence de la méthode de Hershfield [-]
K_w	Conductivité hydraulique de la zone mouillée [$L \cdot T^{-1}$]
L	Distance entre deux points de mesure pour la méthode décharge pente-section [L]
L_f	Profondeur du front de mouillage [L]
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MAE	<i>Mean absolute error</i> [-]
MCG	Modèle de circulation générale
MCR	Modèle climatique régional
MRCC	Modèle régional canadien du climat
MTQ	Ministère des Transport du Québec
n	Coefficient n de Manning [$T \cdot L^{-1/3}$]
n	Nombre d'observations d'un échantillon [-]
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
P	Hauteur de précipitation (mm)
PCIC	<i>Pacific Climate Impacts Consortium</i>
P_{event}	Événement majeur de pluie selon la méthode de Clavet-Gaumont [L]
P_m	Périmètre mouillé [L]

$P_{\max}$	Pluie maximisée selon la méthode de Clavet-Gaumont [L]
PMF	<i>Probable maximum flood</i>
PMP	Précipitation maximale probable
PW_{100}	Valeur mensuelle d'eau précipitable 1:100 ans selon la méthode de Clavet-Gaumont
Pw_{event}	Eau précipitable selon la méthode de Clavet-Gaumont
q_i	Débit instantané [$L^3 \cdot T^{-1}$]
q_p	Débit de pointe [$L^3 \cdot T^{-1}$]
Q_s	Ruissellement de la fonte du couvert neigeux [$L \cdot T^{-1}$]
R	Hauteur de ruissellement (mm)
r_h	Rayon hydraulique [L]
r	Facteur de maximisation de la méthode de Clavet-Gaumont
RCM	<i>Regional climate model</i>
RCP	<i>Representative concentration pathways</i>
S	capacité d'emmagasinement de la méthode SCS-CN
s	pente de l'écoulement [$L \cdot L^{-1}$]
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
S_f	Friction de pente (m)
SI	Système international
S_n	Écart-type [-]
t	Temps [T]
T_{DUH}	pas de temps de l'hydrogramme adimensionnel [T]
T_m	Température moyenne [$^{\circ}C$]
T_p	Temps de pointe [T]
TSF	<i>Tailings storage facilities</i>

URSTM	Unité de recherche et de service en technologie minérale
V	Vitesse d'écoulement [$L \cdot T^{-1}$]
v_i	Taux d'infiltration de l'équation de Green & Ampt [$L \cdot T^{-1}$]
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
$\bar{X}_n$	Moyenne annuelle de pluie maximale sur 24 heures [L]
Z	Élévation de l'eau dans le canal d'écoulement (m)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Sections arpentées des fossés collecteurs	117
--	-----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'industrie minière au Québec génère actuellement plus de 16 000 emplois, répartis sur 25 sites miniers actifs (Institut de la statistique du Québec, 2019; MERN, 2019), et le secteur devrait continuer de se développer pour atteindre 33 sites en opération d'ici 2025 (CSMO Mines, 2015). L'industrie minière représente donc une part importante de l'économie de la société québécoise. Cependant, elle est aussi la source de nombreux défis environnementaux. En particulier, elle génère d'importantes quantités de rejets, notamment les résidus miniers (ou rejets de concentrateurs) qui sont le plus souvent entreposés en surface dans des cellules d'entreposage ceinturées de digues (Aubertin et al., 2015). La gestion des eaux de surface (provenant essentiellement des précipitations) pose de nombreux défis techniques. En effet, les accumulations d'eau en surface doivent être évacuées de manière à éviter les débordements en crête qui pourraient entraîner la rupture des digues. Ces eaux doivent ensuite être captées puis traitées, avant d'être éventuellement rejetées vers l'environnement ou réutilisées dans les opérations.

Les critères de conception des infrastructures de gestion d'eau de surface (p.ex. déversoirs, fossés collecteurs, bassins collecteurs) sont généralement établis en fonction du degré de risque. Ainsi, les fossés collecteurs et les bassins de collecte sont dimensionnés selon l'amplitude des crues résultant d'épisodes de pluie de récurrence allant de 100 ans à 2000 ans. Le réseau d'écoulement des digues, considéré comme un ouvrage plus critique, doit être capable d'évacuer le débit de pointe d'une crue maximale probable (CMP). Présentement, la plupart des infrastructures minières au Canada ont été conçues en considérant que le climat actuel était statique (Pearce et al., 2011). Cependant, les changements climatiques (CC) entraînent une augmentation rapide de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes (GIEC, 2014). Cette tendance risque donc d'augmenter la vulnérabilité des infrastructures minières aux événements de précipitations extrêmes.

1.1.1 Gestion de l'eau de surface sur les sites miniers

Les eaux de ruissellement à l'intérieur des zones d'activités d'un site minier, notamment celles provenant des haldes à stériles et des parcs à résidus, doivent être captées et traitées de manière à respecter des seuils de contamination avant de pouvoir être rejetées dans l'environnement (MDDEP, 2012). La réglementation en place encourage explicitement l'industrie à minimiser les rejets liquides et à recirculer les eaux de procédés, plutôt que d'utiliser de l'eau fraîche. Au Québec, la réglementation oblige également les compagnies minières à installer un réseau de drainage en surface autour des zones d'activités, afin de limiter les risques de contamination de l'environnement (MDDEP, 2012).

Un contrôle étroit de l'écoulement en surface est aussi nécessaire afin de limiter à la fois le risque de rupture de digue et les déversements non contrôlés d'eaux minières dans l'environnement. Les ruptures de digues dans le domaine minier se produisent en effet à une fréquence 10 fois plus élevée que dans les applications de génie civil (Davies et al., 2000). Les déversements de résidus miniers et d'eaux contaminées peuvent aussi être très néfastes pour la faune, la flore et la santé humaine (Schwarz et al., 2009). Les pluies jugées exceptionnelles sont en cause dans 25% des ruptures de digues dans le domaine minier et cette tendance serait à la hausse (Azam & Li, 2010; Rico et al., 2008). L'augmentation anticipée des événements de précipitations extrêmes liée aux CC est donc une préoccupation majeure pour l'industrie minière et les communautés. Les infrastructures de gestion des eaux de surface doivent donc être durables et conçues afin de résister à des événements climatiques extrêmes de manière à minimiser les impacts négatifs sur les populations et l'environnement à proximité (Kemp et al., 2010).

1.1.2 Réglementation en vigueur au Québec

La réglementation québécoise impose que les structures de collecte, d'emmagasiner et de traitement des eaux de surface doivent être conçues pour faire face aux événements de précipitations moyens et extrêmes. La récurrence des crues utilisées pour concevoir les ouvrages de rétention avec retenue d'eau dépend du type de résidus miniers ; elle est généralement de 2000 ans pour les aires d'accumulation de résidus miniers acidogènes,

cyanurés, radioactifs ou à risques élevés, et de 1000 ans pour les autres types de résidus. Les ouvrages de rétention sans retenue d'eau, par exemple les fossés collecteurs, doivent quant à eux être conçus pour gérer une crue de projet de récurrence de 100 ans.

Les ouvrages avec retenue d'eau doivent aussi être en mesure d'évacuer une CMP, définie au Québec comme « La plus forte crue susceptible de se produire en supposant que soient combinées les pires conditions météorologiques et hydrologiques possibles dans la région. » (MDDEP, 2012). Cependant, les méthodes d'estimation de ces crues ne prennent pas en compte les CC et posent généralement l'hypothèse que les conditions climatiques passées sont les mêmes que les conditions climatiques futures. Bien que cette hypothèse soit réfutée (CEHQ, 2015), les méthodes d'extrapolation traditionnelles sont toujours utilisées aujourd'hui, car aucune méthodologie n'est actuellement reconnue pour traiter cette problématique (CEHQ, 2017).

Le 23 mars 2017, l'Assemblée nationale a adopté des modifications à la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) visant notamment à obliger les promoteurs à tenir compte des CC dans leurs projets.

Le ministère a désormais les pouvoirs suivants :

«Lorsqu'il délivre une autorisation, le ministre peut prescrire toute condition, restriction ou interdiction qu'il estime indiquée pour protéger la qualité de l'environnement et pour éviter de porter atteinte à la vie, à la santé, à la sécurité, au bien-être ou au confort de l'être humain, aux écosystèmes, aux espèces vivantes ou aux biens, lesquelles peuvent notamment porter sur: (...) des mesures d'adaptation requises en raison des risques et des impacts anticipés des changements climatiques sur l'activité ou sur le milieu où elle se réalisera. » (Assemblée nationale, 2017).

En d'autres termes, les projets soumis à la LQE doivent donc désormais tenir compte des impacts anticipés des CC, en particulier dans l'estimation des crues de projet utilisées pour le dimensionnement des infrastructures. La directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement mentionne d'ailleurs spécifiquement qu'« il importe de considérer l'intensification des aléas météorologiques dans la conception des projets,

notamment par l'examen de la résilience des projets face aux changements climatiques.» (MDDELCC, 2018).

Ainsi, les plus récents projets miniers soumis au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) ont tous fait état d'une volonté de considérer les CC dans leurs calculs de crues de projet. Néanmoins, la méthodologie utilisée varie beaucoup d'un projet à l'autre et n'est pas toujours basée sur les recherches les plus récentes sur le sujet. Certains projets utilisent par exemple une majoration de 10% des débits de crue de projet (WSP, 2014, 2015b) en s'appuyant sur la méthodologie proposée par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour la fabrication de ponceaux (Gouvernement du Québec, 2004). Un rapport produit par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) pour le Ministère des Transports du Québec (MTQ; Maillhot, 2014) se base sur des simulations climatiques récentes et recommande plutôt l'utilisation d'une valeur de 18 à 20% selon les régions. Dans un autre projet, il est mentionné que le promoteur «prévoit majorer de 4% le design de conception des barrages et des digues» (BAPE, 2013) afin de considérer l'impact des CC, sans cependant mentionner de références ni de détails quant à la méthodologie proposée; les auteurs notent néanmoins qu'aucun modèle régional climatique n'a été utilisé (Mine-Arnaud, 2013). Dans un autre cas, le plan initial de gestion des eaux ne tient pas compte de l'impact des CC, mais le promoteur indique que l'ingénierie de détail inclura une analyse paramétrique tenant compte des projections climatiques à l'horizon 2080 spécifiques à la région (Genivar, 2013). Les références citées dans ce rapport proviennent d'Ouranos (Desjarlais & Blondlot, 2010), ainsi que de deux sites internet canadiens, le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) et le Canadian Climate Change Scenario Network (CCCSN). Enfin, un autre projet soumis récemment au BAPE indique que l'accroissement de la récurrence de la crue de projet de 100 à 1000 ans dans la plus récente version de la directive 019 couvre en partie l'effet des CC (BAPE, 2018). Par ailleurs, la revanche exigée dans le design des barrages et la présence de déversoirs couvriraient, selon les auteurs, les incertitudes liées aux CC. Aucune mesure additionnelle n'a été proposée dans ce cas pour tenir compte des CC.

Il apparaît donc que les plus récents projets d'infrastructure de gestion des eaux dans le domaine minier incluent effectivement l'impact des CC dans leur design, mais que l'approche utilisée varie beaucoup d'un projet à l'autre. Les approches utilisées sont parfois présentées sans référence scientifique, ou sont basées sur des méthodes non adaptées.

1.2 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche était donc de développer une méthodologie visant à intégrer les projections climatiques de précipitations extrêmes dès la phase de conception des systèmes de gestion d'eau de surface dans les aires d'entreposage des rejets miniers. Cette approche a été appliquée au site minier de la Mine Canadian Malartic.

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient les suivants:

- Instrumenter les fossés collecteurs du parc à résidus et de la halde à stériles de la Mine Canadian Malartic;
- Déterminer les caractéristiques hydrologiques des résidus et des stériles de la mine Canadian Malartic;
- Calibrer et valider un modèle numérique représentatif du ruissellement et de l'écoulement de l'eau dans les infrastructures de gestion de l'eau de surface;
- Définir les conditions de précipitations maximales probables (PMP) spécifiques au site de la Mine Canadian Malartic;
- Évaluer numériquement l'influence de l'évolution des précipitations extrêmes d'ici 2100 sur la gestion de l'eau de surface dans les aires d'entreposage des rejets miniers en utilisant différentes périodes et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.
- Proposer une méthodologie intégrant l'impact attendu des changements climatiques sur les précipitations extrêmes dans la gestion de l'eau de surface des aires d'entreposage de rejets miniers.

1.3 Principales retombées du projet et originalité

Les principales retombées de ce projet reposent sur le développement d'une approche d'adaptation aux CC qui n'est pas utilisée dans le domaine minier. Ce projet encourage aussi les projets de caractérisation hydrologique des aires d'entreposage des rejets miniers sur de longues périodes, afin de mieux définir le comportement hydrologique lors d'événements extrêmes. Ces informations sont particulièrement difficiles à obtenir dans le domaine minier puisque les sites sont en constante évolution. Il est aussi rare d'obtenir des données hydrologiques sur de longues périodes, ce qui complique la calibration sur des événements extrêmes, qui sont rarement observés.

L'originalité de l'approche méthodologique présentée dans ce mémoire repose sur les éléments suivants;

- L'application d'une approche hydrologique généralement utilisée à une échelle plus grande à l'échelle d'un site minier.
- Le calcul d'un bilan hydrique d'un site minier sans et avec changement climatique à l'aide de modélisations numériques calibrées sur des mesures de terrain.

1.4 Contenu du mémoire

Ce mémoire comporte 6 chapitres. Le premier chapitre d'introduction est suivi d'une revue de la littérature traitant de la gestion des rejets miniers, des CC, des précipitations, de l'écoulement de l'eau en surface et souterraine, des simulations numériques et de la description du site de la mine Canadian Malartic (Chapitre 2). Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée pour le suivi des fossés collecteurs, l'obtention des données climatiques projetées, ainsi que la calibration et la validation des simulations numériques. Le chapitre 4 est consacré à la présentation des principaux résultats sous forme d'un article scientifique soumis à la revue Journal of Hydrology. Il présente les principaux résultats de terrain, de simulation numérique et l'impact des CC sur le dimensionnement des infrastructures de gestion des eaux de surface. Le chapitre 5 présente certains résultats additionnels non détaillés dans l'article, notamment des analyses paramétriques. Le

chapitre 6 regroupe les principales conclusions de cette étude, et propose des recommandations pour travaux futurs.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Gestion et restauration des sites d'entreposage de rejets miniers

2.1.1 Roches stériles

Les roches stériles proviennent de la roche encaissante et sont extraites afin d'atteindre le minerai. Leur granulométrie est généralement très étalée, avec des tailles de particules qui s'étendent des argiles (< 0.002 mm) jusqu'aux blocs (> 300 mm; Neuner et al., 2013; Smith et al., 2013). Les stériles sont généralement entreposés dans des haldes de grandes dimensions pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de hauteur et s'étendre sur des surfaces de plusieurs dizaines d'hectares (Aubertin et al., 2011). Leur conductivité hydraulique élevée (Ferdosi et al., 2015) et la présence de chemins d'écoulement préférentiels (Neuner et al., 2013) favorisent l'infiltration d'eau plutôt que le ruissellement en surface lors des précipitations (Fretz, 2013). Les vitesses d'écoulement dans les macropores peuvent dépasser quelques mètres par jour (Nichol et al., 2005).

2.1.2 Résidus miniers

Le minerai extrait est concassé et broyé finement pour en extraire les métaux et/ou minéraux économiques. Les résidus miniers constituent la portion rejetée des substances minérales provenant des opérations d'extractions, de préparation, d'enrichissement et de séparation du minerai (MDDEP, 2012). Ils sont généralement transportés hydrauliquement sous forme de pulpe et déposés dans des parcs à résidus ceinturés de digues (James & Aubertin, 2012). Les résidus sont généralement composés de particules de la taille de sables fins ou de silts (Bussiere, 2007). Leur conductivité hydraulique est généralement comprise entre 10^{-8} m/s et 10^{-6} m/s (Bussiere, 2007).

2.1.3 Restauration des aires d'entreposage

L'oxydation des rejets miniers entraînant le drainage minier acide (DMA) représente un enjeu environnemental majeur pour l'industrie minière. La mise en place de recouvrements

permet de réduire l'apport d'eau et/ou d'oxygène aux résidus réactifs et de contrôler ainsi les réactions d'oxydation (Bussière et al., 2004; Demers et al., 2008). Le choix de la méthode de restauration dépend notamment de la minéralogie des résidus, de la disponibilité des matériaux de recouvrement, du climat et de la profondeur de la nappe (Aubertin et al., 2015).

Les barrières à l'oxygène sont souvent considérées comme les plus efficaces pour prévenir la génération de DMA dans les climats humides (Aubertin et al., 2015). L'enneigement permet, par exemple, de limiter l'apport en oxygène aux résidus (Awoh et al., 2013) en raison du faible coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau (Yanful, 1993). Des couvertures monocouches de matériau grossier peuvent être placées sur des résidus saturés. Elles agissent alors comme barrière à l'évaporation tout en favorisant l'infiltration d'eau, contribuant ainsi à conserver le niveau phréatique élevé dans les résidus (Demers et al., 2008). Des couvertures multicouches peuvent enfin être utilisées afin de limiter la migration d'oxygène vers les résidus (Dagenais et al., 2005).

2.1.4 Stabilité des aires d'entreposage

La stabilité des aires d'entreposage repose sur la stabilité des digues ceinturant les cellules d'entreposage de résidus miniers. Les risques les plus importants associés à ces structures sont des ruptures de digues entraînant le déversement d'importants volumes de résidus miniers dans l'environnement ou vers des communautés à proximité. Les ruptures sont notamment causées par les séismes, l'érosion interne, la rupture des fondations, l'instabilité géotechnique, ainsi que les débordements en crête, qui ont souvent lieu lors d'épisodes de précipitations extrêmes (Rico et al., 2008).

Plusieurs déversements survenus au cours des dernières années ont eu des conséquences graves sur la vie humaine ainsi que la faune, notamment l'événement de Baie Mare en 2000, où une fonte des neiges rapide a entraîné la rupture d'une digue d'eau de procédé chargée en cyanure. Ce déversement a causé la mort rapide de la faune aquatique dans les rivières adjacentes, en plus de nombreux animaux (Soldán et al., 2001). Une rupture de digue à la mine Merriespruit en Afrique du Sud, en 1994, a aussi été causée par un épisode

de pluie intense (50 mm en 30 minutes), alors que le niveau d'eau était déjà élevé dans le parc à résidus (Van Niekerk & Viljoen, 2005). Cette rupture a libéré environ 600 000 m³ de résidus miniers, qui se sont déversés jusqu'à la ville de Merriespruit située 300 m en aval, entraînant la mort de 17 personnes (Van Niekerk & Viljoen, 2005). Des ruptures de digues plus récentes, causées par des précipitations extrêmes, ont aussi eu lieu à Machadinho D'Oeste, au Brésil en 2019 (Catapa, 2019) et à Huancapati, au Pérou en 2018 (Roca et al., 2019). Ainsi, les parcs à résidus demeurent très sensibles aux conditions météorologiques extrêmes, qui pourraient augmenter en intensité et en fréquence avec les changements climatiques (GIEC, 2014).

2.2 Changements climatiques et précipitations

Les concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre (GES) comme le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O) ont augmenté respectivement de 40%, 150% et 20% depuis l'ère préindustrielle (IPCC, 2013). Leurs concentrations actuelles dépassent les concentrations les plus élevées observées au cours des 800 000 dernières années, et le rythme d'augmentation au cours du dernier siècle est inégalé depuis 22 000 ans (IPCC, 2013). La présence de ces gaz dans l'atmosphère entraîne un forçage radiatif positif (taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère; GIEC, 2007) et cause une augmentation de l'énergie à la surface de la Terre et dans l'atmosphère, ce qui a comme conséquence le réchauffement de la planète. Ce surplus d'énergie contribue à augmenter le taux d'humidité dans l'atmosphère et à intensifier les épisodes de fortes précipitations (IPCC, 2013).

2.2.1 Scénarios d'émissions

Les profils représentatifs d'évolution de concentration des gaz à effet de serre (RCP, pour Representative Concentration Pathways) sont des scénarios d'évolution des radiations terrestres, exprimées en W/m², à l'horizon 2100 par rapport à l'ère préindustrielle (Moss et al., 2008). Ils sont établis selon la quantité de GES émise selon différents scénarios socioéconomiques déterminés par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC). Dans le 5^e Rapport d'évaluation (GIEC, 2014), le GIEC a proposé quatre scénarios

RCP allant de 2,6 à 8,5 W/m². Par exemple, le scénario RCP2,6 considère un bilan net négatif des émissions des GES à partir de 2070 alors que le scénario RCP8.5 suppose que la croissance de la population et des émissions de GES suivra la tendance actuelle (Figure 2.1; IPCC,2014).

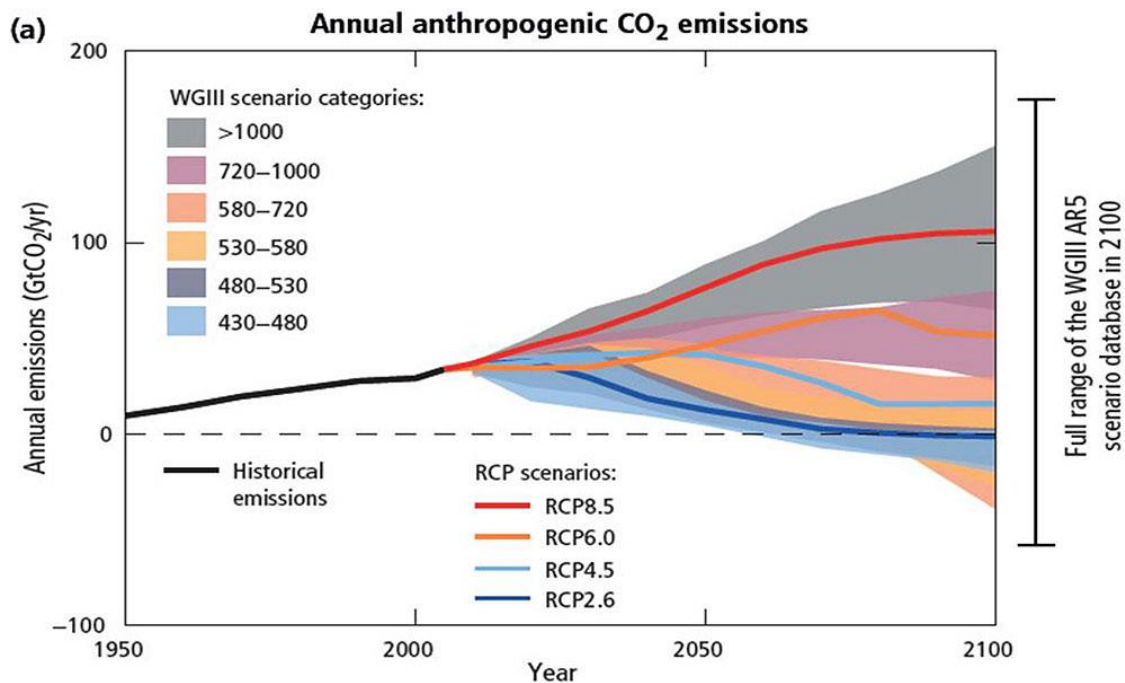


Figure 2.1 : Évolution des émissions de CO₂ selon les différents scénarios RCP (tiré de IPCC, 2014).

2.2.2 Modélisations climatiques

Les modèles numériques de climat appelés Modèles de circulation générale (MCG) font partie des outils communément employés afin de comprendre la dynamique climatique à l'échelle terrestre (Ehret et al., 2012). Ils permettent notamment d'isoler l'impact de différents facteurs naturels et anthropologiques sur le climat. Il s'agit d'une représentation sous forme de grille en trois dimensions des différents phénomènes physiques ayant une influence sur le climat terrestre. Le maillage selon le plan horizontal peut varier de 250 à 600 km, alors que les composantes verticales (atmosphère, cryosphère, océans, surface

terrestre) sont généralement subdivisées en quelques dizaines de couches (IPCC, 2013). Étant donné la taille du maillage, certains phénomènes météorologiques à plus petite échelle spatiale et temporelle (p.ex. les orages convectifs d'été) ne peuvent pas être simulés et sont donc souvent évalués séparément (Ouranos, 2015).

Plusieurs facteurs peuvent affecter la précision des MCG (ARCC, 2014) :

- L'évolution des émissions de GES, qui est fortement liée à des facteurs économiques, technologiques et naturels difficiles à prédire.
- La modélisation simplifiée et la variabilité des processus climatiques.
- La connaissance imparfaite des conditions initiales utilisées dans les modèles climatiques.

Plusieurs méthodes peuvent être employées afin de diminuer l'impact de ces différentes incertitudes sur les résultats de projections climatiques. Par exemple, plusieurs scénarios RCP peuvent être utilisés pour quantifier l'impact des différences entre les projections d'émissions d'ici 2100. Les simulations des MCG peuvent être répétées en utilisant différentes conditions initiales contenues dans la plage d'incertitude. Les ensembles de simulations ainsi créées peuvent ensuite être analysés statistiquement et les résultats des différents modèles comparés. Un résultat moyen a généralement moins de risques de présenter des résultats incorrects (Van der Linden & Mitchell, 2009).

La variabilité naturelle du climat peut aussi être suffisante pour masquer l'impact des changements climatiques à court terme (Charron, 2016). À plus long terme, l'incertitude des modèles repose davantage sur le choix du scénario RCP (Charron, 2016).

2.2.2.1 Diminution d'échelle

Plusieurs éléments peuvent avoir un impact significatif sur le climat à une plus petite échelle spatiale, notamment la topographie, la présence d'étendues d'eau et le couvert végétal (Dimri, 2009; Ma et al., 2008) ; leur impact ne peut toutefois pas être pris en compte dans les MCG. Différentes techniques de réduction d'échelle peuvent cependant être utilisées afin de faire le lien entre les MCG et le climat attendu localement. Le maillage

des MCG peut par exemple être raffiné autour d'une certaine région afin d'améliorer la définition spatio-temporelle. Ces modèles sont appelés modèles climatiques régionaux (MCR) et leur maillage horizontal est généralement compris entre 10 et 50 km. Les valeurs météorologiques obtenues à l'aide des MCG ou des MCR peuvent par la suite être corrigées au moyen de données climatiques observées directement sur le site étudié, afin de tenir compte des tendances locales du climat (Dimri, 2009). Cette approche suppose toutefois que les impacts des CC observés globalement et calculés par les modèles climatiques auront un impact similaire sur le climat local du site à l'étude (ARCC, 2014). Les MCG ont généralement un pas de temps de 24 heures, ce qui permet uniquement d'obtenir des données de précipitations moyennes journalières. L'utilisation de pas de temps plus courts (jusqu'à 6 h) ou d'une méthode de post-traitement peut, par exemple, permettre de représenter de manière plus réaliste la distribution de la pluie lors d'une tempête.

2.2.3 Changements climatiques attendus au Québec

Au Québec, les simulations climatiques prévoient des hausses de température ainsi qu'une augmentation de l'intensité des précipitations (Roy, 2015). Sur l'ensemble du territoire québécois, la hausse attendue des précipitations annuelles maximales de 24h de récurrence de 50 ans varie 7,7 à 26,5% (RCP2.6 et RCP8.5) pour l'horizon 2081-2100 selon l'ensemble des projections du modèle CMIP5 (Zhang et al., 2019). L'impact des changements climatique au Québec n'est toutefois pas uniforme, alors que les régions nordiques, où se trouvent les principales régions minières, seront davantage touchées que le sud de la province (Leduc et al., 2019). Par exemple, les simulations climatiques pour l'Abitibi prévoient des hausses de température moyenne en été entre 3,15 et 5,92°C, selon les scénarios RCP4.5 et 8.5. La hausse relative des précipitations annuelles du 99e centile dans la même région serait comprise entre 13,5% et 22,2% (Roy, 2015).

2.3 Infiltration et écoulement de l'eau en surface

2.3.1 Taux et capacité d'infiltration

L'infiltration de l'eau dans le sol est généralement la principale source de perte de ruissellement en surface (Gray & Norum, 1967). Le taux d'infiltration est défini comme le flux d'eau qui pénètre dans un sol par unité de surface (Hillel & Hatfield, 2005). L'infiltration d'eau est un phénomène dynamique qui tient compte de plusieurs facteurs. L'entrée de l'eau dans les pores des matériaux en surface est causée par la gravité et les forces matricielles (i.e. les forces d'adsorption et de capillarité; Kirkham, 2014). L'eau peut aussi s'infiltrer rapidement en empruntant des chemins préférentiels dans des fissures ou des irrégularités du sol (Hillel, 1998). La présence d'eau à charge constante sur un sol préalablement sec entraîne la création d'une zone saturée de quelques millimètres ou centimètres à la surface (Figure 2.2). Une zone de transmission se développe sous la zone saturée et est caractérisée par une teneur en eau élevée relativement constante. Son épaisseur augmente au cours du temps. La zone de mouillage correspond à la zone de transition autour du front de mouillage. La zone de transmission tend à s'allonger lors du processus d'infiltration à mesure que le front de mouillage migre vers le bas du profil (Hillel, 1998).

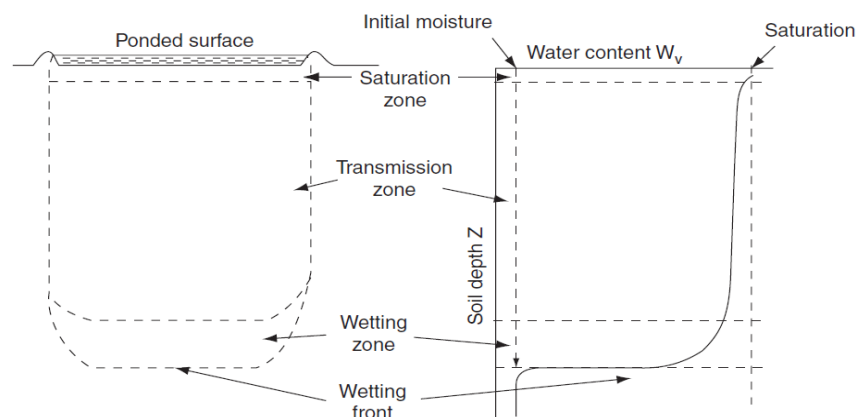


Figure 2.2 Profil de teneur en eau simplifié lors d'un événement typique d'infiltration (les différentes zones caractéristiques sont indiquées; tiré de Hillel, 1998).

Le taux d'infiltration est plus élevé dans les premiers moments, avant l'apparition du front de mouillage puisque c'est à ce moment que le gradient de charge hydraulique est le plus élevé. Il diminue ensuite graduellement jusqu'à atteindre une valeur près de la conductivité hydraulique du sol ou des rejets miniers, lorsque saturé (Miyazaki, 2006). L'équation de Green & Ampt, basée sur l'équation de Darcy, considère l'infiltration de l'eau dans le sol comme l'avancée d'un piston et peut s'écrire (Bouwer, 1986) :

$$v_i = K_w(H_w + L_f - h_f)/L_f \quad [2.1]$$

Où,

v_i : taux d'infiltration [L·T⁻¹]

K_w : conductivité hydraulique de la zone mouillée [L·T⁻¹]

H_w : hauteur d'eau accumulée en surface [L]

h_f : charge hydraulique au front de mouillage [L]

L_f : profondeur du front de mouillage [L]

L'eau provenant des précipitations et tombant sur une surface (p.ex. résidus, roches stériles) s'accumule d'abord en surface dans des dépressions, et s'infiltre graduellement (Viessman et al., 1996). Le ruissellement en surface débute lorsque la quantité d'eau précipitée excède la capacité de stockage en surface et la capacité d'infiltration du sol (Hillel, 1998). Ce surplus d'eau s'écoule à la surface en suivant la topographie, jusqu'à atteindre une première ramification du réseau d'écoulement (généralement une dépression dans la topographie; Horton, 1933). Cette eau poursuit alors son parcours jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

2.3.2 Écoulement en surface et ruissellement

Un bassin versant représente une surface géographique drainée par un cours d'eau principal et par ses tributaires (ROBVQ, 2006). La taille d'un bassin versant peut varier de quelques hectares à des milliers de km². Ces surfaces ne sont généralement pas uniformes, certaines zones pouvant être très perméables alors que d'autres contribuent davantage à un écoulement rapide en surface (Viessman et al., 1996). Le concept de bassin versant n'est

pas limité aux milieux naturels et s'applique aussi aux systèmes de drainage urbain et aux infrastructures de gestion de l'eau de surface dans le domaine minier. Un parc à résidus minier peut ainsi contenir plusieurs bassins versants (cellules de résidus) et des exutoires (déversoirs et fossés de collecte). L'expression de la distribution des débits enregistrés dans les canaux d'écoulement dans le temps peut être représentée par un hydrogramme (NRCS, 2007).

La forme de l'hydrogramme d'un événement de pluie à l'échelle d'un bassin versant peut être influencée par plusieurs facteurs, notamment la densité du réseau de drainage, la forme du bassin, la topographie et la nature de la surface du sol. Un bassin dont le réseau d'écoulement comporte une densité de ramifications élevée aura généralement une réponse plus rapide et intense, puisque le ruissellement en surface rejoindra plus rapidement un canal d'écoulement (Strahler, 1958). De manière similaire, un bassin versant où l'eau a peu de distance à parcourir pour atteindre l'exutoire aura une réponse plus rapide qu'un bassin versant allongé (NRCS, 2007). Enfin, les pentes favorisent un écoulement plus rapide et limitent l'infiltration d'eau (El-Hassanin et al., 1993). Les zones avec de fortes pentes contribueront donc davantage au ruissellement de surface que les zones planes.

La fraction d'eau ruisselée en surface peut être exprimée de manière simpliste en utilisant un coefficient de ruissellement. Dans la méthode rationnelle, par exemple, ce coefficient est considéré constant au cours d'un événement de précipitation. Cette méthode est conçue pour des bassins versants inférieurs à 25 km² (MDDELCC 2017). L'intensité de la pluie est supposée constante et uniforme sur le bassin (Thompson, 2006). Le débit de pointe peut alors être déterminé à l'aide de l'équation suivante (Thompson, 2006) :

$$q_p = 0,00275 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2.2)$$

Où,

q_p : débit de pointe (m^3/s)

C : coefficient de ruissellement [-]

i : intensité de l'averse (mm/h)

A : aire du bassin versant (ha)

La principale limitation de cette méthode est de considérer que les pertes (portion d'eau non ruisselée en surface) d'eau sont constantes tout au long de l'averse, négligeant ainsi le stockage en surface et surestimant la partie ascendante de l'hydrogramme (Guo, 2001).

La méthode du Soil Conservation Service - Curve Number (SCS-CN) permet de déterminer le ruissellement d'un événement de pluie en tenant compte des pertes initiales (NRCS, 2007). Le calcul des pertes initiales et constantes est basé sur le coefficient CN défini selon l'utilisation du sol, le groupe hydrologique, la granulométrie et la conductivité hydraulique saturée (Gagné et al., 2013). Le coefficient CN est généralement compris entre 30 et 100 et est plus élevé pour les sols peu perméables limitant les pertes en surface et par infiltration (Marcus, 1997).

La méthode SCS permet de calculer les pertes et la hauteur de ruissellement en surface pour l'ensemble d'un bassin versant à partir du coefficient CN (NRCS, 2007).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.3)$$

$$I_a = 0.2S \quad (2.4)$$

$$R = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (2.5)$$

Où,

S : capacité d'emmagasinement (mm)

CN: Curve Number [-]

I_a : infiltration/perte initiale (mm)

R: hauteur de ruissellement (mm)

P: Hauteur de précipitation totale (mm)

2.4 Précipitations

Les débits de pointe observés sur les petits bassins versants (généralement pour des études à l'échelle d'une terre agricole ou d'une zone urbaine) sont généralement causés par des épisodes de pluie brefs et intenses, qui ont lieu lors d'événements isolés ou pendant une tempête de plus longue durée (SCS, 1986). Ces épisodes de pluies intenses ont généralement une étendue limitée. La distribution temporelle des précipitations a aussi un impact important sur le débit de crue observé (Máca & Torfs, 2009) et l'utilisation de valeur quotidienne peut contribuer à sous-estimer les débits de pointe attendus (Alfieri et al., 2008; Bezak et al., 2018)

Le Natural Resources Conservation Service (NRCS) a développé quatre distributions synthétiques de précipitations sur 24 heures lors d'événements de tempêtes (I, IA, II et III; NRCS, 2015). Ces données ont été compilées pour les États-Unis, à partir de courbes d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF) fournies par le National Weather Service (NWS). Ces quatre distributions synthétiques considèrent que la distribution des précipitations est généralement concentrée sur une courte durée et elles sont utilisées afin de représenter la distribution la plus probable des pluies selon différentes zones climatiques. Par exemple,

dans le cas d'une pluie de Type II répartie sur 24 heures, plus de 50 % de l'eau est précipitée sur une période de 2 heures, il s'agit de la courbe avec les pointes de taux de précipitations les plus intenses (Figure 2.3). La distribution synthétique de type II est généralement utilisée au Québec et au Canada (à l'exception de la région de la côte du Pacifique) par les concepteurs de systèmes de drainage (Corrugated Steel Pipe Institute, 2007; Rivard, 2011).

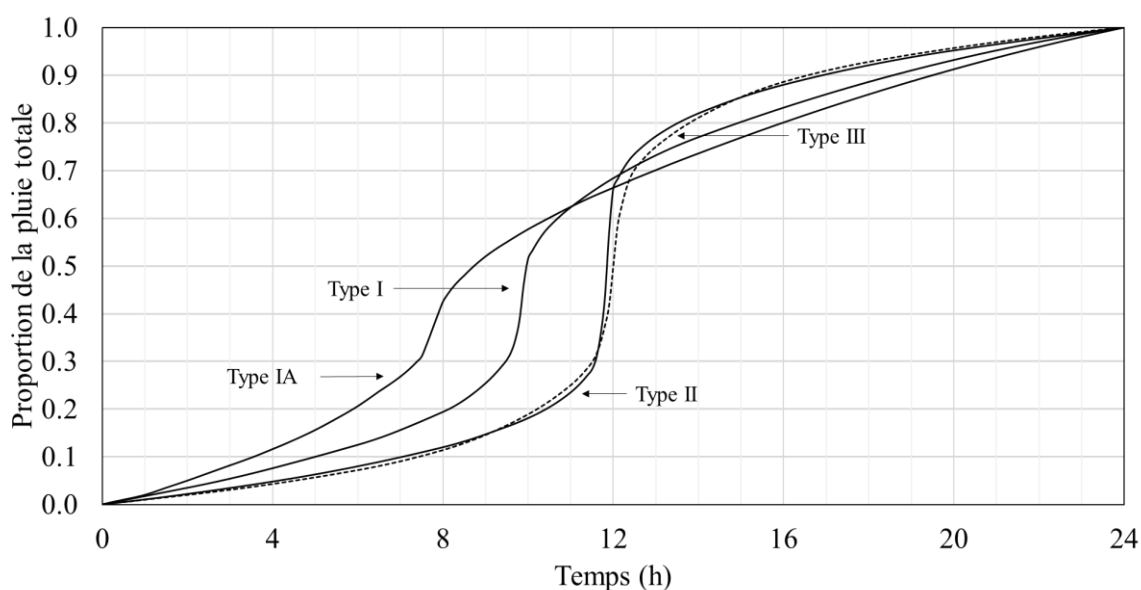


Figure 2.3 Distribution d'une pluie synthétique de 24 heures de type II (adapté de NRCS, 2007).

2.4.1 Hyétoqramme

Un hyétoqramme représente l'intensité de la pluie en fonction du temps (Brutsaert, 2005) et peut être tracé pour un événement de précipitation donné ou bien représenter une série d'événements distincts. L'analyse de nombreux hyétoqrammes provenant d'une même région ou d'une même station météorologique peut permettre de déterminer la distribution moyenne d'événements de pluie de différentes durées (Williams-Sether et al., 2004).

2.4.2 Hydrogramme

Un canal d'écoulement est défini comme un cours d'eau naturel ou artificiel à surface libre où l'eau s'écoule (USDA, 1954). L'écoulement qui s'y concentre est généralement le résultat de l'addition de quatre composantes (Figure 2.4) : le débit de base, le ruissellement en surface, l'écoulement hypodermique et les précipitations directes dans le canal d'écoulement (Viessman et al., 1996).

Le débit de base correspond au débit qui aurait été observé s'il n'y avait pas eu de précipitations et est le résultat de l'alimentation par la nappe phréatique. Le ruissellement en surface correspond à l'eau qui n'est pas infiltrée ni retenue en surface par les irrégularités ou la végétation. L'écoulement hypodermique correspond à la fraction d'eau qui est infiltrée de manière superficielle et qui s'écoule latéralement jusqu'à rejoindre rapidement les canaux d'écoulement en surface (Viessman et al., 1996). La portion provenant des précipitations directes correspond aux précipitations arrivant directement dans les canaux d'écoulement en surface. La décrue peut être plus lente que la crue, à cause de l'augmentation de l'apport d'eau souterraine dans le réseau d'écoulement suivant un événement de pluie ramenant graduellement le débit de base à sa valeur initiale (Tallaksen, 1995). Cela rend particulièrement difficile la séparation des hydrogrammes lorsque des événements de précipitations se succèdent (Crouzet et al., 1970; Sklash & Farvolden, 1979).

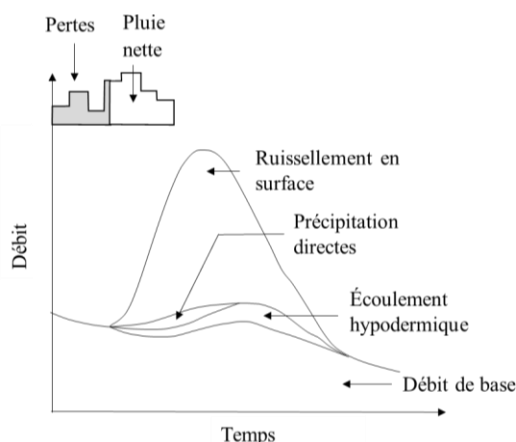


Figure 2.4 : Principales composantes d'un hydrogramme (adapté de Viessman et al., 1996).

2.4.2.1 Hydrogramme unitaire

Différentes méthodes peuvent être utilisées afin de prédire l'hydrogramme d'un événement de pluie. Les méthodes de l'hydrogramme unitaire, de l'hydrogramme adimensionnel et l'hydrogramme triangulaire sont couramment employées en Amérique du Nord (NRCS, 2007).

L'hydrogramme unitaire permet de prédire le ruissellement causé par une pluie nette de hauteur d'eau déterminée, d'intensité constante, sur une durée donnée (Brutsaert, 2005). Cette méthode de calcul est jugée appropriée pour les bassins versants réguliers et homogènes et suppose une répartition égale de la pluie sur tout le bassin (Mockus, 1957). Il s'agit d'un modèle linéaire qui peut être utilisé indépendamment de la quantité de précipitation nette et pour tout intervalle de temps. Il est basé sur le principe d'invariance (une même distribution de pluie nette dans le temps produira le même ruissellement pour un même bassin versant) et le principe de superposition (les hydrogrammes engendrés par une distribution quelconque de pluie peuvent être superposés et le ruissellement est donc proportionnel à la quantité de pluie nette; Dooge, 1959) .

L'hydrogramme adimensionnel est une variante de l'hydrogramme unitaire et exprime les décharges en termes de fractions de la décharge maximale (q_i/q_p) en fonction du temps écoulé par rapport au temps de pointe (t/T_p). Le temps de pointe représente le délai entre le début des précipitations nettes et l'observation de la décharge maximale. La distribution de l'hydrogramme adimensionnel dépend uniquement du facteur de décharge maximale (FDM; NRCS, 2007) :

$$FDM = \frac{645,33}{\sum DUH * \Delta T_{DUH}} \quad (2.6)$$

Où,

$\sum DUH$: somme des fractions (q_i/q_p) de l'hydrogramme [-]

ΔT_{DUH} : pas de temps de l'hydrogramme [T]

Le FDM généralement utilisé est 0,2083 (McCuen & Bondelid, 1983) exprimé selon les unités du système international (SI), et provient d'une compilation de nombreux hydrogrammes de caractéristiques différentes (Mockus, 1957). En pratique, cette valeur

peut cependant varier de 0,043 à 0,258 selon le bassin versant. Les valeurs plus faibles correspondent aux terrains plats et sont associées à des hydrogrammes plus allongés et des débits de pointe moins importants (NRCS, 2007). Le débit de pointe (q_p) peut être déterminé au moyen de l'équation suivante (NRCS, 2007) :

$$q_p = \frac{FDM * H_{ru} * A}{T_p} \quad (2.7)$$

Où,

q_p : débit de pointe [$L^3 \cdot T^{-1}$]

H_{ru} : hauteur de ruissellement [L]

A : aire du bassin versant [L^2]

T_p : temps de pointe [T]

L'hydrogramme triangulaire est une simplification de l'hydrogramme adimensionnel avec un FDM de 0,2083. Il présente le même volume d'eau total ruisselée et le même débit de pointe que l'hydrogramme adimensionnel, mais la distribution du ruissellement dans le temps est simplifiée et prend la forme d'un triangle (Figure 2.5). L'hydrogramme triangulaire a une pente ascendante et descendante constante, alors que la courbe d'un hydrogramme est généralement parabolique. Le retour au débit de base initial est plus rapide qu'en pratique puisque la forme triangulaire néglige le retour vers le débit de base qui se fait généralement plus lentement. Néanmoins, ce modèle simplifié est couramment utilisé pour des applications urbaines ou sur de petits bassins versants (Debevoise, 1988; Gribbin, 2013). Le calcul des différentes composantes repose sur le temps auquel le débit de pointe est atteint, représenté par une unité de temps (T_p) et le débit maximal à ce point, représenté par une unité de décharge (q_p ; NRCS, 2007).

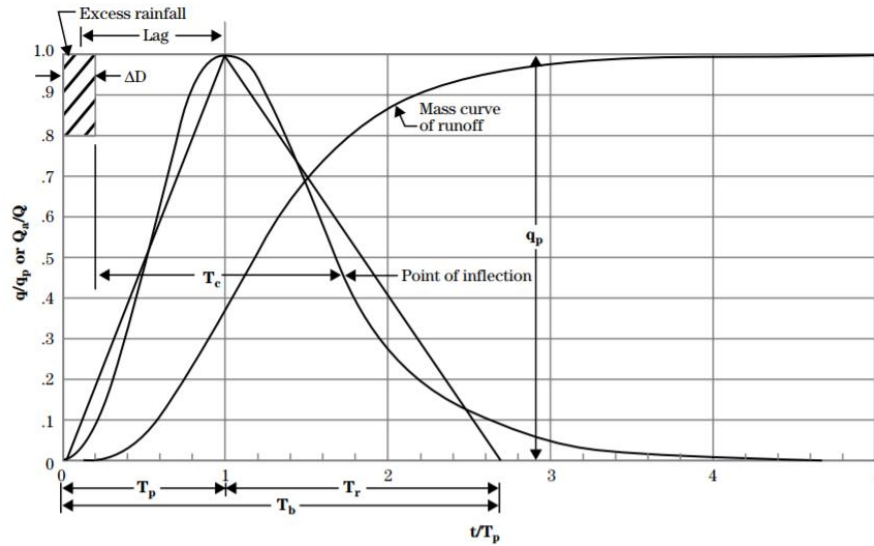


Figure 2.5 Comparaison d'un hydrogramme triangulaire avec un hydrogramme adimensionnel pour un $FDM = 0,2083$ (tiré de NRCS, 2007).

La méthode de l'hydrogramme unitaire est présentement suggérée par les gouvernements québécois et américains (NRCS, 2007; Rivard, 2011) afin de calculer le ruissellement des événements extrêmes de pluie. Cette méthode repose sur l'hypothèse que l'ensemble de l'eau mesurée à l'exutoire d'un bassin versant provient de l'eau de pluie nette ruisselée en surface pour l'événement étudié, et que l'infiltration se fait uniformément à l'échelle du bassin versant. Or, plusieurs essais de traceurs ont démontré que l'apport d'eau souterraine constituait généralement la majorité de la décharge observée, particulièrement au début du ruissellement (p.ex. Crouzet & al., 1970). Les processus de suintement peuvent aussi se produire plus rapidement que l'écoulement de surface (Beven, 2011). L'infiltration de nouvelle eau dans la zone non saturée peut en effet entraîner une augmentation rapide des gradients de pression dans le sol (onde de pression), favorisant l'écoulement vers le réseau d'eau de surface (Beven, 2011). L'utilisation seule de méthodes de calcul d'hydrogramme comme ceux présentés ci-haut ne permet donc pas d'évaluer l'apport en eaux souterraines dans le ruissellement en surface puisqu'elle considère le débit de base indépendant des précipitations.

2.4.3 Précipitation maximale probable (PMP)

La réglementation au Québec impose à l'industrie minière la mise en place d'un déversoir d'urgence dimensionné afin d'évacuer une CMP (MDDEP, 2012). La CMP représente la crue la plus importante qui pourrait se produire à un endroit et selon une échelle de temps déterminée, en tenant compte des processus météorologiques et hydrologiques (Ouranos, 2015). Elle peut être liée à différents facteurs combinés, notamment la fonte des neiges, le niveau de la nappe et des réservoirs d'eau dans un même bassin versant. Le calcul de la CMP ne tient généralement pas compte de l'évolution du climat, qui peut affecter significativement sa valeur (Ouranos, 2015).

La CMP est généralement calculée à partir de la précipitation maximale probable (PMP). La PMP représente la plus grande accumulation de précipitation météorologiquement possible pour une durée, à un endroit et à un temps donnés, sans considération des tendances climatiques à long terme (WMO, 2009). Le calcul de PMP selon la méthode météorologique utilisée dans cette étude se base sur la maximisation de l'humidité des tempêtes de haute efficacité. Cette méthode suppose que toute l'eau contenue dans la colonne atmosphérique au-dessus d'un point précipitera (Clavet-Gaumont et al., 2017). Des méthodes statistiques (p.ex. la méthode d'Hershfield; Hershfield, 1965) sont aussi couramment utilisées et présentées dans cette étude. Les méthodes de calcul pour les méthodes météorologiques et statistiques retenues pour cette étude sont présentées en détail à la section 3.3.4.2.

2.4.4 Écoulement en surface

2.4.4.1 Mesure de débit en écoulement à ciel ouvert

L'eau ruisselant en surface suit la topographie jusqu'à l'atteinte d'une ramification du réseau d'écoulement en surface. Un écoulement à ciel ouvert se produit lorsque la surface de l'eau est en contact avec l'atmosphère et soumise uniquement à la pression atmosphérique (CEAEQ, 2008), comme dans le cas de ruisseaux ou de fossés par exemple.

Le débit d'un cours d'eau en écoulement à ciel ouvert peut se calculer en multipliant l'aire de l'écoulement par la vitesse moyenne de l'eau dans ce cours d'eau. Cependant, la vitesse de l'eau n'est pas homogène dans une section transversale, notamment en raison de la friction avec la surface ou les parois du fossé. La vitesse est donc plus rapide au centre du cours d'eau et près de la surface que sur les côtés et en profondeur (Meals & Dressing, 2008). De plus, la vitesse de l'eau varie lors d'événements de pluie, et elle est plus élevée dans les situations de crue qu'en décrue (Smith et al., 2010). Le débit peut être mesuré en continu par à l'installation de structures permanentes, ou ponctuellement au moyen de mesures directes dans le canal d'écoulement en utilisant différentes méthodes, notamment:

Canal jaugeur : Le canal jaugeur requiert l'installation d'une structure imposante dans le cours d'eau (figure 2.6). Cette structure comporte une première section convergente, qui rétrécit graduellement la largeur de la section d'écoulement, suivi d'une section de contrôle, où le débit est mesuré, puis d'une section de dérive, où le cours d'eau retrouve sa largeur initiale (Michalski, 2000). Les mesures obtenues par cette méthode sont très précises, mais il s'agit d'une structure complexe et dispendieuse qui doit être construite en fonction d'une plage de débit prédéterminée (CEAEQ, 2008).



Figure 2.6 Exemple de canal jaugeur installé dans un fossé (tiré de Tullis & barfuss, 2009)

Déversoir : Les déversoirs sont des structures placées perpendiculairement à l'écoulement qui limitent l'écoulement en agissant comme un barrage créant un réservoir en amont (Figure 2.7), puis en permettant à l'eau de s'écouler par une ouverture de géométrie variable, par exemple en V, triangulaire ou trapézoïdale (Michalski, 2000; USDI, 2001). La hauteur d'eau dans cette ouverture permet de déterminer le débit de l'écoulement à l'aide de courbes de tarage. Comme pour les canaux jaugeurs, les déversoirs sont précis uniquement pour une plage de débit donnée (USDI, 2001).



Figure 2.7 Exemple de déversoir avec une ouverture en V (tiré de Buytaert et al., 2014)

Champ de vitesse : Le débit peut être estimé en multipliant la vitesse moyenne de l'écoulement de l'eau par l'aire de sa section transversale. La vitesse de l'eau est mesurée à plusieurs profondeurs et emplacements le long du profil d'écoulement afin de déterminer la vitesse moyenne (Michalski, 2000). Cette méthode est relativement simple et est couramment utilisée dans la pratique (Herschy, 1993).

Dilution de traceur : L'ajout d'un traceur (p.ex. un composé chimique ou un colorant) dans un canal d'écoulement entraîne sa dilution (USDI, 2001). La différence entre la concentration initiale du traceur, déversé à un taux d'injection constant, et la concentration mesurée en aval, permet de déduire le débit dans le canal d'écoulement (Peterka A.J, 1967). Cette méthode est relativement simple, car elle ne nécessite pas de prise de mesure directe de vitesse d'écoulement.

2.4.4.2 Calcul de débit en écoulement à ciel ouvert

Les débits peuvent aussi être évalués indirectement à partir de la hauteur d'eau et des caractéristiques (profil des sections, pente, rugosité) d'écoulement. La vitesse de l'eau dans le réseau d'écoulement en surface est définie par la loi de Manning, qui s'applique à l'écoulement en eau libre (NRCS, 2007).

$$r_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (2.8)$$

Où,

r_h : rayon hydraulique [L]

A_m : aire mouillée de la section [L²]

P_m : périmètre mouillé de la section [L]

$$V = \frac{r_h^{2/3} \sqrt{s}}{n} \quad (2.9)$$

Où,

V : vitesse d'écoulement [L·T⁻¹]

s : pente de l'écoulement [L/L]

n : coefficient de Manning pour l'écoulement libre [L^{-1/3} T]

Le coefficient n de Manning quantifie la résistance d'un canal à l'écoulement libre d'un fluide. La valeur du coefficient n de Manning pour les canaux d'écoulement stables et dépourvus de végétation varie en fonction de la granulométrie des matériaux de remplissage (Figure 2.8).

Channel type	Median size of bed material		Base <i>n</i> value	
	Millimeters	Inches	Benson and Dalrymple (1967)	Chow (1959)
Firm earth	—	—	0.025–0.032	0.020
Coarse sand	1–2	—	.026–.035	—
Fine gravel	—	—	—	.024
Gravel	2–64	0.08–2.5	.028–.035	—
Coarse gravel	—	—	—	.028
Cobble	64–256	2.5–10.5	.030–.050	—
Boulder	> 256	> 10	.040–.070	—

Figure 2.8 : Coefficients *n* de Manning pour des canaux stables sans végétation (Tiré de Phillips & Tadayan, 1998).

Des méthodes empiriques comme la méthode décharge pente-section peuvent aussi être utilisées afin de calculer approximativement le débit d'eau dans un cours d'eau (Smith & Cordova, 2010). Cette méthode est particulièrement utile pour mesurer une large gamme de débits, qui ne peut être couverte par un seul type d'instrumentation.

Le débit de l'écoulement (q_i ; m³/s) entre les sections (1) et (2; Lee et al., 2017) est calculé :

$$q_i = \sqrt{K_1 K_2 S_f} \quad (2.10)$$

Où,

K_{1-2} : coefficient de transport du canal (m³/s)

S_f : friction de pente (m)

Les valeurs de K_1 et K_2 sont calculés aux station amont (1) et aval (2; Lee et al., 2017) :

$$K_{1-2} = \frac{1}{n} A_m r_h^{2/3} \quad (2.11)$$

Où,

n : coefficient de Manning pour l'écoulement libre (s/m^{1/3})

A_m : aire mouillée de la section [m²]

r_h : rayon hydraulique [m]

La friction de pente S_f (m) est calculée selon l'équation suivante (Lee et al., 2017) :

$$S_f = \frac{(Z_1 - Z_2) + \left[\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right] (1 - k_p)}{L} \quad (2.12)$$

Où,

Z_{1-2} : élévation de l'eau aux stations amont et aval (m)

V_{1-2} : vitesse de l'eau aux stations amont et aval (m/s)

g : accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

k_p : coefficient de perte d'énergie. (1 pour les contractions et 0,5 pour les expansions) [-]

L : distance entre les deux points de mesure (m)

Les stations de mesure utilisées dans la méthode décharge pente-section doivent être positionnées dans des sections de fossés linéaires et étroites, avec des pentes aussi régulières que possible et sans contractions ou expansions significatives (Dalrymple & Benson, 1967). Le respect des critères suivants permet d'assurer la précision de cette méthode (Dalrymple & Benson, 1967) :

- La longueur du cours d'eau instrumenté doit dépasser 75 fois la profondeur de celui-ci.
- La chute d'élévation du cours d'eau doit être supérieure ou égale à la charge dynamique.
- La chute d'élévation du cours d'eau doit être d'au moins 15 cm.

2.4.4.3 Régime d'écoulement et érosion

Selon sa vitesse, l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. L'écoulement laminaire est caractérisé par des trajectoires de particules de fluide stables et régulières (Ryhming, 2004). À l'opposé, un écoulement turbulent est non stationnaire, et la direction et le module des vecteurs vitesse varient en tout point. Un écoulement turbulent est caractérisé par la présence de nombreux tourbillons de dimensions variables. En pratique, l'écoulement est turbulent dans la majorité des cours d'eau, notamment parce que les bordures et les pentes sont généralement irrégulières (Dingman, 2009). L'écoulement turbulent entraîne un

important mélange de l'eau et favorise l'entraînement de particules et l'érosion (Humphrey, 1990). Les crues importantes entraînent une hausse des débits observés ainsi que de la vitesse de l'écoulement, ce qui contribue à accentuer l'arrachement de particules et le taux d'érosion des cours d'eau (Rivard, 2011). Ces événements représentent ainsi un risque accru pour l'intégrité des canaux d'écoulement (Lane & Richards, 1997).

2.5 Simulations numériques

Les simulations numériques sont fréquemment employées pour dimensionner des réseaux d'écoulement d'eau de surface (Cázares-Rodríguez et al., 2017; Price & Vojinovic, 2008). Certains codes utilisent les caractéristiques des bassins versants et du réseau d'écoulement, tels HEC-HMS (Scharffenberg, 2016), SWMM (Rossman, 2010), Hydrotel (Fortin et al., 1995). D'autres modèles distribués permettent de modéliser à chaque point de grille l'écoulement de l'eau à partir de la topographie, du couvert végétal, de la composition du sol et de plusieurs autres caractéristiques du sol ayant un impact sur l'écoulement de surface et l'infiltration d'eau. Parmi ces modèles, les codes Hydro River et SHE de la suite MIKE, développée par DHI Water and Environment (DHI, 2007, 2017), tRIBS (Ivanov et al., 2004) et SWAT (Neitsch et al., 2002) sont parmi les plus employés.

Un autre code couramment utilisé dans l'industrie est GoldSim (GoldSim Technology Group, 2017) qui utilise une approche probabiliste basée sur des simulations de Monte-Carlo. Cette approche probabiliste permet de quantifier l'effet de l'incertitude et de la variabilité des paramètres d'entrée sur les résultats obtenus (Digges La Touche, 2011).

2.5.1 Utilisation des simulations numériques dans le domaine minier et pour l'évaluation des effets des changements climatiques

GoldSim est couramment employé dans le domaine minier pour traiter des systèmes complexes de gestion des eaux et calculer des bilans d'eau pour l'ensemble des opérations minières (Nalecki & Gowan, 2008; Rescan Environmental Services Ltd., 2013; Shelp et al., 2009). Des classeurs Excel sont aussi utilisés pour des calculs plus simples de bilan d'eau (ERM Rescan, 2014). La suite Mike (DHI) est utilisée pour des problématiques

d'écoulement souterrain, notamment le drainage et le remplissage des galeries et des fosses (Garzonio et al., 2014; Luo et al.). Le code MODFLOW est aussi utilisé pour des problématiques d'écoulement souterrain dans les fosses (Martinez & Ugorets, 2010).

La suite MIKE a été retenue pour la présente étude. Cette suite inclut plusieurs codes utilisés pour traiter des problèmes de gestion de l'eau, autant en surface que dans les rejets miniers. MIKE Hydro River, anciennement MIKE 11, est un code utilisé pour simuler l'ensemble des processus impliqués dans l'écoulement libre en surface (DHI, 2017). Il a été utilisé à plusieurs reprises dans des problématiques de CC, notamment afin d'évaluer l'impact des CC sur les débits attendus dans un réseau d'écoulement de surface (Andersen et al., 2006), et pour élaborer des cartes représentant les zones présentant un risque d'inondations (Dinh et al., 2012). Ce code a aussi permis de représenter les hausses de débit observées lors d'événement de crues extrêmes dans des régions montagneuses (Ma et al., 2016; Sahoo et al., 2006).

2.5.2 Mike Hydro River

Le code Mike Hydro River, inclut quatre modèles numériques permettant de calculer le ruissellement (DHI, 2017) :

Time-area : cette méthode utilise le temps de concentration, les pertes initiales, un facteur de réduction qui permet de quantifier les pertes subséquentes, ainsi qu'une courbe aire-durée qui permet de tenir compte de la forme du bassin versant.

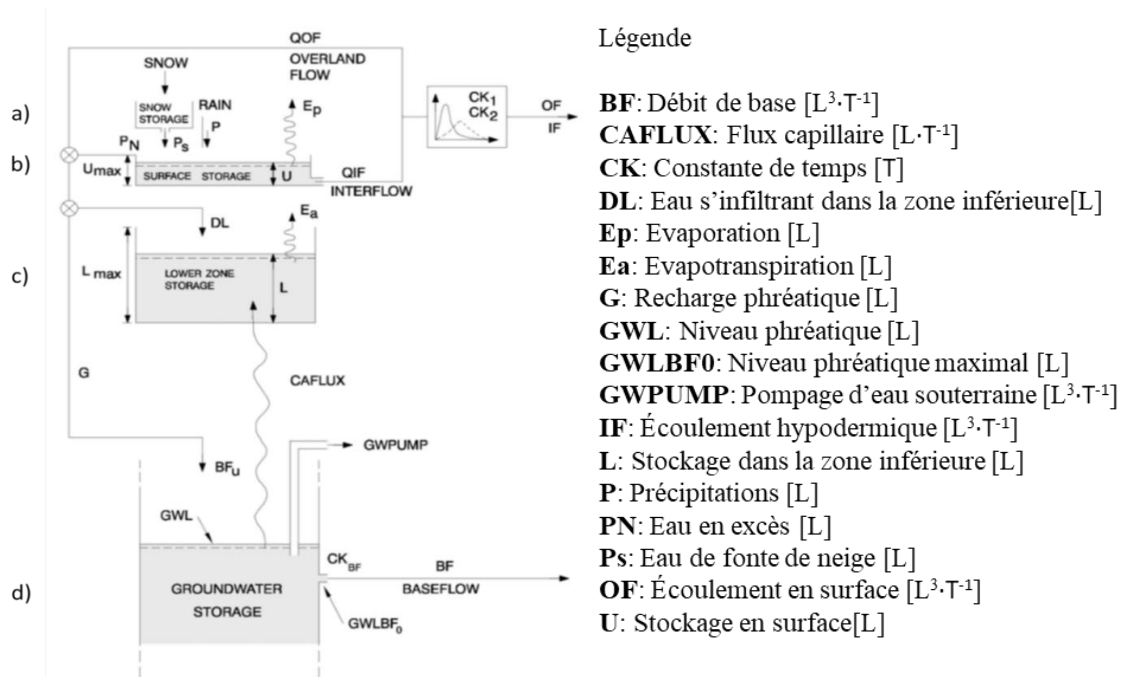
Kinematic wave : cette méthode utilise les pertes initiales en surface, l'équation de Manning pour simuler l'écoulement en surface, et le modèle de Horton pour quantifier les pertes par infiltration.

Unit Hydrograph Model : la méthode de l'hydrogramme unitaire de Mike Hydro River est la même que celle décrite à la section 2.4.2.1. Le code permet d'utiliser l'hydrogramme triangulaire, ainsi que des hydrogrammes adimensionnels personnalisés.

Nedbør-Afstrømnings-Model : ce modèle simule l'écoulement en surface, l'écoulement hypodermique ainsi que l'écoulement de base d'un bassin versant. C'est ce modèle qui a été retenu dans cette étude puisqu'il permet de simuler de longues périodes contrairement

aux méthodes présentées ci-dessus, conçues pour un seul événement (DHI, 2017). Il a été calibré et validé dans la littérature à plusieurs reprises pour des analyses de ruissellement de bassins versants, notamment pour reproduire des observations sur de longues périodes (>1 an), ainsi que des événements extrêmes (Hafezparast et al., 2013; Nielsen & Hansen, 1973; Refsgaard, 1997). Le ruissellement est calculé à partir des interactions entre quatre zones de stockage reliées entre elles, ainsi que l'addition des calculs des apports de ruissellement de surface, de ruissellement hypodermique et du débit de base (Figure 2.9).

Ces quatre réservoirs sont la neige, le stockage en surface, le stockage en zone inférieure et l'eau souterraine (DHI, 2017; Nielsen & Hansen, 1973). Le premier réservoir au-dessus du sol représente le stockage d'eau sous forme de neige au-dessus du niveau du sol lorsque la neige est intégrée au modèle (Figure 2.9a). Sous cette couche se trouve la zone de stockage en surface (Figure 2.9b). Elle représente les dépressions et la végétation, qui interceptent l'eau de pluie, ainsi que les premiers centimètres de sol, qui empêchent l'eau de pluie d'immédiatement ruisseler en surface. Lorsque ce stockage est considéré plein, l'eau en excès est libre de ruisseler en surface. Cette zone est aussi disponible pour l'évaporation et alimente le ruissellement hypodermique. Une fraction de cette eau s'infiltre aussi vers le stockage en zone inférieure (Figure 2.9c). Le stockage en zone inférieure représente la couche de résidus, stériles ou autres matériaux en dessous des premiers centimètres en surface. Cette eau est disponible pour l'évapotranspiration, dans les cas où il y a de la végétation en surface et des racines suffisamment profondes. Sous cette zone de stockage se trouve la zone d'eau souterraine (Figure 2.9d), qui contrôle le débit de base de l'hydrogramme.



Calcul des composantes du ruissellement :

$$QOF = CQOF \frac{L/L_{max} - TOF}{1 - TOF} P_N$$

Où CQOF [-] est le coefficient de ruissellement en surface et TOF [-] le seuil de L/L_{max} générant l'écoulement en surface.

$$QIF = (CKIF)^{-1} \frac{L/L_{max} - TIF}{1 - TIF} U$$

Où CKIF [T] est le coefficient de ruissellement en surface et TIF [-] le seuil de L/L_{max} générant l'écoulement hypodermique.

$$BF = (GWL_{BF0} - GWL) S_V (CK_{BF})^{-1}$$

Où S_V [-] est la capacité spécifique de l'aquifère

Figure 2.9 Structure du calcul de ruissellement du modèle NAM. Les équations du calcul de ruissellement en surface, de ruissellement hypodermique et de débit de base sont aussi présentées (Adapté de DHI, 2002)

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Cette étude portait sur l'élaboration d'une approche méthodologique visant à concevoir les infrastructures de gestion de surface des aires d'entreposage des rejets miniers. Cette approche a été appliquée à un cas réel, soit le site de la Mine Canadian Malartic.

3.1 Description du site de la Mine Canadian Malartic

3.1.1 Historique du site

L'exploitation aurifère dans la région de Malartic (Québec, Canada) remonte à 1935 (BAPE, 2016). Plusieurs gisements de haute teneur (> 3 g/t) ont été exploités au cours des décennies suivantes jusqu'à la fermeture de la dernière mine en 1979. Au total, plus de 5 millions d'onces d'or ont été extraites durant cette période. Des travaux d'exploration en 2004 ont révélé l'existence d'un gisement de faible teneur, mais de fort volume (Wares & Prud'homme, 2013). La Corporation minière Osisko a donc démarré en 2006 un projet de mine à ciel ouvert. Au départ, le projet prévoyait extraire une quantité totale de 6,55 millions d'onces d'or sur une période s'étalant jusqu'à 2025.

3.1.2 Opérations actuelles et futures

L'exploitation est aujourd'hui prévue se poursuivre jusqu'en 2028 au moins. Plus de 40 Mt de stériles sont produits annuellement et plus de 20 Mt de minerai sont traités par an (WSP, 2015a). La halde à stériles devrait atteindre quelques centaines d'hectares d'ici la fermeture, et les parcs à résidus devraient couvrir environ 600 ha (Golder, 2014a). Les résidus sont épaissis et comportent une portion de solides de 60% (Gervais et al., 2014). Ils sont déposés dans les cellules par pipeline et de l'eau libre se forme en surface lors de la déposition (Genivar, 2009). Présentement, la majorité des rejets miniers (stériles et résidus) sont classés potentiellement générateurs de drainage minier acide (DMA; WSP, 2015a). Cependant la génération de DMA devrait être tamponnée par la présence de minéraux neutralisants pendant environ 20 ans (Ecometrix, 2014). Différentes stratégies de restauration sont à l'étude, notamment la mise en place de systèmes de

recouvrement afin de contrôler la migration de l'oxygène vers les rejets, ou l'entreposage et l'ennoiement des rejets dans la fosse (BAPE, 2016).

3.1.3 Gestion des eaux de surface

Les eaux usées minières, qui constituent l'ensemble des eaux en contact avec les installations minières (MDDEP, 2012), sont recueillies sur l'ensemble du site au moyen d'un réseau de collecte d'eau de surface. L'eau de surface récupérée est utilisée pour le fonctionnement de l'usine de traitement de minerai et le système d'abattement de poussières, qui nécessitent tous les deux environ $13,6 \text{ Mm}^3$ d'eau chaque année. Toute l'eau utilisée par la mine provient directement du site, ce qui inclut l'apport en eau souterraine ($2,9 \text{ Mm}^3/\text{an}$), l'eau de ruissellement ($10,7 \text{ Mm}^3/\text{an}$) et l'eau récupérée par le ressuage des résidus ($6,2 \text{ Mm}^3/\text{an}$; Golder 2015a). Les surplus d'eau rejetés dans l'environnement sont préalablement traités à une usine de traitement dont la capacité est de $24\,000 \text{ m}^3/\text{j}$ (Golder, 2015b).

3.1.4 Contexte météorologique

Le site de la Mine Canadian Malartic se situe dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, caractérisée par un climat continental tempéré froid (MRNF, 2006). Les étés y sont généralement courts et secs, alors que les hivers sont longs, froids et secs (MRNF, 2006). La moyenne de précipitations annuelle est de 914 mm (Meteorological Services of Canada, 1971-2000). Les courbes IDF provenant de la station météorologique de Val-d'Or évaluent une pluie de récurrence de 100 ans de 75,2 mm sur 24 heures (Meterological Services of Canada, 1961-1995). La pluie la plus importante mesurée en une journée depuis l'installation de cette station en 1951 était de 68,0 mm le 23 juillet 1999, puis une pluie de 72,3 mm a été observée au cours de la période de suivi (Meteorological Services of Canada, 1951-2019).

Présentement, les données météorologiques de conception utilisées pour le dimensionnement des infrastructures de gestion de l'eau de surface proviennent de la station d'Environnement Canada de l'aéroport de Val-d'Or (VAL-D'OR A, ID WMO 71941, coordonnées $48^{\circ}03' \text{ N}$, $77^{\circ}47' \text{ O}$), située à 23 km à l'Est de la mine et en opération

depuis 1951. La disponibilité des différentes données varie dans le temps, mais elles ont généralement été recueillies sur quelques décennies depuis 1951. Les données de température, de précipitations liquides et solides, les courbes IDF, d'évaporation, d'ensoleillement, de vitesse et direction du vent, ainsi que la température du point de rosée sont disponibles de manière journalière. La hauteur du couvert de neige hebdomadaire, la fonte de glace sur les lacs, ainsi que les courbes IDF à court terme sont également disponibles pour cette station.

3.2 Suivi des débits et hauteurs d'eau dans les fossés collecteurs

Trois stations de mesure ont été installées sur le site de la mine Canadian Malartic afin de mesurer la hauteur d'eau dans les fossés collecteurs autour de certaines portions du parc à résidus de la Mine Canadian Malartic (Figure 3.1). Ces données ont été utilisées pour la calibration des simulations numériques (voir section 3.3.3).

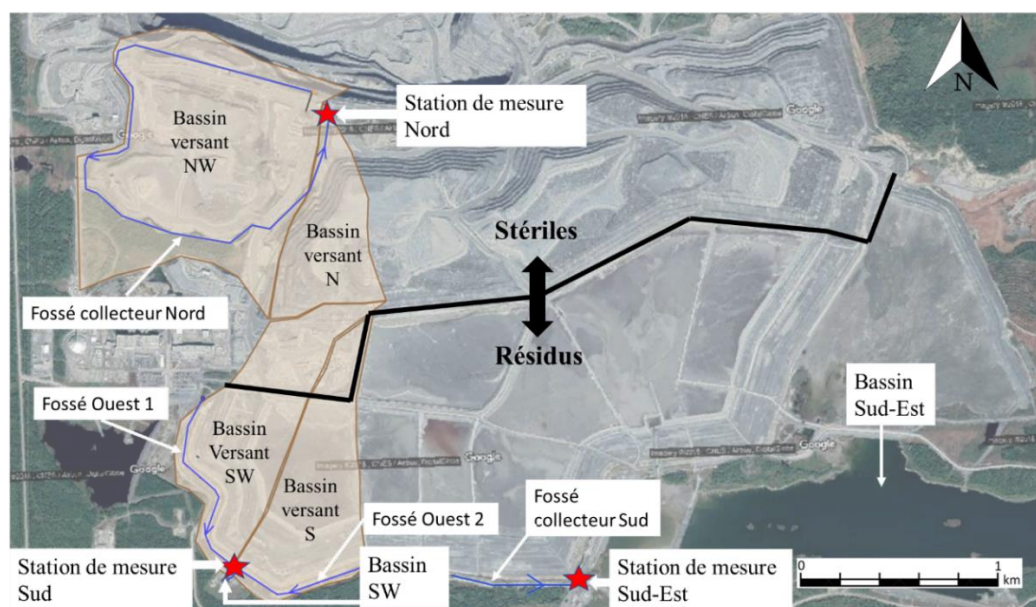


Figure 3.1 : Halde à stériles et parc à résidus de la Mine Canadian Malartic. La localisation des stations de mesure est indiquée par des étoiles rouges, les fossés sont indiqués en bleu. Les bassins versants sont identifiés en brun (Photo tirée de Google Earth, 2017).

3.2.1 Installation des capteurs

Chaque station de mesure comportait trois capteurs de pression Van Essen (DI261, DI501 and DI801; Van Essen Instruments, 2016). Deux sondes étaient placées le long du cours d'eau afin de mesurer la charge hydraulique en continu (enregistrement toutes les 15 minutes). Une troisième sonde était placée à l'air libre afin de mesurer la pression atmosphérique et corriger les valeurs de charge hydraulique (MEQ, 1999). Les zones situées au Nord et à l'Est du parc à résidus (Figure 3.1) n'ont pas été instrumentées en raison d'importants travaux prévus au cours de l'été et de l'automne 2018.

Chaque capteur était placé à l'intérieur d'un tuyau crépiné de PVC de 1,27 cm (1/2 pouce) de large et 61 cm (2 pieds) de hauteur, scellés par un couvercle. Les tuyaux de PVC étaient perforés de quatre rangées de 10 trous de 5 mm de diamètre. La position du capteur par rapport au sommet du tuyau de PVC a été mesurée pour chacun des capteurs et le sommet de chaque tuyau a été arpenté par le personnel de la mine lors de l'installation.

Le tuyau était positionné au centre d'une chaudière de 20 litres avec un couvercle percé. Elles étaient remplies de roches afin de maintenir le tuyau et la chaudière en place. Les chaudières étaient perforées de 16 trous de 2,5 cm (1 pouce) de diamètre, disposés en quatre rangées de quatre trous sur toute la hauteur des chaudières afin de laisser l'eau s'écouler librement (Figure 3.2).

Les stations de mesure ont été installées le 20 juin 2018 et retirées le 31 octobre 2018 (durée totale de suivi : 133 jours). Des visites de suivi ont été effectuées les 23 août 2018 et le 19 septembre 2018. Les sections transversales des fossés où se trouvaient les capteurs ont été arpentées suite à l'installation des stations de mesure (8 juillet 2019). Chacune des sections incluait entre 12 et 21 points d'arpentage (Annexe A). Le niveau de l'eau dans le fossé a également été arpenté et comparé aux mesures des capteurs de pression à cette date à des fins de validation. Les coordonnées des capteurs sont présentées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Coordonnées de localisation des capteurs des Stations de mesure. UTM NAD 83, Zone 17

Station	Position du capteur	Nordant (m)	Estant (m)
Nord	Amont	714253.06	5333845.70
	Aval	714250.81	5333837.69
Sud	Amont	713806,56	5331740,94
	Aval	713803,84	5331736,63
Sud-Est	Amont	715745.59	5331684.48
	Aval	715760.86	5331687.61



Figure 3.2 : Capteur amont de la Station de Mesure Nord installé dans un fossé collecteur sur le site de la Mine Canadien Malartic (Station de mesure Nord). La chaudière orange remplie de roches permettait de maintenir le tube crépiné (noir). Le capteur de pression d'eau était placé à l'intérieur du tube. Le sceau et le tube étaient perforés afin de permettre l'écoulement de l'eau.

La Station de mesure Nord a été installée dans une section de fossé rectiligne située entre deux ponceaux. Cette section du fossé collecteur recueillait les eaux provenant de la halde mixte (Bassin versant NW), et d'une portion de la halde à stériles (Bassin versant N; Figure 3.1). La halde mixte était constituée principalement de stériles et de minerai et la déposition

de matériaux se poursuivait lors de la période de suivi. Elle était caractérisée par un plateau en surface, avec des pentes abruptes sur les côtés menant au fossé collecteur (Figure 3.3).



Figure 3.3 : Fossé collecteur au sud du bassin versant NW. Les pentes de la halde mixte sont visibles sur la droite de la photo.

La portion de la halde à stériles dont le fossé collecteur Nord récupérait une partie de l'eau correspondait à l'extrémité ouest de la halde à stérile principale. La pente était très abrupte et l'élévation des stériles beaucoup plus importante que celle de la halde mixte lors de l'installation de la station. La distance totale entre les capteurs à la station de mesure Nord était de 8,32 m. Les débits d'eau mesurés dans ce fossé étaient influencés seulement par l'eau provenant des précipitations et l'apport en eaux souterraines. Le fond de ce fossé était rocailleux, constitué de pierres anguleuses et la pente très faible (0.25%) sur la section où la station de mesure a été installée (Figure 3.4). L'eau s'écoulait librement en aval de la station de mesure jusqu'à deux ponceaux situés environ 50 m plus loin.



Figure 3.4 : Station de mesure Nord, deux capteurs sont installés dans les chaudières orange alors qu'une troisième (au centre de la photo) est placée à l'air libre et mesure la pression atmosphérique. L'emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne dans le coin supérieur gauche. La flèche jaune indique la direction de l'écoulement.

3.2.2 Bassin versant Sud

La Station de mesure Sud mesurait l'eau en aval de la jonction entre les fossés Ouest 1 et Ouest 2 (Figure 3.1). Ce bassin recueillait les précipitations et les exfiltrations du parc à résidus. La station de mesure était positionnée dans une section plus abrupte et étroite que les deux autres stations de mesure. Le fond était rocailleux et constitué de pierres anguleuses. Le capteur aval était positionné en amont d'une augmentation de la pente d'écoulement menant au Bassin collecteur SW, permettant ainsi de conserver une pente régulière entre les deux points de mesure (Figure 3.5). La distance totale entre les capteurs était de 5,10 m et la pente du fond du fossé était de -2,1% sur cette section. Le bassin situé en aval pouvait contenir une accumulation d'eau jusqu'à une élévation de 326,4 m, alors que le fond du fossé en amont était situé à une élévation de 324.73 m. Une accumulation importante d'eau dans le bassin en aval pouvait donc influencer la hauteur d'eau mesurée dans le fossé.



Figure 3.5 : Station de mesure Sud, située en aval de la jonction des fossés Ouest 1 et Ouest 2 (à droite de la photo) deux capteurs sont installés dans les chaudières orange. L'emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne dans le coin supérieur gauche. La section est rectiligne et située tout juste avant une chute significative du profil du fossé menant au Bassin SW (à gauche sur la photo). La flèche jaune indique la direction de l'écoulement.

3.2.3 Bassin versant Sud-Est

La Station de mesure Sud-Est était installée dans le Fossé collecteur Sud, à proximité de l'endroit où l'eau collectée se déversait dans le Bassin Sud-Est. Ce fossé permettait de drainer l'eau de pluie ainsi que l'eau d'exfiltration du parc à résidus. L'eau pompée dans le Bassin Sud-Ouest était également déversée dans le Fossé collecteur Sud. La hauteur d'eau dans la portion amont du fossé était trop faible pour installer une station de mesure (seulement quelques centimètres d'eau lors de la première visite le 7 juin 2018), notamment parce que la zone excavée dans le roc était très large (Figure 3.6). La station de mesure a donc été positionnée dans la zone aval de ce fossé (Figure 3.7). La distance entre les stations était de 15,58 m. À cet endroit, la pente était faible et le fond du fossé composé de sédiments, ce qui a pu modifier la géométrie du fossé au cours de la période de suivi. Le niveau d'eau mesuré dans le fossé dépendait aussi essentiellement de l'apport par pompage et moins des conditions climatiques. Pour ces raisons, le bassin versant s'écoulant vers cette station n'a pas été simulé numériquement.



Figure 3.6 : Portion amont du Fossé collecteur Sud excavé dans le roc.



Figure 3.7 : Station de mesure du Sud-Est. Le fossé est chargé de sédiments, la pente est presque nulle et le fossé est beaucoup plus large que pour les stations Nord et Sud. L'emplacement de la station de mesure est indiqué par une étoile rouge sur la photo aérienne à droite.

3.3 Simulations numériques

3.3.1 Bassins versants

Les différents bassins versants du parc à résidus (SW et S) et des haldes à stériles et mixtes (NW et N) ont été modélisés selon une approche générale, traitant le bassin versant comme une entité uniforme. Cette approche est couramment utilisée dans l'industrie et nécessite moins de données qu'une approche distribuée, qui nécessite des données de haute

résolution notamment sur la topographie et les matériaux en surface (dos Santos et al., 2018). Les contours des bassins versants drainés par les trois fossés instrumentés ont été déterminés à partir des rapports de conception du réseau de drainage (Golder, 2014b) et au moyen des courbes topographiques provenant d'un relevé LIDAR réalisé par la Mine Canadian Malartic le 27 juin 2016.

3.3.2 Fossés collecteurs

La géométrie des fossés collecteurs et le bassin de rétention SW ont été définis selon le rapport de conception du réseau de drainage d'eau en surface (Golder, 2014b). Les coupes transversales des fossés collecteurs instrumentés ont été mesurées par arpentage le 8 juillet 2018.

Le code Mike Hydro River a permis d'évaluer l'écoulement libre en surface au moyen de l'équation de Manning (Équation 2.9) et en utilisant les sections des fossés mesurées. Le coefficient n de Manning a été initialement défini pour chaque section en fonction des matériaux en place dans le lit des fossés, puis calibré. D'autres paramètres ont été ajustés afin de mieux représenter l'écoulement dans les fossés :

Vagues. L'effet des vagues sur l'écoulement a été simulé au moyen du mode diffusif. Ce mode néglige l'inertie de l'eau et n'est généralement pas approprié pour les grandes étendues d'eau (lacs ou océans) . Par contre il est généralement considéré suffisamment précis pour simuler des régimes d'écoulement où le frottement avec le lit du canal est la force dominante (DHI, 2017).

Conditions aux frontières. Un débit de base minimal a été imposé lors de la calibration à l'ensemble des fossés collecteurs simulés afin de représenter le débit minimal ayant été observé au cours de la période de suivi. En aval, l'écoulement a été considéré ouvert pour le fossé collecteur Nord, donc sans résistance. L'exutoire du fossé Sud-Ouest a été simulé par une condition frontière fermée (représentant le bassin collecteur où se déversait l'eau), et avec une pompe fictive . L'excédent d'eau était retiré de la simulation (au moyen de la pompe) lorsque le niveau dépassait l'élévation des bordures du fossé (i.e. 326.4 m) de manière à ce que le niveau ne dépasse jamais cette limite.

Lien entre les bassins versants et les fossés. Le ruissellement des bassins versants a été simulé de manière distribuée sur l'ensemble de la longueur des fossés collecteurs. Le débit de ruissellement provenant du bassin versant était donc divisé de manière égale sur toute la longueur du fossé auquel il était lié.

3.3.3 Calibration du modèle numérique

L'approche générale utilisée pour répondre aux objectifs de cette étude consistait à utiliser un modèle calibré de ruissellement afin d'évaluer l'écoulement résultant de précipitations extrêmes, avec et sans effets des changements climatiques. Chaque bassin versant a donc été modélisé, calibré et validé séparément à l'aide des informations collectées sur le terrain afin d'améliorer la précision des prédictions obtenues (Refsgaard, 1997).

Dans cette étude, le ruissellement des précipitations à la mine Canadian Malartic a été simulé au moyen du code Mike Hydro River (anciennement MIKE 11; DHI, 2017), en utilisant le modèle Nedbod Afrstromnings Model (NAM; Nielsen & Hansen, 1973).

L'objectif principal de la calibration était de représenter le plus fidèlement possible le comportement hydrologique des quatre bassins versants (NW, N, SW et S; Figure 3.1) et leur réponse aux principaux événements de précipitations observés au cours de la période de suivi. Les paramètres de stockage en surface, de ruissellement et de débit de base ont été ajustés de manière itérative afin de représenter la hauteur d'eau moyenne dans les fossés et les niveaux d'eau de pointe mesurés pendant la période de suivi. La qualité de la calibration a été évaluée en calculant l'erreur absolue moyenne (EAM) des niveaux d'eau maximums observés (Willmott & Matsuura, 2005):

$$EAM = [n^{-1} \sum_1^n |e_i|] \quad (3.1)$$

Où,

EAM : Erreur absolue moyenne [L]

n : nombre d'observations de l'échantillon [-]

e : différence entre la valeur simulée et la valeur observée [L]

Les quatre événements ayant entraîné les hausses les plus importantes de niveau d'eau dans les fossés ont été retenus pour la calibration. Le premier paramètre calibré était le *Maximum water content in surface storage*. Ce paramètre a été fixé à partir de l'hydrogramme observé pour l'ensemble de l'été dans les quatre bassins versants. Ce paramètre contrôle la quantité d'eau stockée en surface avant le début du ruissellement direct. Cette valeur a donc été fixée en fonction de la hauteur de pluie maximale n'ayant pas d'impact sur l'hydrogramme (i.e. une hausse significative du niveau d'eau dans les fossés).

Le deuxième paramètre calibré était le *Time constant for routing overland flow*. Cette valeur s'exprime en heure et détermine la forme de l'hydrogramme, et le délai avant l'atteinte du débit de pointe. Les événements majeurs ont donc été évalués individuellement puis cette valeur a été ajustée de manière à représenter au mieux les débits de pointe dans tous les fossés. Les événements de pluie du 1^{er} et du 5 septembre, plus courts et avec des pointes de taux de précipitation distincts, ont principalement été employés ici. Ce processus a été effectué itérativement pour chacun des quatre bassins versants. Des paramètres *Time constant for routing overland flow* différents ont été attribués aux deux bassins versants se drainant à la Station de mesure Nord, puisque le Bassin versant N (halde à stériles) était caractérisé par un relief très important et était très près de la station de mesure, contrairement au Bassin versant NW (halde mixte), qui était plus grand et avait plutôt la géométrie d'un plateau.

Le troisième paramètre calibré était le *Overland flow runoff coefficient*. Ce paramètre permet d'évaluer la fraction d'eau ruisselée en surface par rapport à celle infiltrée vers les couches inférieures. Le paramètre a été ajusté itérativement de manière à faire concorder les hauteurs d'eau maximales observées et simulées aux différentes stations de mesure lors des événements de précipitations majeurs.

Le quatrième paramètre calibré était le *Time constant for routing interflow*, qui influence la quantité d'eau rejoignant le réseau d'écoulement en surface sous forme d'écoulement hypodermique. Ce paramètre a été ajusté de manière à reproduire plus fidèlement la courbe descendante de l'hydrogramme. L'impact de ce paramètre sur l'hydrogramme est cependant faible.

Finalement, le débit de base a été ajusté afin de représenter la hauteur d'eau minimale dans les fossés tout au long de la période de suivi. Cette composante représente la portion d'eau provenant de la résurgence de l'eau souterraine et le ressuage des résidus (Station de mesure Sud uniquement) aux deux stations de mesure.

Une fois calibrées, les simulations ont été utilisées afin d'évaluer l'impact attendu des CC sur les infrastructures de gestion de l'eau de surface en appliquant des conditions frontières représentant les conditions climatiques futures pour différents scénarios de CC.

3.3.4 Données météorologiques et climatiques

3.3.4.1 Simulations climatiques

Les données météorologiques utilisées pour calibrer et valider les simulations numériques provenaient d'une station météorologique installée par l'unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) au site de la Mine Canadian Malartic. La station était équipée d'un pluviomètre S-RGB-M002 produit par ONSET qui permettait de mesurer la pluie par intervalle de 0,2 mm sur une hauteur de pluie pouvant atteindre 12,7 cm/h (précision : +/- 1% jusqu'à 20 mm/h; HOBO Data loggers, 2017). Le pluviomètre a été calibré le 10 juillet 2018 et les données mesurées ont été comparées avec la station VAL-D'OR A d'Environnement Canada pour la durée du suivi (20 juin au 31 octobre 2018).

La modélisation du climat futur visait à prédire les événements de PMP- pour deux périodes distinctes, soit 2041-2070 et 2071-2100. Les valeurs de PMP ont été produites par deux MCR. Huit simulations ont été obtenues avec le Modèle Régional Canadien du Climat version 4 (MRCC4) avec le scénario A2 du SRES et une résolution de 0,44°. Onze simulations ont été obtenues avec le Modèle Régional Canadien du Climat vers 5 (MRCC5), avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, à une résolution de 0.22°, soit un maillage de 598 km²(Gobeil, 2019). Les simulations du MRCC4 (qui s'arrêtent en 2070) ont été utilisées afin de valider la méthode de calcul de PMP de Clavet-Gaumont et al. (2017; voir section 3.3.4.2). Les simulations du MRCC5 ont été utilisées pour évaluer l'impact des CC d'ici 2100. Plus de détails sur la méthodologie employée pour les simulations des MCR,

ainsi que les calculs de PMP sont disponibles dans deux rapports de Gabriel Gobeil (2018, 2019).

Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisés pour évaluer l'évolution des PMP dans le temps. Le scénario RCP4.5 correspond à un scénario intermédiaire avec des émissions mondiales atteignant une pointe en 2040 et diminuant par la suite, tandis que le RCP8.5 représente le scénario où les émissions de GES continueraient d'augmenter tout au long du 21^e siècle (GIEC, 2014).

Les simulations du MRCC5 utilisées dans cette étude prévoient une augmentation de la température annuelle moyenne comprise entre 2,5 et 7,5 °C d'ici 2100 sur le site de la mine Canadian Malartic, tandis que les précipitations annuelles devraient augmenter entre 8 et 27%, selon le modèle et le scénario RCP par rapport à la Période de référence 1970-2000 (Figure 3.8). Ces projections ont été comparées aux résultats de 18 MCG la Phase 5 du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5; Taylor et al., 2012), une initiative du GIEC qui regroupe et analyse différents modèles globaux de climat à travers le monde. La résolution des MRC est de 0,44° pour le MRCC4 et de 0,22° pour le MRCC5, comparativement aux résolutions des simulations utilisées à des fins de comparaison, dont la taille de grille atmosphérique varie de 0,7484° à 3,75° (Flato et al., 2014; Gobeil, 2019). Les simulations du MRCC5 représentaient bien l'amplitude de la variabilité présente dans les MCG utilisés par le CMIP5 en termes d'augmentation de la température et des précipitations d'ici 2100 (Figure 3.8). Ceci indique que le modèle climatique choisi ne semble pas avoir de biais significatif par rapport aux MCG de plus faible résolution.

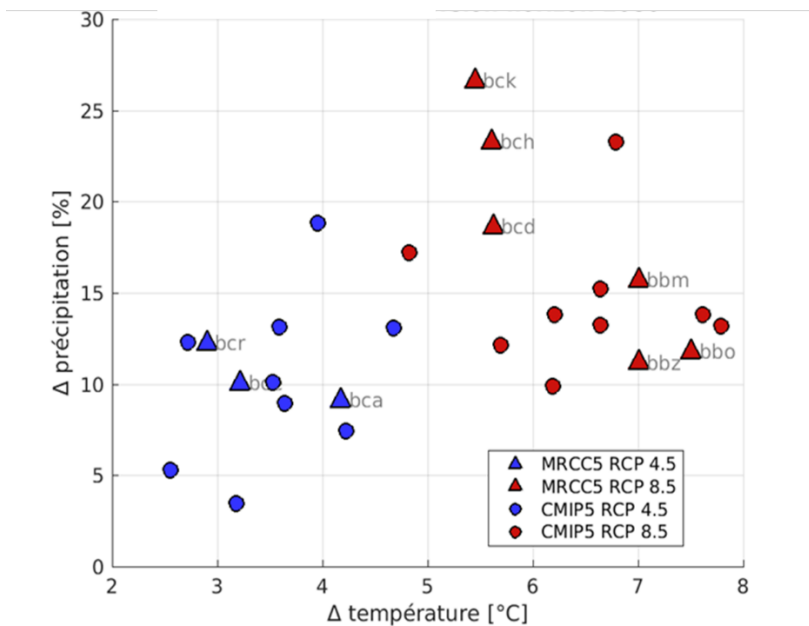


Figure 3.8 : Changements projetés des précipitations et températures pour la région de Malartic (région agrandie) par MRCC5 et CMIP5. Les variations sont établies par rapport à la période de référence 1970-2000 pour RCP4.5 et 8.5 à l’horizon 2080. Les simulations des MCG utilisés par CMIP5 sont BNU-ESM, INM-CM4, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-LR, NorESM1-M, BCC-CSM1.1, CMCC-CMS et IPSL-CM5A-LR (tiré de Gobeil, 2019).

3.3.4.2 Estimation des PMP actuelles et futures

Les estimations de PMP ont été effectuées en utilisant deux méthodologies distinctes : une approche météorologique (Clavet-Gaumont et al., 2017), et l’approche statistique de Hershfield (Hershfield, 1965).

La méthode météorologique utilisée dans cette étude est basée sur les principales tempêtes observées dans une zone considérée comme homogène sur le plan météorologique dans laquelle s’inscrit la zone à l’étude. Les données utilisées pour ce calcul proviennent des résultats moyens obtenus pour les 11 simulations de MRC utilisées dans cette étude, à l’échelle d’un point de grille de 598 km². Seuls les 10% des événements les plus importants de chaque année ont été sélectionnés pour le calcul (Clavet-Gaumont et al., 2017). La $P_{\max}$ a ainsi été calculée :

$$P_{max} = P_{event} \cdot r \quad (3.2)$$

Où,

P_{max} : Pluie maximisée [L]

P_{event} : Chaque événement majeur de pluie de 24 heures [L]

r: Facteur de maximisation [-], qui a été calculé utilisant:

$$r = \frac{PW_{100}}{P_{w_{event}}} \quad (3.3)$$

Où,

PW_{100} : Valeur mensuelle maximale d'eau précipitable de récurrence de 100 ans [L].

$P_{w_{event}}$: Eau précipitable de l'événement [L]

L'eau précipitable représente la masse d'eau sous forme de vapeur dans la colonne de l'atmosphère contenue au-dessus d'une surface donnée (WMO, 2009). Le rapport de maximisation est appliqué à chaque événement de pluie majeur (Équation 3.2). La valeur maximale de P_{max} ainsi obtenue représente la valeur de PMP.

La deuxième approche utilisée pour estimer la valeur de PMP était la méthode statistique de Hershfield, qui est recommandée pour les petits bassins versants (<1000 km²; WMO 2009) et qui est exprimée (Hershfield, 1965):

$$PMP = \bar{X}_n + K_m S_n \quad (3.4)$$

Où,

$\bar{X}_n$: Moyenne annuelle de pluie maximale sur 24 heures pour la période de référence [L]

K_m : Facteur de fréquence [-], généralement entre 5 et 20 qui dépend de la valeur de $\bar{X}_n$ (WMO, 2009)

S_n : Écart-type de la distribution de $\bar{X}_n$ [-]

La distribution temporelle des précipitations peut avoir un impact significatif sur le débit de ruissellement maximal observé (Máca & Torfs, 2009). Les précipitations calculées avec

des modèles climatiques sont des valeurs moyennes sur 24 heures et ces données tendent à minimiser les débits de pointe simulés (Alfieri et al., 2008; Bezak et al., 2018). Les débits de pointe les plus importants sur les petits bassins versants sont généralement causés par des événements de pluie brefs et intenses (SCS, 1986). Une définition temporelle plus élevée des événements de précipitations était donc nécessaire pour simuler avec précision le débit maximal attendu. Les PMP ont donc été distribués selon une pluie SCS de type II (voir section 2.4), tel que recommandé pour le Québec (Rivard, 2011).

3.3.5 Simulation des PMP d'été/automne

Les simulations de PMP d'été/automne ont été réalisées sur une période totale de 7 jours. Les résidus étaient initialement considérés saturés dans les simulations (ce qui représente bien les conditions in situ lors de la déposition, pour les cellules du parc qui sont actives) avant d'appliquer la PMP à la surface du modèle. Bien qu'une halde à stériles soit généralement en conditions non saturées, cette hypothèse a aussi été formulée pour les stériles à des fins numériques uniquement, de manière à simuler des conditions limitant les pertes initiales par infiltration et maximisant le ruissellement, suite par exemple à un important épisode de pluie (WMO, 2009).

Les simulations de PMP ont été effectuées en utilisant une série de données sur 7 jours, de manière à simuler un retour à un débit s'approchant du débit de base suivant les épisodes de PMP. La série de données utilisée provenait de la simulation issue du MRCC5 couplé avec le GCM CanESM2 et le RCP45, qui représente un cas médiant des 11 simulations en termes de hausse de précipitations et de température utilisées dans cette étude. Cette période a été sélectionnée puisqu'elle contenait initialement un épisode de précipitation de 90,5 mm en 24 heures, afin d'intégrer la valeur de PMP à une série de données de précipitations probable pour cette saison. La précipitation de 90,5 mm a été remplacée par la PMP pour les simulations effectuées dans cette étude. Les valeurs de précipitations enregistrées les jours précédents et suivant cet épisode de 90,5 mm sont présentées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Distribution des pluies quotidiennes sur la période de 7 jours utilisée pour la simulation des différentes PMP

Jour	Pluie quotidienne (mm)
1	9.7
2	PMP
3	3.2
4	0.0
5	8.3
6	0.0
7	1.8

3.3.6 Simulations des PMP de printemps

Les crues printanières ont été évaluées en superposant une PMP de printemps et la fonte des neiges associée à un couvert de neige de récurrence de 100 ans. L'enneigement maximal annuel pour la période de référence (1971-2000) a été déterminé à partir des données de la station Val-d'Or A. Une distribution généralisée des valeurs extrêmes basée sur l'approche du maximum de vraisemblance (Clavet-Gaumont et al., 2017) a été utilisée pour déterminer la couverture neigeuse de récurrence de 100 ans à cette station. Étant donné que le manteau neigeux maximal devrait diminuer au Canada d'ici 2100 en raison des CC (Bussière et al., 2017; Clavet-Gaumont et al., 2017), l'utilisation des conditions climatiques actuelles pour simuler la future fonte des neiges a été jugée conservatrice et réaliste. Les ensembles de données de simulations climatiques projetées pour 2071-2100, y compris la température moyenne quotidienne, ont été utilisés pour déterminer la période printanière la plus favorable à la fonte des neiges, en utilisant la température moyenne la plus élevée de trois jours consécutifs. La période de trois jours a été choisie afin de simuler une fonte des neiges plus longue que le temps de concentration des bassins versants sur le site, et ainsi maximiser le ruissellement.

La fonte des neiges a été calculée à l'aide de la méthode degré-jour pour déterminer le ruissellement (NRCS, 2007):

$$Q_s = C_{snow} * T_m \quad (3.5)$$

Où,

Q_s : Hauteur d'eau ruisselée de la fonte de neige [$L \cdot T^{-1}$]

C_{snow} : Coefficient de fonte [$L \cdot T^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]

T_m : Température moyenne [$^\circ C$]

La valeur retenue pour le C_f était de 2,74 (SI), tel que proposé pour la première fois par Horton (1915) et suggéré par le NRCS lorsqu'aucune donnée de terrain n'est disponible (NRCS, 2007).

Enfin, la PMP de printemps a été appliquée lorsque le ruissellement de la fonte des neiges était maximal. La nappe phréatique dans les résidus et les stériles a été simulée au niveau de la surface pour simuler la situation typique après l'hiver en période de fonte.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SURFACE WATER MANAGEMENT ON TAILINGS STORAGE FACILITIES : A CASE STUDY IN ABITIBI REGION (QUEBEC, CANADA)

Pier-Luc Labonté-Raymond^{1,2}, Thomas Pabst^{1,2}, Bruno Bussière^{2,3}, Émilie Bresson^{2,3}

1. Polytechnique Montreal,
2. RIME (Research Institute on Mine and Environment)
3. UQAT (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue)

Submitted to : Journal of Hydrology (March 9, 2020)

4.1 Abstract

Climate change will cause a significant increase in the intensity and frequency of extreme precipitation events in Quebec (Canada) by the end of the century, and especially in the Abitibi region, an important mining region. The most recent meteorological and statistical projections indicate an average increase of the intensity of the summer Probable Maximum Precipitation (PMP) between 18 and 30% by 2100. Greater PMP could affect the performance and integrity of mining infrastructure (berms, dams, spillways), and increase the risk of dike overtopping (a common mechanism for dike failure in the mining industry). Proper management of surface water is also necessary to limit the risks of uncontrolled discharge of contaminated water in the environment. In this paper, a meteorological approach to integrate local climate modelling in the design of surface water management infrastructure is proposed and applied on a real mine site in Abitibi.

Precipitation and runoff were measured at Canadian Malartic Mine during the summer and fall of 2018 to characterize the rainfall-runoff characteristics of two catchments on the tailings storage facility and waste rock pile. Field measurements were used to calibrate a numerical model and quantify the projected impact of climate change on runoff following extreme precipitation events. The effect of temporal rainfall distribution, waste rock/tailings initial conditions and catchment geometry on runoff were also studied. Results show that the peak discharge of summer/fall PMP could increase significantly, up to 49% considering RCP8.5 scenario. The choice of a statistical or meteorological approach to estimate PMP could cause major differences in the design of surface

water infrastructure. The RCP scenario was also identified as a major cause for uncertainty in the projection of peak discharges.

Keywords: Climate Change (CC); Numerical modelling; Probable Maximum Precipitation (PMP); Regional Climate Models (RCM); Tailings Storage Facilities (TSF)

4.2 Introduction

Dam failures occur about 10 times more often in mining operations than for civil engineering applications (Davies et al., 2000). Tailings dam failures are often caused by intense precipitation events, as well as inadequate surface water management in tailings storage facilities (Lucas, 2001; Sammarco, 2004; Van Niekerk & Viljoen, 2005). A review of 125 incidents around the world carried out by the International Commission on Large Dams concluded that overtopping was the leading cause of active tailings dam failures (23% of the cases; Bowker & Chambers, 2016). Unusual rainfall events were also responsible for about 25% of tailings dam failures around the world between 1917 and 2006 (Rico et al., 2008).

According to the current regulations in Quebec (MDDEP, 2012), and many other environmental regulations around the world (ANCOLD, 2015), mining companies have to design emergency weirs for retention structures based on the probable maximum flood (PMF). The PMF represents the largest theoretically possible flood for a watershed at any time of the year. It considers the worst combination of flood factors regarding maximum precipitation, initial soil state, and snowmelt (WMO, 2009). Probable Maximum Precipitation (PMP) must be used to calculate PMF. PMP is the maximum expected precipitation for a given duration, over a specific area of a given size and time of year (WMO, 2009). It can be calculated using meteorological as well as statistical approaches to calculate the PMP of a specific watershed of any size, as well as an entire region (WMO, 2009). The meteorological approach used in this paper is based on the principle of moisture maximization of high-efficiency storms, which determines the maximum rainfall that a storm could generate if all the moisture contained in the atmospheric column above a given area was to precipitate (Clavet-Gaumont et al., 2017). A statistical approach based on the Hershfield method (Hershfield, 1965) can also be used to estimate the PMP for small watersheds ($< 1000 \text{ km}^2$). This approach is based on past rainfall observation to determine the PMP using a statistical relation.

PMP, as well as intensity-duration-frequency (IDF) curves used for return period analysis, are directly affected by climate change (Cheng & AghaKouchak, 2014; Rousseau et al., 2014). Climate change, and in particular the increase of ocean temperatures, contributes to accelerating and intensifying the water cycle (Huntington, 2006; Kunkel et al., 2013). The intensity and frequency of extreme precipitation events (including PMP) in the mid-latitudes is therefore expected to increase (IPCC, 2013). However, the changes in rainfall patterns are not homogeneous and show significant regional variations (IPCC, 2013). Also, in Canada, large floods usually occur during spring and are associated with rapid melting of the snow cover (Ouranos, 2015). PMF are therefore usually divided into spring and summer/fall seasons to evaluate both situations (Clavet-Gaumont et al., 2017).

In Quebec, climate change must be taken into account in all construction projects since 2017 (Assemblée nationale, 2017). However, the provincial regulations do not prescribe nor suggest any correction factor or methodological approach to evaluate the expected impacts of climate change on PMP or PMF. In Europe, the European Commission (2007) adopted the 2007/60 / EC Flood Directive in 2007 that also prescribes to consider climate change in construction projects but does not propose a specific methodology to include climate change in the design of the infrastructure either. A few European countries have therefore adopted national correction factors for maximizing design floods, depending on locations, estimated return periods, seasons, and size of the watersheds (Madsen et al., 2014). In practice, the integration of climate change in construction projects, and especially in mining operations, differs significantly from one project to the other, even locally, and is not always based on a scientific methodology.

The principal objective of this paper is therefore to propose a new methodological approach which integrates climatic data obtained from site specific models in the design of surface water management infrastructure to limit the risk of dam failure, overtopping and mine water spill to the environment. The application of this methodology to an active mine site located in the mining region of Abitibi in the province of Quebec, Canada, is also described thereafter to illustrate its main benefits compared to conventional approaches.

4.3 Methodology

4.3.1 Site description

Canadian Malartic Mine is an open-pit gold mine located in Western Quebec, in the Abitibi region. The mine processes over 50 000 tons of ore daily, and around 40 Mt of waste rock and 20 Mt of tailings were produced annually (WSP, 2015a) since its opening, in 2011. The projected size of the tailings impoundments upon closure is expected to exceed 637 ha in surface, with a maximum height of 47 m, while waste rock piles are expected to cover 475 ha with an average height of 90 m (BAPE, 2016). Water is collected on site through an extensive surface water collection system consisting of collecting ditches and basins of various sizes (Figure 4.1).

4.3.2 Catchment characteristics

The studied area covers a portion of the Canadian Malartic waste rock pile and tailings storage facilities that contains 4 watersheds (Figure 4.1). The area was divided in two sectors for modelling purposes (i.e. North and South), with a water level measuring station at each outlet (North Measuring station and South Measuring station respectively; Figure 4.1). The North sector consisted of two watersheds. The North Western (NW) watershed consisted of a small waste rock pile, surrounded by a collector ditch, and the North (N) watershed consisted of a fraction of the main waste rock pile, draining into the same collector ditch. Both areas were characterized by a steep topography, but the collector ditch surrounding was relatively flat, with a slope of 0.25% on average. The North collector ditch located downstream of the measuring station brought water to the mine pit, where it was pumped and recirculated in the mine operations. The end of this ditch was simulated in the models (see below) as a free outflow.

The South sector also consisted of two sub catchments. The South Western (SW) and the South (S) watersheds were both part of the same tailings storage facility (TSF) cell, surrounded by two different collector ditches. The slope of the collector ditch for the SW watershed was 0.1%, while the S one was around 1.4%. Both ditches drained water into another short ditch leading to the SW Basin (Figure 4.1), where water was pumped and then reused by the mine operations. The pumping

station in the SW Basin was integrated in the model, using the manufacturer's pumping capacities and the mine's operation level to simulate an automated pumping station.

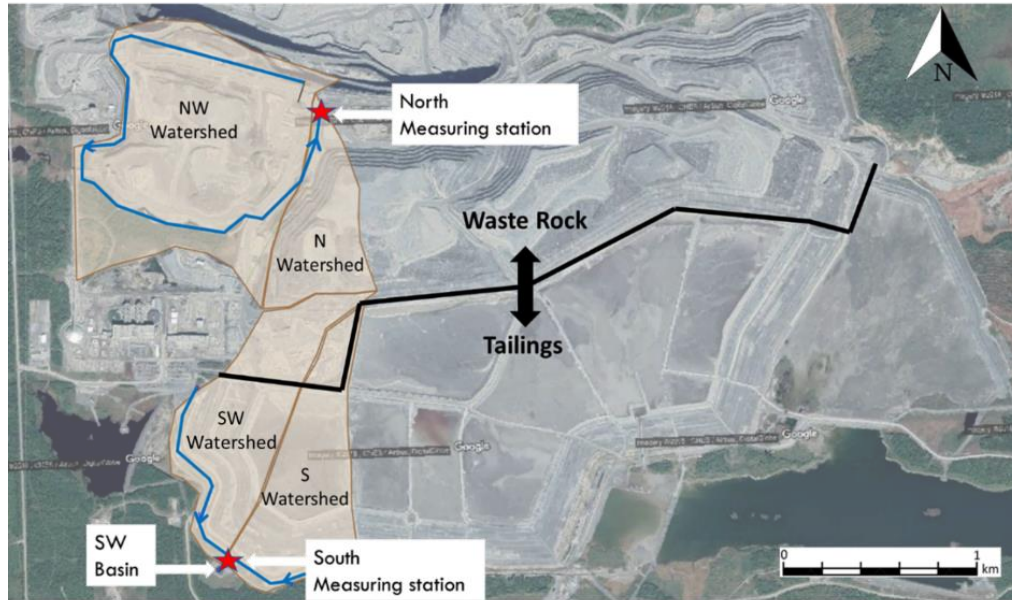


Figure 4.1 : Waste rock pile and tailings storage facility at Canadian Malartic Mine. Locations of the measuring stations are indicated with red stars. Ditches are indicated in blue. Watersheds are also identified with brown lines (photo from Google Earth, 2017).

4.3.3 Monitoring

In this study, rainfall was measured directly on site using a meteorological station installed on top of the waste rock pile at the Canadian Malartic Mine. The station was equipped with a S-RGB-M002 rain gauge (HOBO Data loggers, 2017) with an accuracy of $\pm 1\%$, and was calibrated on 2018, July 10, at the beginning of this study. However, the rain gauge was exposed to winds, which could limit the measurement accuracy.

Two measuring stations were installed in ditches connected to different watersheds around the tailings impoundment and the waste rock pile (Figure 4.1). Each station was instrumented with three Van Essen pressure sensors (DI261, DI501 and DI801; Van Essen Instruments, 2016) to measure the water head in the ditches with an accuracy of ± 0.5 cm. Two probes were placed along

the stream to measure the hydraulic head at 8.3 m (North Measuring station) and 5.1 m (South Measuring station) distance from each other. Measurements were recorded every 15 minutes. Probes were kept below the water stream surface at all time. A third probe was left in the open to measure atmospheric pressure and correct hydraulic head measurements (MEQ, 1999). Manual measurements were also compared to automatic monitoring for validation. The measuring stations were installed on 2018, June 20 and removed on 2018, October 31 (total monitoring time: 133 days).

4.3.4 Numerical simulations and calibration procedure

The general approach in this study was to use a calibrated rainfall-runoff and routing model to assess flood risk resulting from extreme precipitation with and without climate change effects. Rainfall-runoff models are commonly used to evaluate flood risks (Brocca et al., 2011; Wheater et al., 2005). Each watershed is modelled, calibrated and validated separately using field information to increase the precision of the predictions (Refsgaard, 1997).

In this study, rainfall-runoff at the Canadian Malartic Mine was simulated using Mike Hydro River software (formerly MIKE 11; DHI, 2017), using the Nedbod Afrstromnings Model (NAM; Nielsen & Hansen, 1973). The code is commonly used in climate change studies, in particular to assess the impact of climate change on the surface drainage system (Andersen et al., 2006) or in flood risk analysis (Dinh et al., 2012).

The main objective of the calibration was to represent the hydrological behaviour of the two catchments and their response to the main precipitation events. Storage, runoff and baseflow parameters were adjusted iteratively to represent as closely as possible the average water head in the ditches and the peak water levels measured during the monitoring period. The aim of the calibration process was to minimize the value of the mean absolute error (MAE; Willmott and Matsuura, 2005) of the peak water levels using the following equation:

$$MAE = [n^{-1} \sum_1^n |e_i|] \quad (4.1)$$

With n the number of observations and e the difference between the simulated and the measured data.

In the models, tailings were initially considered saturated (which well represents the in situ conditions upon disposal) before applying the PMP on the surface of the model. The waste rock was also initially set to saturated, to represent antecedent conditions limiting initial loss if the PMP was to occur following an important rainfall (WMO, 2009).

4.3.5 Climate data

4.3.5.1 Current climate conditions

The region is characterized by a cold temperate continental climate (MRNF, 2006). Summers are generally short and dry, while winters are long, cold and dry (MRNF, 2006). The average annual rainfall is 914 mm and the 100-year recurrence rainfall is 75.2 mm according to VAL D'OR A (ID WMO. 71941), the closest weather station operated by Environment and Climate Change Canada (Meteorological Services of Canada, 1971-2000). The largest rain measured in one day since 1951 (and prior to the present study) was 68 mm (July 23, 1999; Meteorological Services of Canada, 1951-2019).

4.3.5.2 Climate projection

Projected climate data were obtained from regional circulation models (RCM), using general circulation models (GCM) as boundary conditions. These models consist of mathematical relationships that simulate the different climatic processes at the surface of the Earth (biosphere, lithosphere, hydrosphere, cryosphere) and in the atmosphere (Charron, 2016). They take into account processes that can have an impact on the climate, such as solar radiation and anthropogenic emissions of greenhouse gas (GHG).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) developed four Representative Concentration Pathways (RCPs) to estimate the possible scenarios for GHG emissions (Moss et al., 2010; Van Vuuren et al., 2011). These RCPs include variables such as demographic growth, socio-economic development and technological change (Nakicenovic & Swart, 2000). They are named regarding radiative forcing values reached by 2100 (between 2.6 and 8.5 W/m²). RCP4.5 corresponds to an intermediate scenario with global emissions peaking in 2040 and decreasing afterwards, while RCP8.5 represents the scenario where GHG emissions would continue to

increase throughout the 21st century (IPCC, 2014). The RCPs are incorporated in climate models to calculate the projected climate in both GCM and RCM.

The approach used in this paper consisted in using a set of 11 simulations from the Canadian Regional Climate Model version 5 (CRCM5) to determine future extreme precipitation events. The CRCM5 simulations predict an increase of the average yearly temperature comprised between 2.5 and 7.5°C by 2100 at the Canadian Malartic Mine site, while yearly precipitation is expected to increase between 8 and 27%, depending on the model and RCP scenario compared to the 1970-2000 reference period. These projections were compared with results from the Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5; Taylor et al., 2012), an IPCC initiative which regroups and analyzes different climate models around the world. CRCM5 simulations well represented the range of variability in terms of temperature and precipitation rise by 2100 (Figure 4.2), therefore confirming that the chosen climate models did not have a significant bias when compared to other climate models.

RCM simulations were performed over an entire grid of 598 km². A post treatment was applied to the data coming from RCM to better represent local climate particularities (Ma et al., 2008; Dimri, 2009). The weather station on Canadian Malartic Mine site was installed in 2015, so historic climate data were obtained from the closest Environment Canada and Climate Change (ECCC) weather station, located at Val-d'Or Airport (Val d'Or A, OMM ID 71941, coordinates 48°03'N, 77°47'W), about 23 km East of the mine.

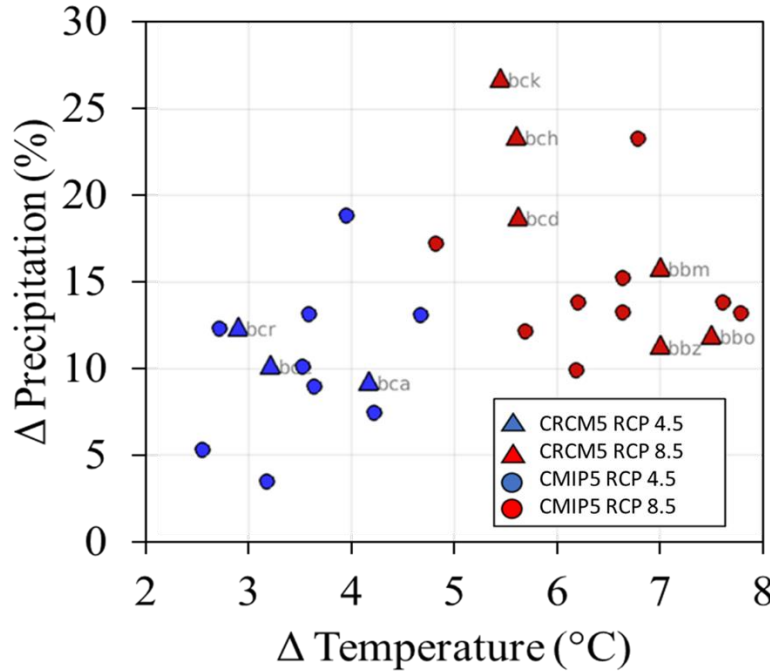


Figure 4.2 : Dispersion chart of CRCM5 and CMIP5 climate projections compared to the 1970-2000 reference period (adapted from Gobeil, 2018).

4.3.5.3 PMP

Two different approaches were used in this project to predict the PMP for projected climatic conditions: a meteorological and a statistical method.

4.3.5.3.1 Methods description

The meteorological method considered here is based on major historical storms observed in an area considered meteorologically homogenous within the zone of interest. Only the largest 10% events of each year are selected for the calculation (Clavet-Gaumont et al., 2017). The PMP can then be calculated:

$$P_{max} = P_{event} \cdot r \quad (4.2)$$

Where P_{max} is the resulting maximized rainfall. P_{event} represents each major 24-hour rainfall event, multiplied by r , the maximization ratio, that is calculated using:

$$r = \frac{PW_{100}}{PW_{event}} \quad (4.3)$$

With PW_{100} the monthly maximal precipitable water value with a 100-year return period divided by Pw_{event} , the precipitable water of the event. The precipitable water represents the mass of water in the vapour form in the vertical column of the atmosphere over a given surface (WMO, 2009). This maximization ratio is applied to each major rainfall (equation 4.2) event and the maximal calculated value of P_{max} represents the PMP.

The method used in this project estimates the PMP for a single RCM grid scale of 598 km², which is the highest resolution currently available using RCM simulations for this area. This grid scale tends to give lower PMP estimations than other methods using smaller storms (usually around 25 km²; WMO, 2009, Rousseau et al., 2014)

The second approach used to estimate the PMP was the Hershfield statistical method which is often recommended for small watersheds (<1000 km²; WMO 2009) and can be described (Hershfield, 1965):

$$PMP = \bar{X}_n + K_m S_n \quad (4.4)$$

With $\bar{X}_n$ the mean maximal annual rainfall depth added by a frequency factor (K_m , usually between 5 and 20 – see Results section below) depending on the mean maximum annual rainfall (WMO, 2009), multiplied by the standard deviation (S_n).

Both spring and summer/fall PMP were determined. Spring was defined as the period when snowmelt can have a significant impact on runoff, i.e. when the snow cover exceeds 10 cm. This period generally lasts between January and June.

4.3.5.3.2 PMP relative change and values

PMP was then simulated for 2041-2070 and 2071-2100 periods, using meteorological and statistical calculation methods for spring and summer/fall PMP. The total 24-hour projected PMP indicated an increase of the rainfall between 1971-2000 (reference period) and 2071-2100 comprised between 18 and 30% depending on the season and calculation method. PMPs were 2 to 4 times higher with the statistical method than with the meteorological approach whatever the calculation period (Tableau 4.1). For example, the projected spring PMP for 2071-2100 was 71 mm

using the meteorological method and 240 mm (i.e. 3.4 times higher) using the statistical method. The statistical method also gave the highest relative increase of PMP for both spring and summer/fall period (+26 and +30% respectively, compared to +18 and +23% with the meteorological method). These extreme rainfalls were applied as boundary conditions in numerical simulations to evaluate the impact of different climate change scenarios and PMP calculation methods on surface water infrastructure.

Tableau 4.1 : Calculated PMP at Canadian Malartic Mine site for reference period and future periods (2041-2070 and 2071-2100) using meteorological and statistical method.

Method	Period	Reference period	2041-2070	2071-2100
Meteorological	Spring	60 mm	69 mm	71 mm
	Summer/Fall	128 mm	150 mm	158 mm
Statistical	Spring	191 mm	225 mm	240 mm
	Summer/Fall	294 mm	362 mm	382 mm

The difference between the two methods can mostly be explained by the methodology used to calculate the PMP value with the meteorological method. The use of the average PMP on a grid point gave similar results in a study of the same type in Quebec (Rousseau et al., 2014). Past observations for this region indicate a maximum annual rainfall of 24 hours up to 35 mm in spring and 70 mm in summer (Gobeil, 2019). Also, maximum annual rainfall under 100 mm tend to maximize the frequency factor K_m (between 15 and 20) , while the high standard deviation (8 to 25 mm) contributes to maximizing the value of PMP calculated by the Hershfield method (Gobeil, 2019; Hershfield, 1965).

The temporal distribution of precipitation can have a significant impact on the observed maximum flood (Máca & Torfs, 2009). A higher temporal definition of precipitation events was required to accurately simulate surface water, since the precipitation calculated with climate models are 24-hour value and averaged daily precipitation data tend to minimize simulated discharge peaks (Alfieri et al., 2008; Bezak et al., 2018). The largest runoff on small watersheds are usually caused by brief, intense rain events (SCS, 1986). In this study, Type II 24-hour synthetic rainfall distribution developed by the Natural Resources Conservation Service was used to distribute

average daily data obtained from climate models (NRCS, 2007). The PMP were distributed according to a SCS type II rain (Figure 4.3), as generally recommended in Quebec (Rivard 2011).

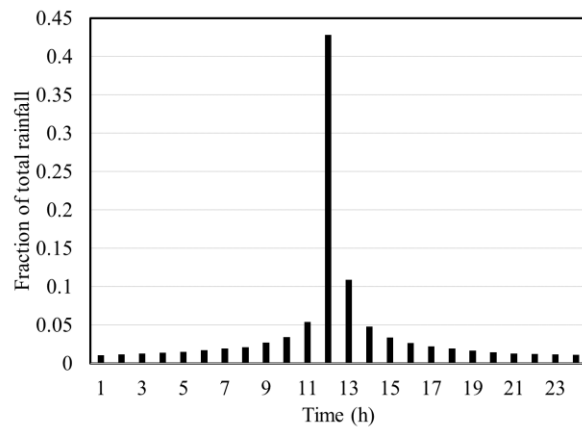


Figure 4.3 : SCS Type II rainfall distribution of PMP simulated in this study (adapted from NRCS, 2007).

4.3.6 Snowmelt simulation

The maximum annual snow cover for the reference period (1971-2000) was obtained from Val d'Or A station. A generalized extreme value distribution based on the maximum likelihood approach (Clavet-Gaumont et al., 2017) was then used to determine a 100-year return period snow cover. Since the maximum snowpack is expected to decrease in Canada by 2100 because of climate change (Bussière et al., 2017; Clavet-Gaumont et al., 2017), using current climate conditions to simulate future snowmelt was deemed a conservative, yet realistic, simplification. The projected climate simulations datasets for 2071-2100, including daily mean temperature, were then used to determine the spring period most favourable for snowmelt, using the highest average temperature of three consecutive days. The three-day period was chosen to simulate snowmelt lasting longer than the concentration time of the catchments of the site, to maximize runoff. In this case study, the 100-year return period snow cover of 148 cm was combined with the warmest three-day period of 13, 14 and 15 °C.

Snowmelt was calculated using the degree-day snowmelt coefficient method to determine the resulting runoff (NRCS, 2007):

$$Q_s = C_{snow} * T_m \quad (4.5)$$

With Q_s the runoff from snowmelt, T_m the mean daily temperature and a C_{snow} , a fixed coefficient to calculate the amount of melted snow. The retained value for C_{snow} was 2.74, as first proposed by Horton (1915) and suggested by NRCS when no field data is available (NRCS, 2007).

Finally, the spring PMP was applied when snowmelt runoff was maximal. Tailings were considered still frozen and impervious (FERC, 2001). The water table in the waste rock pile was simulated at surface level to simulate the typical situation after winter (FERC, 2001).

4.4 Field and numerical results

4.4.1 Measured rainfall and runoff

Rainfall was measured from June 20 to October 31 (Figure 4.4). The monitoring period was more humid than usual, with a total of 544 mm precipitation over 133 days (average precipitation in the region for this period is 394 mm for the reference period; Tableau 4.2). The number of days with significant rainfall (> 5 mm) was close to the monthly average, except for October 2019 when 9 days with significant rainfall were observed instead of 6 days in general. There were also a few dry periods; for example, only 7 mm rainfall was recorded during the 15-day period between September 6 and 20.

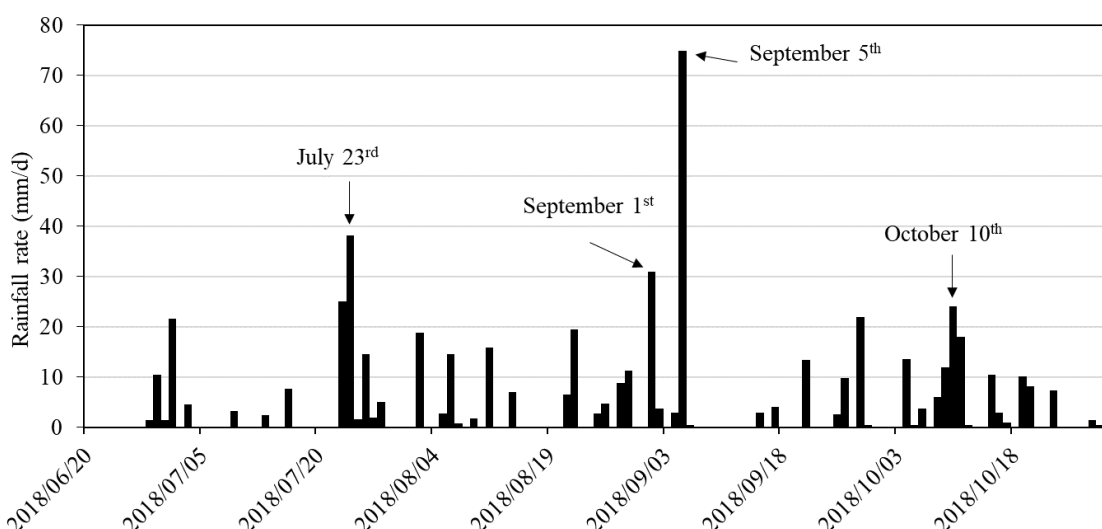


Figure 4.4 : Measured rainfall from June 20 to October 31 at Canadian Malartic Mine weather station. Four major events (precipitation > 35 mm/d) are identified (also see Figure 4.5).

Tableau 4.2 : Monthly rainfall and number of days with over 5 mm of rain during monitoring period compared to nearest meteorological station (Val d'Or A) monthly mean during reference period (1971-2000)

Period	Total rainfall (mm)		Number of days > 5 mm rain	
	Observed	Mean (Reference period) At Val d'Or A	Observed	Mean (Reference period) At Val d'Or A
June (20 to 30)	13	34	1	2
July	126	95	6	6
August	115	93	5	6
September	168	100	5	6
October	121	72	9	6
Total	544	394	26	26

The rainfall events that occurred during summer 2018 were particularly intense, and two events were greater than the 5-year return period rainfall for a 24-hour rainfall (i.e. > 50.2 mm). In total, four major rain events (> 35 mm) were observed during the monitored period (Figure 4.4). A 74.6-mm precipitation over 9 hours was recorded on September 5, which exceeded the 200-year return period for a 12-hour rainfall (= 70 mm; Meteorological Services of Canada for 1951-2014 period). July 23 and September 5 events were characterized by intense rainfalls of 15 and 35 mm/h respectively (Figure 4.5). September 1 and October 10 events were more evenly distributed in time: the first one never exceeding 10 mm/h for a total of 35 mm over 15 h; the later precipitating a total of 40 mm over 31 hours, with a maximum intensity of 4.4 mm/h (Figure 4.5).

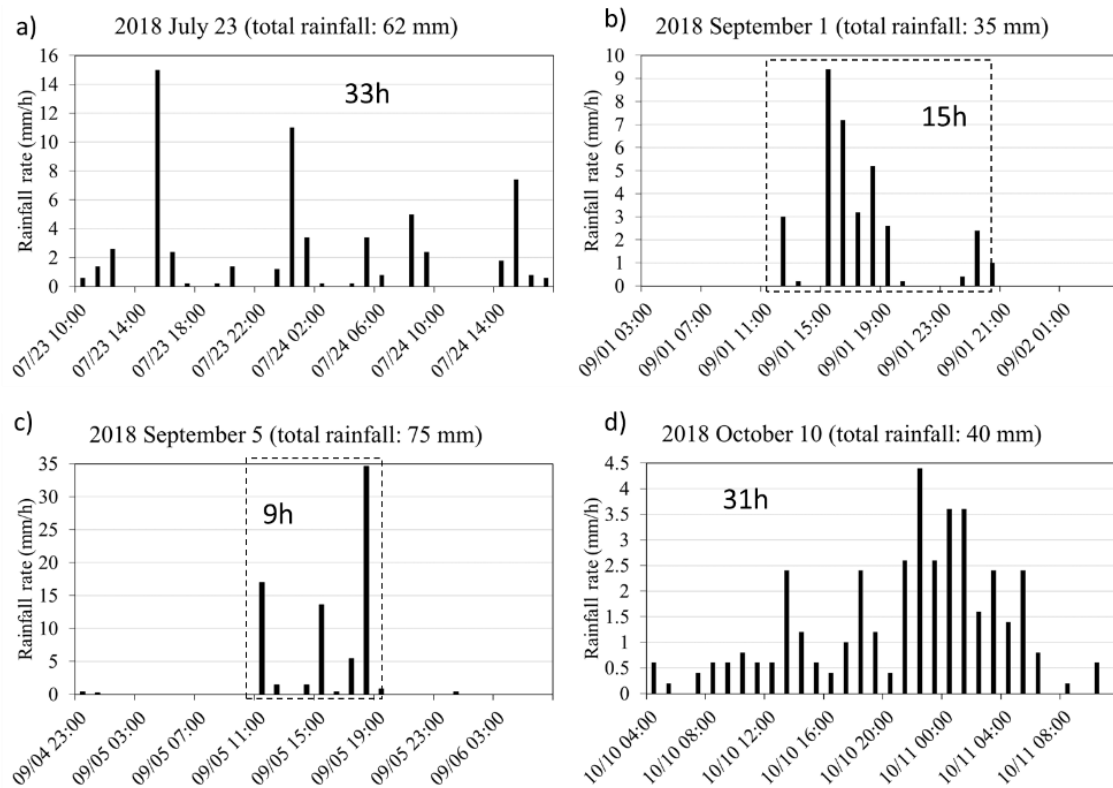


Figure 4.5 : Time distribution of 4 major rainfall events measured during summer 2018 at Canadian Malartic Mine. The horizontal scale is the same for all four rainfall events (total length = 33 hours). Dashed lines show the rainfall duration used for calibration.

In general, significant rises of the water levels (>10 cm) were observed following daily rainfalls over 20 mm at both Measuring stations (Figure 4.6). The response time between the rainfall and

the increase of water levels in the ditches, and the intensity of the response, were a function of the location, size and nature of the catchment. In general, the water levels at the South Measuring station (Figure 4.6a) were more intensively and more rapidly affected by precipitation than at the North Measuring station (Figure 4.6b). For example, the peak runoff after September 5 precipitation event was observed 3.5 hours later at North Measuring station (waste rock pile) than at South Measuring station (tailings storage facility).

On September 5 storm, over 77.8 mm of rain precipitated in 24 hours, exceeding the 100-year return period value of 75.2 mm, and resulted in an overflow estimated to 1000 m³ (Mine Canadian Malartic, 2018) at the SW Basin over approximately 2 hours (according to the water levels observed at the South Measuring station).

The amplitude of the response over the monitoring period was, however, not linearly linked with the intensity of the precipitation, but was particularly affected by the initial surface condition. For example, at the North Measuring Station, August 22 event (26 mm in 14 hours), which occurred after a week-long drought, generated a 2 cm water level rise, while September 28 event (22 mm in 13 hours), which occurred after a 10 mm precipitation two days before, generated a 10 cm rise. Similar observations were made throughout the summer for both stations.

The water head decrease was significantly slower (up to a few days) at the North Measuring station, compared to the South Measuring station (a few hours). The quick oscillations observed at the South Measuring station (Figure 4.6b) were caused by the pumping occurring in the SW Basin.

4.4.2 Numerical simulation of surface hydrology during summer 2018

Model parameters were calibrated iteratively to simulate the observed discharges, both in terms of amplitudes and temporal variations. Each watershed was characterized by its runoff distribution and specific storage capacity, runoff and initial conditions (Tableau 4.3). The four major rainfall events (Figure 4.5) were used for calibration.

The maximum water content in surface storage mainly controlled the initial infiltration as well as the evaporation capacity. It represented the water stored in the first centimetres of the soil and the surface depressions. This parameter was first adjusted to simulate the measured baseflow throughout the summer; minor adjustments were also made to better represent the initial infiltration

of smaller rainfall events. The storage in the root zone was considered minimum (1 mm), because the studied mine site was almost entirely free of vegetal cover. The overland flow runoff coefficient corresponded to the fraction of water directly flowing over the surface (i.e. not infiltrating). Its value for the North sector (0.71) was more than twice the value for the South sector (0.28). Runoff amplitude was particularly sensitive to this parameter, so it was adjusted to represent as accurately as possible the amount of water in the calculated peak runoff. The value obtained (0.71) at the North sector was relatively close to other field studies on waste rock piles, where values ranging from 0.41 to 0.85 were reported (Nichol et al., 2003; Su & Miller, 1995; Wright, 2006). The overland flow runoff coefficient was expected to be higher in the South sector than in the North because of the relatively lower saturated hydraulic conductivity of tailings (FERC, 2001). However, the calibrated value was low (0.28) and could be explained by the fact that a part of the overland flow and interflow of the South sector could flow to other catchments of the TSF. Models could simulate precisely the quantity of water flowing towards the SW Basin (Figure 4.6b).

The time constant for routing interflow determined the amount of interflow, with larger values decreasing the amount of interflow. The amount of interflow is expected to be higher for more permeable material (Steenhuis et al., 2005). The calibrated value was 400 h in the North sector (waste rock) and 600 h in the South sector (tailings; Tableau 4.3). The time constant for routing overland flow corresponded to the time required for the water to flow overland to the outlet. It was adjusted to represent the time between the peak rainfall rate and the peak generated runoff. A steep slope, a small catchment basin and a regular surface generally lead to lower values for this parameter (Woodward, 2010). The time constant for routing overland flow was therefore smaller in the South sector (2 h), than in the NW (17 h) and N (4 h) catchments (Tableau 4.3).

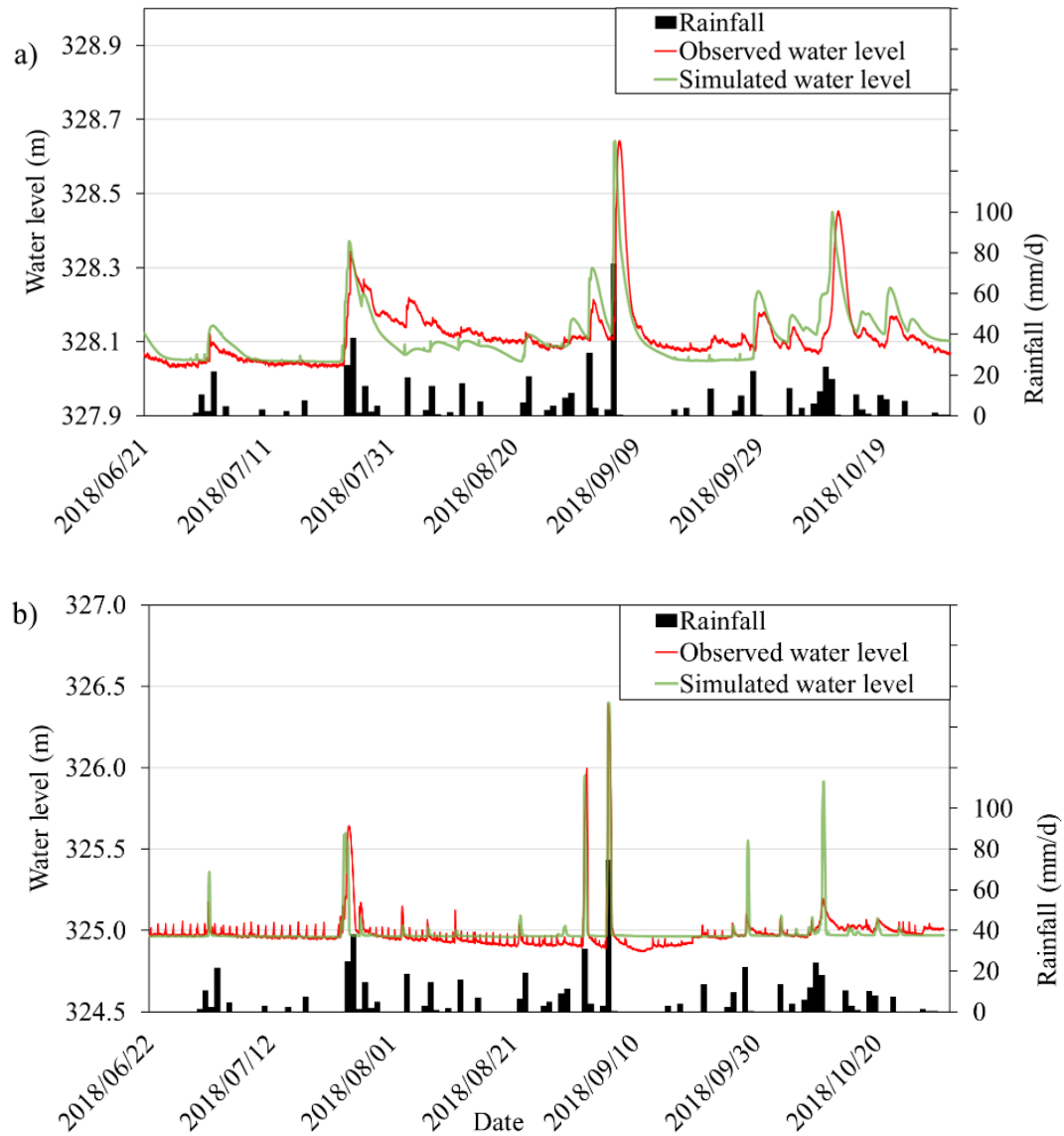


Figure 4.6 : Observed (red line) and simulated (green line) water levels (masl) and observed daily rainfall (black bars) at a) North Measuring station and b) South Measuring station.

Tableau 4.3 : Watershed properties used in the NAM rainfall-runoff model. Watershed location is shown in Figure 4.1.

Parameter	NW watershed	N watershed	SW watershed	S watershed
Area (km ²)	2.66	0.64	0.815	0.541
<i>Storage</i>				
Maximum water content in surface storage (mm)	20	20	12	12
Maximum water content in root zone (mm)	1	1	1	1
<i>Runoff</i>				
Overland flow runoff coefficient	0.71	0.71	0.28	0.28
Time constant for routing interflow (h)	400	400	600	600
Time constant for routing overland flow (h)	17	4	2	2
<i>Initial conditions</i>				
Baseflow discharge (m ³ /s)	0.015	0.005	0.01	0.01
Interflow discharge (m ³ /s)	0.05	0.015	0.015	0.01

The baseflow was well simulated throughout the monitoring period at both stations (Figure 4.6). The difference between measured and simulated water heads were fewer than 10 cm for the duration of the monitoring period outside of rainfall events. During major rainfall events, the MAE (Equation 4.1) of the maximum water level for the four major events was less than 3 cm (9% relative error on the mean water level rise) at the North Measuring station and 4 cm (4% relative error on the mean water level rise) at the South Measuring station for the three major events retained for calibration. The model was less precise to simulate smaller rain events (< 25 mm/d) which usually resulted in simulated discharge peaks larger than observed at the North Measuring station and smaller simulated peaks at the South station. For example, a 22 mm rainfall (September 28) resulted in a 10 cm rise in the field (North station), but an 18 cm rise in the model. A 58 cm rise (influenced by the accumulation of water in the downstream basin) was observed at the South Measuring station (Figure 4.6b) for the same event, while the calculated rise was only 14 cm. These differences were, however, deemed acceptable, since the objective of the study was to evaluate the impact of extreme precipitation events.

4.4.3 Summer/fall PMP simulations

4.4.3.1 Reference period

Once calibrated, the models were extrapolated to evaluate the impact of a PMP on runoff and water levels in ditches. The simulated peak runoff following a PMP for the reference period was $3.61 \text{ m}^3/\text{s}$ for the meteorological method, and $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$ for the statistical method (Figure 4.7a) at North Measuring station (waste rock). The corresponding total runoff volumes were $313\,000$ and $654\,000 \text{ m}^3$ for the statistical and meteorological methods, respectively. At the South Measuring station (tailings), the adjacent pumping basin was filled faster than the pumping and storage capacity, therefore resulting in a spill. The simulated total runoff volume was $92\,200 \text{ m}^3$ using the meteorological method, and $159\,000 \text{ m}^3$ for the statistical method, resulting in a $27\,400$ and $86\,400 \text{ m}^3$ overflow, respectively (Figure 4.7b). These simulations also showed that both increases and decreases of the water levels occurred faster in the South sector (tailings) than in the North sector (waste rock), as observed during summer 2018 for smaller rainfall events.

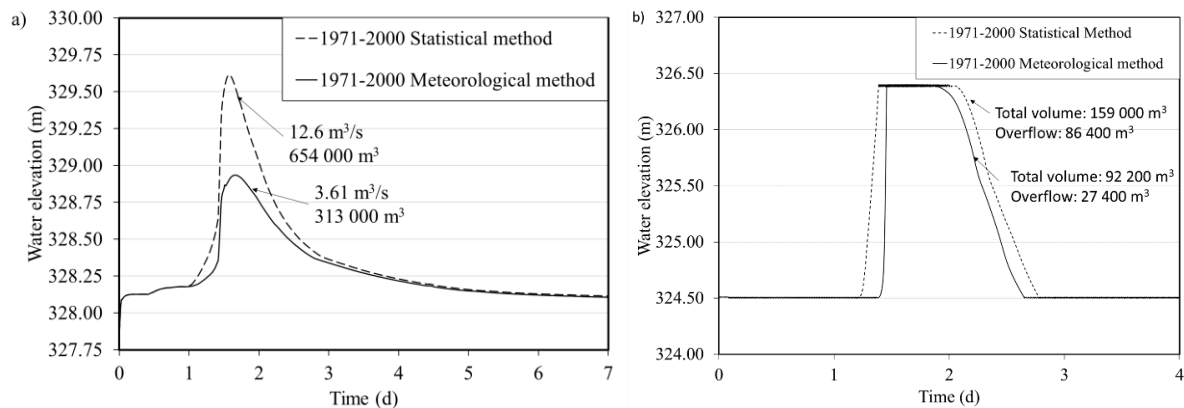


Figure 4.7 : Water elevation at North (a) and South (b) Measuring station following Reference period PMP using statistical (294 mm) and meteorological (128 mm) method. Day 1 corresponds to the beginning of the precipitation. Arrows show peak discharge and (a) total runoff volume and (b) total runoff volume and overflow during the 7 days simulation.

4.4.3.2 Climate change projections

Similar simulations were carried out using projected PMP for 2041-2070 and 2071-2100 periods, using both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The choice of the RCP scenario had a significant

influence on the PMP value (Tableau 4.4). The simulated peak discharges were in average 3.6 times higher for the statistical method at the North Measuring station, compared to the meteorological method, while the total runoff volume over the entire simulation was in average 2.1 times higher for the statistical method.

The simulations at the South Measuring station (Tableau 4.5) evaluated the total discharge and overflow volume associated with the collector basin just downstream of the Measuring station instead of the peak discharge. The impact of climate change showed similar trends in terms of total runoff volume differences between the RCP scenarios. The PMP calculation method was, in this case also, the most sensible parameter for total runoff generation (1.8 times higher runoff in average for the statistical method). Results also showed that the resulting overflow from PMP could be significant for rainfall exceeding the 100-year return period of 75.2 mm (used for design). For example, a rise of 3 mm in the 24-hour PMP (i.e. from 147 to 150 mm) generated an overflow of around 1000 m³, which was similar to the volume released during the September 5 storm (77.8 mm in 24 hours).

Tableau 4.4 : Calculated total runoff volume over the 7 days simulation and peak discharges for statistical and meteorological PMP for reference period, 2041-2070 and 2071-2100 periods using RCP4.5 and 8.5 at North Measuring station.

Method	Period and RCP scenario	PMP (mm)	Peak discharge (m ³ /s)	Runoff volume (x1000 m ³)
Meteorological	Reference period	128	3.61	313
	2041-2070 RCP4.5	142	4.23	342
	2071-2100 RCP4.5	147	4.46	353
	2041-2070 RCP8.5	150	4.60	359
	2071-2100 RCP8.5	158	4.98	375
Statistical	Reference period	294	12.6	654
	2041-2070 RCP4.5	325	14.7	720
	2071-2100 RCP4.5	334	15.3	738
	2041-2070 RCP8.5	362	17.3	796
	2071-2100 RCP8.5	383	18.8	839

Tableau 4.5 : Calculated total runoff volume over the 7 days simulation and overflow volumes for statistical and meteorological PMP for reference period, 2041-2070 and 2071-2100 periods using RCP4.5 and 8.5 at South Measuring station.

Method	Period and RCP scenario	PMP (mm)	Runoff volume (x1000 m ³)	Overflow volume (x1000 m ³)
Meteorological	Reference period	128	92.2	27.4
	2041-2070 RCP4.5	142	97.8	32.0
	2071-2100 RCP4.5	147	99.9	33.7
	2041-2070 RCP8.5	150	101	34.7
	2071-2100 RCP8.5	158	104	37.4
Statistical	Reference period	294	159	86.4
	2041-2070 RCP4.5	325	172	98.4
	2071-2100 RCP4.5	334	176	102
	2041-2070 RCP8.5	362	187	112
	2071-2100 RCP8.5	383	195	120

4.4.4 Spring PMP and snow cover meltdown simulations

The calculated spring PMP (71 mm) using the meteorological method was lower than the summer/fall PMP (158 mm) for the 2071-2100 period using RCP8.5, but this did not take into account previous snowpack. Spring PMP was therefore simulated in the models considering maximum snow cover to evaluate the contribution of snowmelt to the PMF (see Methodology section for more details). The RCP8.5 using the 2071-2100 period was used in these calculations (see Methodology section). The maximum simulated meltdown corresponded to approximately 41 mm/d of water, significantly contributing to increasing runoff before and after the peak discharge caused by the spring PMP (solid line in Figure 4.8). However, the peak discharge (3.24 m³/s) was smaller than the evaluated peak discharge for summer/fall PMP (4.98 m³/s; dashed line in Figure 4.8). In these simulations, the runoff generated strictly from snow meltdown peaks before the cover of snow is fully melted (around the beginning of day 2; Figure 4.8), indicating that the thickness of the maximum snow cover is not a limiting factor in generating a higher peak discharge. However, the total runoff volume during the 7 days of the simulation was larger for the spring PMF (529 000 m³), compared to 375 000 m³ for the summer/fall PMF.

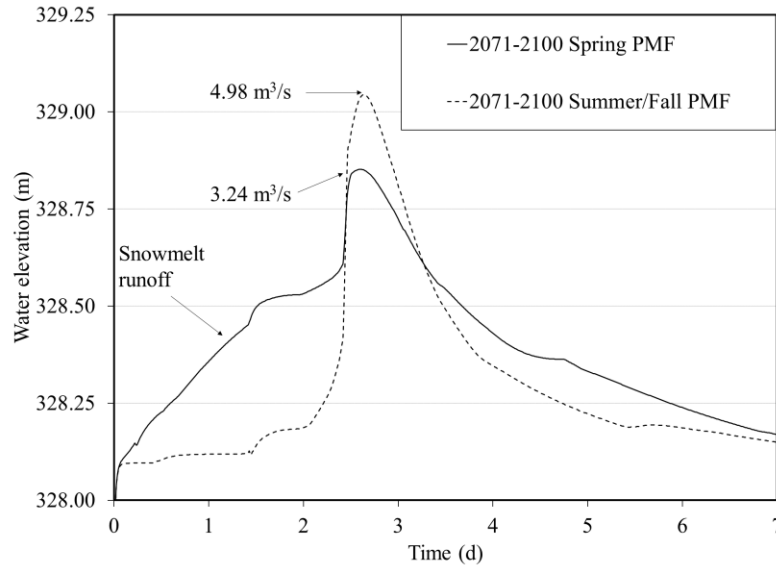


Figure 4.8 : 2071-2100 simulated spring and summer/fall PMF using meteorological method and RCP8.5 at North Measuring station. PMP is applied in the middle of day 2, when runoff from snowmelt is maximal.

4.5 Results analysis and discussion

4.5.1 Monitoring and calibration

Calibration of numerical models based on field data is usually necessary to obtain an acceptable precision on flood risk assessment (Grunwald & Norton, 2000; Mohammed et al., 2004). The Overland flow runoff coefficient has been identified as a leading cause of uncertainty for assessing peak discharges in many hydrological studies (Adib et al., 2019; Liu & Sun, 2010; Wang & Yang, 2018). The impact of this parameter on peak discharge was also assessed in the present study. The overland flow runoff coefficient was varied between 0.41 and 0.85, typical values reported from various field studies for similar materials (Nichol et al., 2003; Su & Miller, 1995; Wright, 2006). Variations within this range could cause a difference in the peak discharge estimation from -56% to +31% (Table 4.6). The absence of calibrated, site-specific data could contribute to significantly oversize the infrastructure or increase the risk of uncontrolled spills. For example, using a coefficient up to 0.85. instead of 0.71 (as suggested by Nichol et al., 2003, for the study of an

experimental waste rock pile), for the North sector, at Canadian Malartic Mine site, would mean that the 3-meter-wide ditch would have to be 0.14 m higher to manage the additional 1.54 m³/s.

Tableau 4.6 : Calculated peak discharges at North Measuring station for 2071-2100 RCP8.5 PMP varying the Overland flow runoff coefficient parameter using the meteorological method. The value obtained in the calibration process was 0.71.

Overland flow runoff coefficient	Peak discharge (m ³ /s)
0.41	2.20
0.45	2.53
0.56	3.48
0.61	3.96
0.65	4.36
0.68	4.66
0.70	4.87
0.71	4.98
0.72	5.08
0.74	5.30
0.77	5.65
0.81	6.06
0.85	6.52

Field monitoring should rather include the measurement of direct discharge to estimate more directly and precisely the rating curve and then deduce the flow throughout the monitoring period, instead of using an indirect method to deduce flow such as in this study (Turnipseed & Sauer, 2010). Such approach would also have made possible to measure the total volume of runoff, thus simplifying the calculation of water balance throughout the season, helping significantly the validation of the calibration process (ICMM, 2013; Pearce et al., 2009). A high resolution distributed rainfall-runoff model could also bring additional useful information, making it easier to evaluate the impact of small local peculiarities (e.g. the presence of waste rock between the tailings cells where the soil is more permeable) on runoff (Carpenter & Georgakakos, 2006; Cázares-Rodríguez et al., 2017). Another study recommended the use of tracer tests to evaluate the impact of extreme rainfalls on baseflow, interflow and resurgence processes (Lyon et al., 2008).

4.5.2 Impact of RCP scenarios on PMF

The choice of the RCP scenario had limited effect on the prediction of the peak discharges, when compared to the general increase associated with climate change. For example, the expected peak discharge from PMP at North Measuring station is expected to rise from 3.61 to 4.98 m³/s (38% rise) by the end of the current century using RCP8.5, compared to the reference period. Using RCP4.5 instead of RCP8.5 results in a peak discharge of 4.46 m³/s (24% rise from reference period). Preparing for the worst-case scenario (especially for permanent structures that could not be easily modified in the future) would therefore be an acceptable approach.

The precision and representativity of the results obtained with this method depend, however, on the quality and availability of climate simulation data. An alternative to the use of site-specific climate change projections (as implemented in this study) could be the determination of regional correction factors (Michaud et al., 2013), but this technique remains less representative than a local study, especially for precipitation data, where local factors have an significant impact (Roy et al., 2017).

PMP used in this study were calculated using the average precipitation over a single RCM tile of 598 km² in future climate, which is the finest resolution of simulations currently available for this region (Gobeil, 2019). Other meteorological methods not integrating climate change are usually based on local data from weather stations. In this case, PMPs are often evaluated for various storm radius around this specific point. Generally, smaller storm radius generates more intense rainfalls (WMO, 2009). This method makes it possible to evaluate PMPs over smaller areas (generally down to 25 km²; WMO, 2009), but climate change cannot be directly integrated, since these PMPs are calculated using past observations. As a consequence, the intensity of the PMPs used in this study were lower than those calculated using 25 km² storms (SNC-Lavalin, 2004) and could not be compared directly with those obtained with other methods, or be used directly in the design (Rousseau et al., 2014). However, the relative change related to climate change on the 598 km² tile could be used as a correction factor, coupled to a PMP calculated on a smaller storm size when used for design (Rousseau et al., 2014).

4.5.3 Impact of snowmelt on PMF

The simulation of snowmelt PMF indicated simulations highlighted the fact that spring PMF were smaller than summer/fall PMF in terms of peak discharges, but that they could generate a higher total runoff over a 7 days period following a spring PMP, especially in the case a thick snow cover would be present on site. Evaluating snowmelt using the degree-day method with a fixed coefficient from the literature (such as in this study) is an important simplification of the snowmelt process; a calibrated method, based on physical processes, would be more representative of field conditions (Kuchment & Gelfan, 1996). Additional data to better evaluate runoff generated from snowmelt, including using a variable and more representative seasonal coefficient (Rango & Martinec, 1995) and incorporating solar radiation (DHI, 2017; Zuzel & Cox, 1975) could significantly improve the precision of the evaluation of snowmelt on spring PMF. The 100-year return period snow cover used in this study was also calculated from past observations and did not consider climate change. The use of climate model simulations to determine the expected 100-year snow cover could give more representative results. The approach used in this paper was, however, deemed a conservative simplification, considering that a diminution of snow cover is expected with climate change, and could lead to runoff overestimation.

4.5.4 Synthesis of the proposed methodology

The methodology presented in this article first aimed at determining the main characteristics of watersheds to calibrate a hydrologic model, and then extrapolate this model for extreme rainfall events to evaluate design flood runoffs. This approach differs from the approach commonly used in the mining industry in North America, which consists in using the SCS-CN or the Rational method with empirical curve numbers and runoff coefficients established from the literature to evaluate design flood runoffs (e.g. Bogabbri Coal, 2014; Golder, 2015; StrataGold, 2017; Perilya, 2018). This approach also allows for a more site-specific design according to observed catchment characteristics, which significantly decreases the uncertainty of the simulations. For this case study, model calibration was carried out on existing facilities. In practice, field data is not always available during infrastructure design phase. Adjacent land use with similar materials and topography could be instrumented to obtain data (Blöschl, 2006), but the accuracy of such a method was not evaluated in this study.

Another important aspect of this methodology is that rainfall patterns were obtained from RCMs, downscaled and coupled with a climatological analysis. Projected PMPs were evaluated using different GHG emission scenarios and future time period, instead of using a statistical method on past data, with the assumption that the climate is static.

4.6 Conclusion

The main goal of this study was to propose a new methodology to better integrate climate change in the design of surface water infrastructure and apply it to a case study at Canadian Malartic Mine site. Field monitoring provided data to calibrate a runoff and flow model that was extrapolated to adequately simulate floods associated with extreme precipitation events. This model was then used to calculate with better precision the expected peak discharge and total runoff volume for different project floods, taking into account projected climate change with different RCP scenarios.

This study showed that climate projections at Canadian Malartic Mine site using a set of 19 RCM simulations predicted an increase in peak discharges up to 36% for the meteorological method, and up to 48% with the statistical method using RCP8.5, underlining the need to prepare for future extreme events to minimize risk on infrastructure's integrity. Choosing either RCP4.5 or RCP8.5 represents an uncertainty that can lead to significant expenses or risks for the industry. Design using the most pessimistic scenario is not necessarily the most suitable way to adequately prepare for climate change. Using different climate change scenarios to establish a range of long-term adaptation scenarios is recommended for larger infrastructure (Bloemen et al., 2018). The approach presented in this paper therefore aims to carry out the design in phases according to probable future conditions, anticipating construction needs based on future climate along time (Wise et al., 2014). This flexible approach can be a compromise to avoid the risk of oversizing associated with using the worst case climate scenario (Buurman & Babovic, 2016; Wise et al., 2014).

The proposed approach presented in this study can easily be adapted to any mine site provided a local climate change study and proper monitoring to determine specific catchment particularities. Overall, this study highlighted the importance of obtaining site-specific data both for climate and runoff characteristics in order to design the infrastructure that are better adapted to the conditions that are most likely to occur during its lifespan.

4.7 Acknowledgements

The authors thank the RIME UQAT-Polytechnique for providing funding for this project. We also acknowledge the financial support of the FRQNT (Project number 2017-MI-202264). Additional support was also provided by the employees at URSTM-RIME who assisted with the field work and Mine Canadian Malartic partner. The authors would also like to acknowledge MIKE Powered by DHI for the academic licence that was used in this project

4.8 References

- Adib, A., Lotfirad, M., & Haghighi, A. (2019). Using uncertainty and sensitivity analysis for finding the best rainfall-runoff model in mountainous watersheds (Case study: the Navrood watershed in Iran). *Journal of Mountain Science*, 16(3), 529-541.
- Alfieri, L., Laio, F., & Claps, P. (2008). A simulation experiment for optimal design hyetograph selection. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(6), 813-820.
- ANCOLD. (2015). Flood evaluation and dam safety. :
- Assemblée nationale. (2017). Loi modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement afin de moderniser le régime d'autorisation environnementale et modifiant d'autres dispositions législatives notamment pour réformer la gouvernance du Fonds vert (vol. Projet de loi no 102): Éditeur officiel du Québec.
- BAPE. (2016). Projet d'agrandissement de la mine aurifère Canadian Malartic et de déviation de la route 117 à Malartic. :
- Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S., & Mikoš, M. (2018). Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results. *Geosciences*, 8(2), 69.
- Bloemen, P., Reeder, T., Zevenbergen, C., Rijke, J., & Kingsborough, A. (2018). Lessons learned from applying adaptation pathways in flood risk management and challenges for the further development of this approach. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 23(7), 1083-1108.
- Blöschl, G. (2006). Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- Bogabbri Coal. (2014). Surface Water Management Plan. February 2014.
- Bowker, L. N. C., David M. (2016). Root Causes of Tailings Dam Overtopping: The Economics of Risk & Consequence. Communication présentée à 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping Ft. Collins, Colorado, USA.
- Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2011). Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrological processes*, 25(18), 2801-2813.

- Bussière, B., Demers, I., Charron, P., Bossé, B., Roy, P., Jébrak, M., & Trépanier, S. (2017). Analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois.
- Buurman, J., & Babovic, V. (2016). Adaptation Pathways and Real Options Analysis: An approach to deep uncertainty in climate change adaptation policies. *Policy and Society*, 35(2), 137-150.
- Carpenter, T. M., & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of hydrology*, 329(1-2), 174-185.
- Cázares-Rodríguez, J. E., Vivoni, E. R., & Mascaro, G. (2017). Comparison of Two Watershed Models for Addressing Stakeholder Flood Mitigation Strategies: Case Study of Hurricane Alex in Monterrey, México. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(9). doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0001560
- Charron, I. (2016). Guide sur les scénarios climatiques: utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation (p. 94). Montréal, Qc, Canada.
- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Scientific reports*, 4, 7093.
- Clavet-Gaumont, J., Huard, D., Frigon, A., Koenig, K., Slota, P., Rousseau, A., Klein, I., Thiemonge, N., Houdré, F., & Perdikaris, J. (2017). Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 11-25.
- Davies, M., Martin, T., & Lighthall, P. (2000). Mine tailings dams: when things go wrong. *Tailings Dams*, 261-273.
- DHI. (2017). MIKE HYDRO River User Guide.
- FERC. (2001). Chapter 8. Determination of the probable maximum flood. :
- Gobeil, G. (2019). Projections climatiques de précipitation maximale probable (PMP) pour l'Abitibi-Témiscamingue. : UQAT.
- Golder. (2015). Dimensionnement préliminaire du système de drainage des eaux de surface au nord et à l'est du parc à résidus et de la halde à stériles. :
- Grunwald, S., & Norton, L. (2000). Calibration and validation of a non-point source pollution model. *Agricultural Water Management*, 45(1), 17-39.
- Hershfield, D. M. (1965). Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal-American Water Works Association*, 57(8), 965-972.
- HOBO Data loggers. (2017). Rain Gauge Smart Sensor (S-RGx-M002) Manual
- Horton, R. E. (1915). The melting of snow. *Monthly Weather Review*, 43(12), 599-605.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.

- ICMM. (2013). Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry :
- ICOLD. (2001). Tailings Dams–Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences (Bulletin 121). Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.
- IPCC. (2013). Summary for policymakers in 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, Cambridge and New York, USA.
- IPCC. (2014). : Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Kuchment, L., & Gelfan, A. (1996). The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modelling river runoff generation. *Journal of Hydrology*, 179(1-4), 23-36.
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408.
- Liu, Y., & Sun, F. (2010). Sensitivity analysis and automatic calibration of a rainfall–runoff model using multi-objectives. *Ecological Informatics*, 5(4), 304-310.
- Lucas, C. (2001). Baia Mare and Baia Borsa accidents: cases of severe transboundary water pollution. *Envtl. Pol'y & L.*, 31, 106.
- Lyon, S. W., Desilets, S. L., & Troch, P. A. (2008). Characterizing the response of a catchment to an extreme rainfall event using hydrometric and isotopic data. *Water Resources Research*, 44(6).
- Máca, P., & Torfs, P. (2009). The influence of temporal rainfall distribution in the flood runoff modelling. *Soil & Water Research*, 4(2), 102-S110.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634-3650.
- MDDEP. (2012). Directive 019 sur l'industrie minière
- MEQ. (1999). Guide des essais de pompage et leurs interprétations : [Québec]: Québec, Ministère de l'environnement.
- Meteorological Services of Canada. (1951-2019). Station results - Historical data. Val d'Or A, Climate Id: 7098600.
- Meteorological Services of Canada. (1971-2000). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000.
- Michaud, A. R., Drouin, A. M., A, Talbot, G. H., David, Biner, S., Lagacé, R., & Rocha, N. R., Gagné, G. (2013). Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques. Quebec, Canada: Consortium de

recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA).

Mine Canadian Malartic. (2018). Rapport de développement durable. :

Mohammed, H., Yohannes, F., & Zeleke, G. (2004). Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(2), 97-109.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., & Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.

MRNF. (2006). Portrait territorial: Abitibi-Témiscamingue. Québec, Canada:

Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Emissions scenarios. Special report of the Intergovernmental panel on climate change : Cambridge University Press, Cambridge.

Nichol, C., Smith, L., & Beckie, R. (2003). Water flow in uncovered waste rock—A multi-year large lysimeter study. *Proceedings of the 6 th ICARD (July 12-18, Cairns Australia)*, 919-926.

Nielsen, S. A., & Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Hydrology Research*, 4(3), 171-190.

NRCS, U. (2007). National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology. USDA Soil Conservation Service: Washington, DC, USA.

Ouranos. (2015). Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21e siècle. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques: Ressources naturelles Canada.

Pearce, T., Ford, J., Prno, J., & Duerden, F. (2009). Climate change and Canadian mining: opportunities for adaptation. Report prepared for the David Suzuki Foundation, 1-50.

Perilya. (2018). Broken Hill North Mine Water Management Plan. :

Rango, A., & Martinec, J. (1995). Revisiting the degree-day method for snowmelt computations 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(4), 657-669.

Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of hydrology*, 198(1-4), 69-97.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.

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.

Roy, P., Fournier, É., & Huard, D. (2017). Standardization Guidance for Weather Data, Climate Information and Climate Change Projections, . Montreal: Ouranos.

- Sammarco, O. (2004). A tragic disaster caused by the failure of tailings dams leads to the formation of the Stava 1985 Foundation. *Mine Water and the Environment*, 23(2), 91-95.
- SCS. (1986). Technical release: Urban hydrology for small watersheds. : US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- SNC-Lavalin. (2004). Estimation des conditions hydrométéorologiques conduisant aux crues maximales probables (CMP) au Québec, Rapport final. Montréal, Qc:
- Steenhuis, T., Agnew, L., Gérard-Marchant, P., & Walter, M. (2005). Overland flow. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 3, 130-134.
- StrataGold. (2017). Eagle gold project: Construction and operation water management plan. :
- Su, W., & Miller, H. (1995). Waste pile stability and debris flow formation. Communication présentée à The 35th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. doi:10.1175/bams-d-11-00094.1
- Turnipseed, D. P., & Sauer, V. B. (2010). Discharge measurements at gaging stations (Rapport no 2328-7055). : US Geological Survey.
- Van Essen Instruments. (2016). Product manuel - Diver.
- Van Niekerk, H. J., & Viljoen, M. J. (2005). Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation & Development*, 16(2), 201-212. doi:10.1002/ldr.681
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., & Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- Wang, Y., & Yang, X. (2018). Sensitivity analysis of the surface runoff coefficient of hipims in simulating flood processes in a large basin. *Water*, 10(3), 253.
- Wheater, H., Chandler, R., Onof, C., Isham, V., Bellone, E., Yang, C., Lekkas, D., Lourmas, G., & Segond, M.-L. (2005). Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 403-416.
- Wise, R. M., Fazey, I., Smith, M. S., Park, S. E., Eakin, H., Van Garderen, E. A., & Campbell, B. (2014). Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. *Global Environmental Change*, 28, 325-336.
- WMO. (2009). Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP) / World Meteorological Organization. Geneva: World Meteorological Organization.
- Woodward, D. (2010). Dans *National Engineering Handbook - Part 630 Hydrology*
- Wright, A. (2006). Understanding Waste Rock Dump Hydrology is Essential for Effective Closure Planning and ARD Management. Communication présentée à Proceedings of the First International Seminar on Mine Closure (p. 417-426).

WSP. (2015). CMGP – Étude d'impact sur l'environnement :

Zuzel, J. F., & Cox, L. M. (1975). Relative importance of meteorological variables in snowmelt. Water Resources Research, 11(1), 174-176

CHAPITRE 5 ANALYSES PARAMÉTRIQUES ET RÉSULTATS ADDITIONNELS

5.1 Analyses paramétriques

L'ensemble des analyses paramétriques ont été menées sur le Secteur Nord, puisque ce secteur a généralement permis une meilleure calibration des simulations et était plus sensible aux variations de conditions climatiques. De plus, les niveaux d'eau mesurés dans le fossé collecteur Nord n'étaient pas affectés par les pompages dans les bassins de collectes (contrairement au Secteur Sud; voir section 3.2). Les analyses paramétriques ont été réalisées en deux temps. L'impact du coefficient n de Manning et de l'état initial du stockage en surface sur les simulations de CMP ont d'abord été analysés en utilisant le cas de PMP le plus extrême (RCP8.5 pour la période 2071-2100). Puis, les impacts d'une variation du taux d'évaporation et de la capacité de stockage en surface sur la disponibilité des ressources en eau ont été évalués. Ces dernières simulations ont été réalisées en soumettant le modèle numérique aux précipitations observées au cours de l'été 2018, période pour laquelle les données météorologiques étaient disponibles sur une période prolongée (131 jours).

5.1.1 Coefficient n de Manning

Le coefficient n de Manning contrôle la vitesse de l'eau dans les canaux d'écoulement et influence donc la hauteur d'eau ruisselée ainsi que la hauteur de conception des fossés et des déversoirs d'urgence. Le coefficient n de Manning des matériaux granulaires est typiquement compris entre 0,02 et 0,05. Par exemple, les matériaux granulaires plus fins que des graviers (diamètre médian des grains inférieur à 64 mm) sont généralement caractérisés par un coefficient compris entre 0,02 et 0,03 (Philips et Tadayon, 1998; voir aussi Figure 2.8). Le coefficient n de Manning des matériaux plus grossiers (diamètre médian inférieur à 256 mm) est souvent compris entre 0,03 et 0,05.

Dans cette étude, le coefficient n de Manning des fossés collecteur a été fixé à 0,03 en se basant sur les données de littérature, les observations de terrain et la calibration. L'analyse paramétrique réalisée sur le modèle calibré montre qu'un coefficient plus faible, donc l'utilisation de matériaux

plus fins pour la construction des fossés, entraîne une diminution de la hauteur d'eau maximale dans le fossé collecteur Nord (Tableau 5.1). Par exemple, pour une PMP de 158 mm (RCP8.5 sur la période 2071-2100), et un débit de pointe de 4,98 m³/s, la hauteur d'eau maximale varie de 1,37 à 1,01 m (soit -36 cm) pour un coefficient n de Manning variant entre 0,05 et 0,02. L'utilisation de matériaux plus fins augmente toutefois le risque d'entraînement de particules et favorise davantage l'érosion que l'utilisation de matériaux plus grossiers (Schneider et al., 2015).

Tableau 5.1 : Niveaux d'eau maximums simulés lors du débit de pointe (4.98 m³/s) à la Station de mesure Nord pour une PMP de 158 mm en fonction du coefficient n de Manning. La valeur calibrée dans cette étude était $n = 0,03$.

Coefficient n de Manning	Hauteur d'eau maximale (m) dans le Fossé collecteur Nord
0,020	1,01
0,025	1,10
0,030	1,18
0,035	1,23
0,040	1,28
0,050	1,37

5.1.2 Saturation initiale du stockage en surface

La forme des hydrogrammes, l'amplitude des débits de pointe et le volume total de ruissellement à l'échelle du bassin versant d'un parc à résidus minier sont à la fois fonction des matériaux en surface, de la géométrie du bassin, ainsi que de l'état initial des résidus (Dingman, 2015). Le degré de saturation initial du stockage en surface correspond à la fraction d'eau retenue en surface sur la hauteur totale d'eau pouvant y être stockée avant le début du ruissellement. Chaque millimètre retenu en surface est donc soustrait de la précipitation dans le calcul de pluie nette et ne contribue pas au ruissellement direct. Ainsi, un matériau initialement sec entraînera un volume de ruissellement plus faible qu'un matériau contenant déjà de l'eau en surface.

Différents degrés de saturation initiaux ont été simulés à l'aide du modèle calibré pour une PMP de 158 mm (RCP8.5 sur la période 2071-2100 ; Tableau 5.2), afin de quantifier l'impact sur le

débit de pointe. Les simulations indiquent que des stériles initialement saturés (voir discussion sur cette hypothèse à la section 3.3.5) entraînent un débit de pointe 17% plus importante que des stériles initialement sec, soit un débit de pointe de 0.85 m³/s plus élevé.

Des résidus avec une grande capacité de stockage en surface pourraient ainsi contribuer à limiter l'amplitude des débits de pointe, en particulier si la dernière précipitation remonte à plusieurs jours et si le degré de saturation en surface a diminué suffisamment (par infiltration ou par évaporation; Istok & Boersma, 1986) . Les matériaux avec une grande capacité d'infiltration, et les sites situés dans des environnements secs, chauds et venteux (i.e. sous des conditions qui favorisent l'évaporation de l'eau) sont davantage susceptibles d'avoir une saturation initiale du stockage en surface faible et donc un ruissellement réduit en cas de PMP (Hillel, 1998).

Tableau 5.2 : Débits de pointe et ruissellement total simulés en fonction du degré de saturation initiale du stockage en surface, à la Station de mesure Nord pour une PMP de 158 mm. Le stockage en surface a été fixé à 20 mm.

Saturation initiale du stockage en surface	Débit de pointe (m ³ /s)	Ruissellement total (m ³)
0.00	4.13	330
0.25	4.36	340
0.50	4.59	353
0.75	4.81	363
1.00	4.98	375

5.1.3 Taux d'évaporation

Les impacts des CC ne sont pas limités à la gestion des conditions de précipitations extrêmes, et ils pourraient aussi affecter les opérations minières, notamment en modifiant la quantité d'eau totale disponible. Les hausses de température attendues en Abitibi augmenteront l'amplitude et la vitesse de l'évaporation sur l'ensemble des sites miniers (GIEC, 2014). Or, l'industrie minière utilise abondamment l'eau de surface dans ses opérations (p.ex. production, traitement du minerai) et il s'agit d'une ressource qui est limitée à plusieurs endroits dans le monde, particulièrement dans les environnements plus secs (Garner et al., 2012; Musiyarira et al., 2017). Une hausse de l'évaporation qui ne serait pas compensée par des précipitations additionnelles pourrait donc

affecter l'accès aux ressources en eau. Cette hausse du taux d'évaporation aurait aussi tendance à diminuer les débits de pointe observés lors des événements de pluie, le stockage initial disponible en surface devenant plus important (voir tableau 5.2).

Différents taux d'évaporation, variant de 75 à 125% des valeurs mensuelles moyennes utilisées, ont été simulés en utilisant les données de précipitation observées lors de la période de suivi de l'été 2018 (Tableau 5.3). Pour une hausse du taux d'évaporation de 25%, les différences sur les débits de pointe calculés étaient inférieures à 10% pour les 4 événements majeurs de l'été 2018. Une baisse du taux d'évaporation aurait l'effet inverse, en laissant plus d'eau en surface et en accentuant le ruissellement dans des proportions semblables. L'impact du taux d'évaporation est donc limité pour les débits de pointe. L'impact sur volume total d'eau ruisselée au cours de l'été est aussi inférieur à 10%. Bien que cet écart soit limité en termes de débits de pointe et de volume d'eau ruisselé, un taux d'évaporation 25% plus important représenterait tout de même une perte de 80 000 m³ d'apport en eau fraîche uniquement pour les bassins versants NW et N (superficie totale de 3.3 km²). Cet écart, extrapolé à l'ensemble d'un site minier pourrait ainsi représenter une contrainte importante dans un contexte d'accès à l'eau limité.

Tableau 5.3 : Débit de pointe simulé pour 4 événements majeurs en fonction du taux d'évaporation (en %), par rapport aux valeurs utilisées pour 2018. L'écart moyen des débits de pointe dans le fossé collecteur Nord pour les 4 événements et le total d'eau ruisselée sur les bassins NW et N, pour l'ensemble de la période (21 juin au 31 octobre), sont aussi présentés.

Date	75%	90%	100%	110%	125%
23 Juillet	0,56 m ³ /s	0,54 m ³ /s	0,53 m³/s	0,53 m ³ /s	0,51 m ³ /s
1er Septembre	0,40 m ³ /s	0,37 m ³ /s	0,36 m³/s	0,35 m ³ /s	0,33 m ³ /s
5 Septembre	1,66 m ³ /s	1,63 m ³ /s	1,60 m³/s	1,58 m ³ /s	1,54 m ³ /s
10 Octobre	0,78 m ³ /s	0,78 m ³ /s	0,78 m³/s	0,78 m ³ /s	0,78 m ³ /s
Écart moyen	5%	2%	0%	-1%	-4%
Total d'eau ruisselée	1,34 Mm ³	1,28 Mm ³	1,24 Mm³	1,21 Mm ³	1,16Mm ³

5.1.4 Capacité de stockage en surface

La capacité de stockage en surface est principalement influencée par la texture du sol. Les sols grossiers forment généralement plus de dépressions permettant de contenir l'eau de pluie. La présence de sols grossiers limite donc le ruissellement en surface lors des événements de pluie isolés, lorsque le sol est initialement sec (Darboux et al., 2004; Meshkat et al., 2019). La capacité de stockage d'eau en surface a un impact significatif sur les débits maximum mesurés dans les canaux d'écoulement lors des événements de précipitation majeurs, puisqu'elle limite directement la quantité d'eau ruisselée en surface. Ce paramètre a notamment un impact significatif pour une précipitation survenant suite à une période sans précipitations (voir plus haut). Cependant, cette variable ne diminue pas le ruissellement attendu dans le calcul d'une CMP, puisque le calcul de celle-ci fait généralement l'hypothèse de conditions où le sol est préalablement saturé et le stockage en surface nul (Ouranos, 2015).

Ainsi, une augmentation de la capacité de stockage en surface permet généralement de limiter l'amplitude des hydrogrammes, mais favorise aussi l'évaporation en stockant davantage d'eau en surface, sur une plus longue période. Ce paramètre peut ainsi avoir un impact sur le volume total d'eau ruisselée, et donc sur la disponibilité des ressources en eau pour les opérations minières.

L'impact de ce paramètre a été évalué pour les événements observés lors de l'été 2018. Les débits de pointe attendus ainsi que le volume total d'eau ruisselée au cours de cette période ont été évalués (Tableau 5.3). Des valeurs typiques comprises entre 5 et 50 mm (évaluées à partir de la méthode SCS-CN pour différentes conditions initiales et matériaux en surface) ont ainsi été simulées. Les simulations indiquent qu'une valeur de 5 ou 50 mm, plutôt que la valeur de 20 mm obtenue avec le processus de calibration pour les stériles miniers entraîne une variation inférieure à 10% sur le volume total d'eau ruisselée. La proportion d'eau atteignant les canaux d'écoulement par ruissellement hypodermique et par le débit de base est toutefois presque doublée pour une valeur de 50 mm. Le modèle d'écoulement utilisé ne permet pas de quantifier la perte d'eau additionnelle engendrée par une recharge de la nappe phréatique qui n'alimenterait pas totalement le débit de base, comme cela pourrait se produire dans le cas d'un niveau phréatique bas.

L'effet d'une variation de la capacité de stockage en surface est cependant beaucoup plus marqué pour les débits de pointe simulés. Par exemple, pour l'événement du 23 juillet, précédé de 7 jours

sans précipitations, un stockage en surface de 5 et 50 mm (plutôt que 20 mm) entraîne une modification du débit de pointe de +0,26 à - 0,35 m³/s, respectivement. Pour les événements précédés par une période humide, par exemple la précipitation du 1er septembre (précipitation de 75 mm, avec 20 mm de pluie au cours des 72 h précédentes), l'effet était moins marqué. Par exemple, le débit de pointe pour une valeur de 5 mm par rapport à la valeur calibrée de 20 mm était 0,03 m³/s plus élevé. Un stockage en surface de 50 mm réduit cependant le ruissellement de 0,26 m³/s, un écart qui se rapprochait de celui observé dans les conditions plus sèches du 23 juillet.

Les matériaux permettant de stocker l'eau en surface permettent donc de limiter significativement l'amplitude des crues, et ce même suite à un épisode pluvieux, puisqu'un stockage en surface de l'ordre de 50 mm se sature rarement en pratique. La présence d'eau en surface sur une période prolongée favorise l'infiltration d'eau, alimentant le ruissellement hypodermique et le débit de base (voir section 2.5.2). Les débits calculés dans les simulations sont davantage influencés par la composante de ruissellement pour les faibles valeurs de stockage en surface, alors que les valeurs plus élevées favorisent davantage l'apport du ruissellement hypodermique et du débit de base. Par exemple, un stockage en surface de 50 mm entraîne une part de ruissellement de base et hypodermique de 599 000 m³, alors que la valeur de 20 mm limite cet apport à 346 000 m³ pour l'été entier.

Tableau 5.4 : Débit de pointe simulé pour 4 événements de précipitation majeurs en fonction de la capacité de stockage en surface. L'écart moyen des débits de pointe pour les 4 événements et le total d'eau ruisselée sur l'ensemble de la période (21 juin au 31 octobre) sont aussi présentés.

Date	5mm	15mm	20mm	25mm	35mm	50mm
23 Juillet	0.79 m ³ /s	0.63 m ³ /s	0.53 m³/s	0.44 m ³ /s	0.30 m ³ /s	0.18 m ³ /s
1er Septembre	0.39 m ³ /s	0.37 m ³ /s	0.36 m³/s	0.35 m ³ /s	0.31 m ³ /s	0.13 m ³ /s
5 Septembre	1.67 m ³ /s	1.64 m ³ /s	1.60 m³/s	1.57 m ³ /s	1.51 m ³ /s	1.42 m ³ /s
10 Octobre	0.76 m ³ /s	0.74 m ³ /s	0.78 m³/s	0.72 m ³ /s	0.68 m ³ /s	0.49 m ³ /s
Écart moyen	15%	5%	0%	-7%	-19%	-45%
Total d'eau ruisselée	1.32 Mm ³	1.23 Mm ³	1.24 Mm³	1.20 Mm ³	1.19 Mm ³	1.21Mm ³

5.2 Conclusions sur les analyses paramétriques

Les analyses paramétriques présentées ci-dessus ont montré que l'utilisation de matériaux grossiers en surface permettait de minimiser l'intensité du ruissellement maximal en limitant la part du ruissellement direct. Ils favorisent ainsi le stockage d'une plus grande quantité d'eau en surface sur une durée plus importante, ce qui maximise l'infiltration vers les couches inférieures et augmente les pertes par évaporation. La mise en place de couvertures de matériaux grossiers sur les résidus pourrait donc contribuer à minimiser les risques de débordement de fossé en aplanissant la courbe des hydrogrammes, en limitant les pointes de ruissellement direct et en alimentant davantage le ruissellement hypodermique et la recharge de la nappe phréatique (Kirkby & Chorley, 1967).

Cependant, un apport additionnel en eau dans les couches inférieures, en plus de l'augmentation des niveaux de nappes phréatiques déjà attendues en raison des hausses de précipitations annuelles attendues avec les CC, pourrait avoir un impact négatif sur la stabilité géotechnique des digues des parcs à résidus miniers (Gandonou, 2019). Des canaux d'écoulement limitant la friction, donc affichant un coefficient n de Manning plus faible, peuvent aussi limiter la hauteur d'eau dans les fossés. Des fossés composés de matériaux granulaires plus fins ou l'utilisation de couvertures synthétiques pourraient ainsi contribuer à limiter les débordements sans avoir besoin d'intervenir sur l'ensemble du bassin versant (Chen & Cotton, 1988).

5.3 Mesures de conductivité électrique spécifique

La sonde positionnée en amont de la Station de mesure Sud (DI261; Van Essen Instruments, 2016) était équipée d'un capteur de conductivité électrique spécifique de l'eau. Ce capteur mesurait la conductivité électrique spécifique de l'eau toutes les 15 minutes pendant la période d'instrumentation avec une précision de $\pm 20\mu\text{S}$.

La conductivité électrique spécifique des eaux minières est généralement relativement élevée en raison de la quantité importante de métaux et de sels en solution (Armstead et al., 2016), alors que la conductivité de l'eau de pluie est beaucoup plus faible, avec des valeurs généralement inférieures à $100\mu\text{S/cm}$ (CW Team, 2004; Krämer et al., 1996)

La conductivité électrique spécifique mesurée à la mine Canadian Malartic indiquait que l'eau s'écoulant dans les fossés en dehors des périodes de précipitation avait une conductivité électrique spécifique stable, d'environ 2,5 mS/cm (Figure 5.1). Les épisodes de précipitations avaient comme impact une baisse immédiate de la conductivité électrique spécifique, indiquant que l'eau de pluie était beaucoup moins conductrice que l'eau exfiltrée des résidus miniers alimentant le débit de base. Par exemple, le 5 septembre (75 mm de précipitation avec une pointe à 35 mm/h), l'apport en eau de pluie a entraîné une diminution rapide de la conductivité électrique spécifique de l'eau jusqu'à 0,648 mS/cm (incluant une chute de 2,32 à 1,37 mS/cm en 15 minutes). Par la suite, la conductivité électrique spécifique est remontée rapidement jusqu'à 1,0 mS/cm en 1h30 suivant la fin des précipitations, indiquant le mélange d'une importante proportion d'eau souterraine. La comparaison des courbes de niveau d'eau et de conductivité électrique spécifique permet aussi d'observer que le retour au niveau d'eau initial se produit généralement un jour ou deux après la fin de la précipitation, alors que retour à la valeur initiale de conductivité électrique spécifique peut prendre jusqu'à quatre jours.

Les diminutions de conductivité électrique spécifique de l'eau mesurées à la Station Sud concordent bien avec les volumes de précipitations, et les événements de pluie les plus importants ont entraîné les diminutions de conductivité électrique spécifique les plus marquées (Figure 5.1).

Les baisses de conductivité électrique spécifique observées demeuraient cependant toujours supérieures aux valeurs généralement observées pour de l'eau de pluie. Ceci pourrait indiquer que l'essentiel du ruissellement est constitué d'un mélange d'eau de pluie avec une portion significative d'eau souterraine. Cependant, l'eau de ruissellement a tout de même été en contact avec les résidus et pourrait avoir accumulé une quantité importante de sels et de métaux augmentant sa conductivité électrique spécifique. Les mesures de conductivité électrique spécifique vont toutefois dans le même sens que les observations soulignant l'apport significatif de l'eau souterraine dès le début du ruissellement (voir section 2.4.2.1). L'eau déversée dans le cas d'un débordement de fossé pourrait donc être un mélange d'eau de pluie avec une proportion importante d'eau minière non traitée, potentiellement contaminante pour l'environnement.

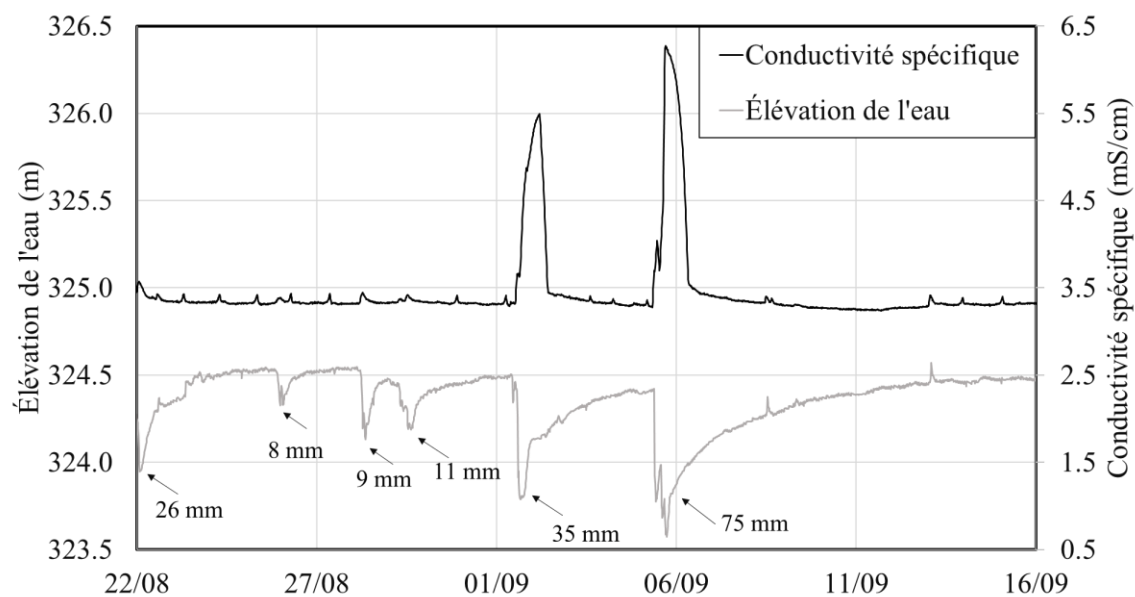


Figure 5.1 : Élévation et conductivité électrique spécifique de l'eau à la Station de mesure Sud pendant la période d'instrumentation (20 juin-31 octobre). La hauteur de pluie quotidienne entraînant les baisses de conductivité électrique spécifiques est indiquée (flèches noires).

CHAPITRE 6 SYNTHÈSE, DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude était de développer une méthodologie visant à intégrer les projections climatiques à la conception des systèmes de gestion d'eau de surface pour les aires d'entreposage de rejets miniers. Cette méthodologie a été appliquée au site de la Mine Canadian Malartic et comporte 5 étapes :

1. Calculer les données climatiques projetées à partir d'un MCR propre au site d'intérêt.
2. Caractériser les bassins versants constitués par les parcs à résidus et les haldes à stériles à partir de mesures de l'écoulement dans les fossés collecteurs.
3. Calibrer valider un modèle numérique d'écoulement reproduisant le ruissellement lors des événements extrêmes.
4. Extrapoler ce modèle pour les différentes crues de projet selon le niveau de risque des infrastructures.
5. Dimensionnement les infrastructures de gestion des eaux de surface en fonction des débits de pointe et des volumes de ruissellement total calculés.

6.1 Synthèse de l'étude

Des fossés collecteurs sur le site ont été instrumentés afin de suivre les variations de hauteurs d'eau en fonction des précipitations au cours de l'été 2018. La période de suivi a été marquée par plusieurs événements météorologiques majeurs, notamment une pluie de 75 mm en 9h, correspondant à une récurrence de 100 ans pour cette région. Ces observations de terrain ont permis de calibrer un modèle numérique de ruissellement et d'écoulement capable de représenter fidèlement la réponse des fossés collecteurs aux événements de précipitation. Le processus de calibration a aussi permis de constater la variabilité des caractéristiques hydrologiques des matériaux (stériles et résidus miniers) présents sur les aires d'entreposage, et de souligner l'importance de caractériser individuellement chacun des bassins versants.

La calibration et la validation des simulations numériques ont permis de reproduire fidèlement les niveaux d'eau mesurés dans les fossés collecteurs lors de la période de suivi (20 juin au 31 octobre

2018). L'erreur moyenne absolue sur les pointes de charge hydraulique pour les événements majeurs observés était inférieure à 5 cm pour les deux stations de mesure instrumentées.

Le modèle calibré a ensuite été utilisé pour évaluer l'effet de PMP sur les hauteurs d'eau et les débits de pointes dans les fossés. Les PMP pour cette étude ont été calculées en utilisant une méthode statistique et une méthode météorologique sur un point de grille de MCR à partir d'un ensemble de 11 simulations climatiques. Ces calculs ont été réalisés en collaboration avec Ouranos, un groupe d'experts en simulation climatiques. Les simulations numériques de la réponse aux événements extrêmes projetés ont permis d'évaluer l'impact relatif des périodes de référence et des scénarios RCP sur les débits de pointe attendus.

Les PMP calculées avec la méthode statistique d'Hershfield, ainsi qu'une méthode météorologique, indiquent une hausse de la PMP de l'ordre de 15 à 30% d'ici 2100 selon la période et le scénario RCP utilisés. Les simulations numériques de la PMP d'été/automne indiquent que les CC pourraient entraîner d'ici 2100 des hausses relatives de débits de pointes comprises entre 17% et 49%. Les hausses moyennes de débits de pointe pour les deux méthodes de calcul de PMP associées au RCP4.5 étaient de 17% pour 2041-2070 et dépassaient 22% pour 2071-2100. Pour le RCP 8.5, elles étaient de 32% pour 2041-2070, et atteignaient 44% pour 2071-2100. Les débits de pointe attendus calculés pour les PMP de printemps étaient 35% moins importants que ceux pour l'été/automne pour le scénario RCP8.5 de 2071-2100. Le volume total d'eau ruisselée pourrait toutefois excéder celui d'une PMP d'été pour une période de fonte étalée sur quelques jours. Ces augmentations importantes de débits de pointe soulignent la nécessité d'adapter le design des infrastructures aux conditions extrêmes futures.

Les simulations indiquaient des débits de pointe en moyenne 3,6 fois plus élevés pour la méthode statistique par rapport à la méthode météorologique. Les différences observées entre les deux approches de calcul de PMP étaient principalement causées par la taille de tempête utilisée. Enfin, les analyses paramétriques ont permis de montrer que l'augmentation de la capacité de stockage en surface et la diminution du coefficient de ruissellement, par exemple en raison de la présence de matériaux grossiers à la surface des parcs à résidus, pourrait contribuer à limiter l'amplitude du ruissellement de surface en favorisant l'infiltration.

Ces résultats, appliqués aux conditions particulières de chaque site (propriétés des matériaux et des bassins versants, conditions climatiques) permettraient ainsi de dimensionner de manière plus réaliste les infrastructures en fonction des conditions climatiques projetés. Le choix du scénario RCP lors de la conception peut notamment être critique, en particulier pour des infrastructures permanentes qui ne pourraient pas facilement être modifiées ou adaptées dans le futur.

6.2 Discussion

La méthodologie développée dans cette étude, puis appliquée au site de la Mine Canadian Malartic, confirme que les changements climatiques pourraient avoir un impact significatif sur la gestion de l'eau de surface dans le domaine minier, et qu'il est nécessaire d'adapter les méthodes de conception des ouvrages de retenue et de collecte. Les résultats obtenus pour l'étude de cas présentée ici sont cependant basés sur un certain nombre d'hypothèses et de simplifications, et doivent être adaptés aux conditions particulières de chaque site.

Dans cette étude, les précipitations horaires ont été mesurées en continu sur le terrain afin de les relier aux niveaux d'eau observés à l'aide d'un modèle de ruissellement et d'écoulement en surface. Cette résolution temporelle a permis de réduire l'incertitude sur le temps de concentration des hydrogrammes, qui se chiffrait en heures pour les bassins versants de cette étude.

La comparaison des données pluviométriques mesurées sur le site et à la station météorologique d'Environnement Canada de l'aéroport de Val-d'Or a montré des tendances générales comparables, mais aussi certaines différences importantes lors des événements ponctuels. Par exemple, 35 mm de pluie ont été mesurés le 1er septembre à la station météorologique de la Mine Canadian Malartic, alors que 69 mm (soit deux fois plus) ont été enregistrés à la station d'Environnement Canada. Ces événements, et en particulier les orages estivaux, peuvent en effet être très locaux (Meierdiercks et al., 2010; Zhou et al., 2019). La mise en place d'un pluviomètre directement au site limite donc les imprécisions causées par l'hétérogénéité de la distribution des précipitations.

L'écoulement dans les fossés collecteurs a été suivi et caractérisé sur la base des hauteurs d'eau, converties ensuite en débits avec la méthode décharge pente-section. Cette approche est cependant basée sur des hypothèses difficiles à vérifier sur le terrain (voir section 2.4.4.2). Par exemple, la

hauteur d'eau mesurée à la Station de mesure Nord a pu atteindre 0,68 m lors de la crue du 5 septembre, ce qui aurait nécessité une longueur de fossé régulier et linéaire de plus de 50 m (Dalrymple & Benson, 1967). De plus, la différence de niveau de la surface de l'eau dans les fossés était négligeable (<5 cm) sur les sections instrumentées. Or la méthode décharge pente-section requiert normalement une chute d'élévation de 15 cm entre les deux sections instrumentées. Ainsi, l'utilisation seule des hauteurs d'eau pour évaluer les débits d'écoulement dans les fossés a pu être relativement imprécise. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la calibration du modèle numérique a été effectuée en comparant les niveaux d'eau plutôt que les débits. Une mesure directe des débits d'écoulement serait cependant plus précise pour la conception des infrastructures. Il est aussi généralement recommandé d'évaluer le débit en continu puisque l'utilisation de courbes de tarage ne s'applique qu'en conditions stationnaires. Elles ne permettent pas de tenir compte de l'effet d'hystérésis observable en période de crue et de décrue (Petersen-Øverleir, 2006), ce qui diminue la précision des calculs de débits. La mise en place de structures telles qu'un déversoir ou un canal jaugeur peut permettre de limiter cette source d'incertitudes en créant un bassin de rétention en amont du point de mesure (USDI, 2001). Ces structures peuvent être maintenues sur le site afin de suivre les débits d'écoulement sur de longues périodes et de comparer les mesures de terrain aux débits attendus et ainsi valider les simulations numériques. De plus, la mise en place de tels équipements sur des sites miniers pourrait contribuer au développement de bases de données hydrologiques adaptées aux aires d'entreposage des rejets miniers.

Quelques simplifications et hypothèses ont également été utilisées dans les simulations numériques et lors du processus de calibration. Par exemple, les valeurs d'évaporation ont été estimées par la méthode de Morton, développée pour les lacs peu profonds (Morton, 1983) et pourraient être imprécises pour un parc à résidus miniers ou une halde à stériles. Les valeurs d'évaporation proviennent en particulier d'un rapport de conception (Golder, 2014b) et ont déjà été utilisées sur le site Canadian Malartic. Elles ont été calculées selon les observations météorologiques à la station Val-d'Or A (Services météorologiques du Canada, 1969-1999). L'utilisation de valeurs d'évaporation mesurées directement sur le site permettrait de réduire considérablement l'incertitude sur cette variable, en comparaison avec des méthodes empiriques (McJannet et al., 2013). Un calcul quotidien et plus précis du taux d'évaporation aurait permis de mieux calibrer le

bilan d'eau total. Cette simplification n'a toutefois pas d'impact majeur sur les débits de pointe simulés (section 5.1.3).

Un suivi des niveaux phréatiques aurait aussi permis de mieux évaluer l'impact des précipitations sur l'écoulement souterrain, et ainsi modéliser plus fidèlement le débit de base et le ruissellement hypodermique. Certains modèles permettent, à partir de mesures de niveaux piézométriques dans des puits d'observation, de coupler le ruissellement en surface et l'écoulement souterrains (Ledoux et al., 1989; Maxwell & Miller, 2005).

Les simulations de crue printanière ont aussi été simplifiées, notamment par l'utilisation des données de la période 1971-2000 pour évaluer le couvert de neige. Cette simplification est conservatrice par rapport à la réalité puisque le couvert de neige aurait plutôt tendance à décroître avec les changements climatiques pour cette région (Bussière et al., 2017). La méthode degré-jour, utilisée avec un coefficient fixe pour simuler la fonte du couvert neigeux, est généralement imprécise et peut entraîner des écarts importants dans le calcul de ruissellement du bassin versant (Rango & Martinec, 1995). La mesure directe d'équivalent en eau de la neige et des taux de fonte, par exemple par carottage (WMO, 2018) pourrait permettre l'évaluation d'une CMP de printemps plus précise en limitant l'incertitude sur ces deux paramètres, qui ont été fixés à partir de valeurs obtenues dans la littérature. L'enneigement maximal probable aurait aussi pu être déterminée au moyen de simulations climatiques afin de mieux évaluer l'impact des CC sur la crue de printemps.

Enfin, les valeurs de PMP ont été obtenues avec deux méthodes distinctes, soit la méthode de calcul statistique d'Hershfield et une méthode météorologique (Clavet-Gaumont et al., 2017). Cette dernière approche a été appliquée à l'échelle d'un point de grille du MCR. La taille de tempête utilisée dans le calcul de PMP avec la méthode météorologique (598 km²) était donc significativement plus élevée que la taille de 25 km² généralement utilisée (la résolution des MCR ne permet pas de simuler des tempêtes plus petites). Ainsi, les valeurs de PMP obtenues avec la méthode météorologique ne peuvent pas être comparées directement avec les autres méthodes de calcul généralement utilisées dans l'industrie pour le dimensionnement des infrastructures (Rousseau et al., 2014). Cependant, le changement climatique relatif à l'échelle du point de grille demeure représentatif des changements attendus (Rousseau et al., 2014) et pourrait être utilisé

comme facteur de correction pour des PMP calculées à l'aide de méthodes météorologiques calculées pour des tailles de tempête plus petites.

6.3 Conclusions et recommandations

Les systèmes de gestion de l'eau de surface dans les aires d'entreposage des rejets miniers sont des structures essentielles pour limiter les risques environnementaux liés au stockage en surface des rejets miniers. Le réseau d'écoulement doit à la fois recueillir les eaux minières potentiellement contaminées en évitant les déversements non contrôlés, et évacuer l'eau qui pourrait s'accumuler dans les aires d'entreposage et risquer d'entraîner la rupture des digues par débordement. Ces systèmes sont généralement conçus de manière à résister à des événements extrêmes d'intensités variables, établis en fonction du niveau de risque. Or, les CC modifieront, au cours des prochaines décennies, le régime de précipitations et entraîneront une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes. L'industrie minière doit donc s'adapter afin de garantir la résilience des infrastructures de gestion de l'eau de surface et gérer adéquatement les événements météorologiques extrêmes.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de développer une méthodologie visant à intégrer les projections climatiques de précipitations extrêmes dans la phase de conception des systèmes de gestion d'eau de surface pour les aires d'entreposage de rejets miniers. La première étape de cette méthodologie consistait à évaluer les PMP de printemps et d'été/automne propres au site à partir de données climatiques projetées à partir de MCR pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100, en utilisant les scénarios RCP4.5 et 8.5. L'instrumentation hydraulique a été effectuée afin de caractériser les bassins versants pour des épisodes de pluie majeurs, de manière à calibrer et valider un modèle numérique de ruissellement et d'écoulement. Ce modèle, mis en place sur le code Mike Hydro River, a par la suite été soumis aux conditions extrêmes de PMP pour quantifier l'impact attendu des changements climatiques.

Les résultats de simulations ont démontré que les CC augmenteront significativement les débits de pointe attendus pour les épisodes de PMP d'été/automne, soit de 17 à 49% selon la période et le scénario RCP. La crue entraînée par une PMP d'hiver serait moins importante que celle d'été.

Plusieurs recommandations ont également pu être émises à l'issue de cette étude :

- Une PMP propre au site pour une taille de tempête de l'ordre de 25 km² pourrait être calculée avec la méthode météorologique, puis corrigée avec les écarts relatifs obtenus dans cette étude. Cette approche permettrait de conserver les tendances de changement climatique, considérées uniformes à l'échelle du point de grille, et de l'appliquer à la taille de tempête appropriée pour le calcul de PMP à des fins de conception.
- Des structures de mesures de débits, comme des déversoirs et des canaux jaugeurs, pourraient être installés lors de la phase d'instrumentation. Cette approche permettrait de calibrer directement le modèle d'écoulement avec des débits plutôt que d'utiliser seulement les niveaux d'eau.
- Maximiser le temps de suivi de l'écoulement de manière à valider les résultats de simulations numériques, en plus d'augmenter les probabilités de capter davantage d'événements extrêmes.
- Le modèle d'écoulement en surface devrait être couplé à un modèle d'écoulement souterrain calibré à l'aide de mesures piézométriques, afin de mieux évaluer l'impact des précipitations extrêmes sur le débit de base et l'écoulement hypodermique.
- Le taux d'évaporation projeté devrait être calculé au moyen des données climatiques des MCR (p.ex. Aydin et al., 2008) afin d'évaluer avec plus de précision les impacts sur la disponibilité des ressources en eau.
- Enfin, le taux de fonte de neige devrait être mesuré directement sur le terrain et le couvert de neige maximal attendu devrait être évalué à l'aide des modèles climatiques (p.ex. Kellomäki et al., 2010) afin de déterminer avec plus de précision la CMP de printemps.
- Évaluer la capacité de la conductivité électrique spécifique à être utilisée comme traceur hydrogéologique, de manière à quantifier la proportion d'eau provenant du ruissellement hypodermique et du débit de base se retrouvant dans les canaux d'écoulement lors des événements de précipitation extrêmes.

RÉFÉRENCES

- Adib, A., Lotfirad, M., & Haghighi, A. (2019). Using uncertainty and sensitivity analysis for finding the best rainfall-runoff model in mountainous watersheds (Case study: the Navrood watershed in Iran). *Journal of Mountain Science*, 16(3), 529-541.
- Alfieri, L., Laio, F., & Claps, P. (2008). A simulation experiment for optimal design hyetograph selection. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(6), 813-820.
- ANCOLD. (2015). *Flood evaluation and dam safety*. :
- Andersen, H. E., Kronvang, B., Larsen, S. E., Hoffmann, C. C., Jensen, T. S., & Rasmussen, E. K. (2006). Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. *Science of the Total Environment*, 365(1-3), 223-237.
- ARCC. (2014). *Review of downscaling methods for climate change projections*. :
- Armstead, M. Y., Bitzer-Creathers, L., & Wilson, M. (2016). The effects of elevated specific conductivity on the chronic toxicity of mining influenced streams using *Ceriodaphnia dubia*. *PloS one*, 11(11).
- Assemblée nationale. (2017). Loi modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement afin de moderniser le régime d'autorisation environnementale et modifiant d'autres dispositions législatives notamment pour réformer la gouvernance du Fonds vert (vol. Projet de loi no 102): Éditeur officiel du Québec.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. (2011). La gestion des rejets miniers au Québec Dans *L'état du Québec* (p. 225-232).
- Awoh, A. S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2013). Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover. *Mine Water and the Environment*, 32(1), 42-55.
- Aydin, M., Yano, T., Evrendilek, F., & Uygur, V. (2008). Implications of climate change for evaporation from bare soils in a Mediterranean environment. *Environmental monitoring and assessment*, 140(1-3), 123-130.
- Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, 28(4), 50-54.
- BAPE. (2013). *Projet d'ouverture et d'exploitation d'une mine d'apatite à Sept-Îles - Rapport d'enquête et d'audience publique* :
- BAPE. (2016). *Projet d'agrandissement de la mine aurifère Canadian Malartic et de déviation de la route 117 à Malartic*. :
- BAPE. (2018). *Projet d'aménagement de nouveaux bassins d'eau de procédé et de sédimentation à la mine de Mont-Wright à Fermont Québec*:
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer* : John Wiley & Sons.

- Bezák, N., Šraj, M., Rusjan, S., & Mikoš, M. (2018). Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results. *Geosciences*, 8(2), 69.
- Bloemen, P., Reeder, T., Zevenbergen, C., Rijke, J., & Kingsborough, A. (2018). Lessons learned from applying adaptation pathways in flood risk management and challenges for the further development of this approach. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 23(7), 1083-1108.
- Blöschl, G. (2006). Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. *Encyclopedia of hydrological sciences*.
- Bogabbri Coal. (2014). Surface Water Management Plan. February 2014.
- Bouwer, H. (1986). Intake rate: cylinder infiltrometer. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 825-844.
- Bowker, L. N. C., David M. (2016). *Root Causes of Tailings Dam Overtopping: The Economics of Risk & Consequence*. Communication présentée à 2nd International Seminar on Dam Protection Against Overtopping Ft. Collins, Colorado, USA.
- Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2011). Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrological processes*, 25(18), 2801-2813.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: an introduction* : Cambridge University Press.
- Bussiere, B. (2007). Hydro-geotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and Subsoil Characteristics and Hydrogeology..... emerging geo-environmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.
- Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2004). A laboratory study of covers made of low-sulphide tailings to prevent acid mine drainage. *Environmental Geology*, 45(5), 609-622.
- Bussière, B., Demers, I., Charron, P., Bossé, B., Roy, P., Jébrak, M., & Trépanier, S. (2017). Analyse de risques et de vulnérabilités liés aux changements climatiques pour le secteur minier québécois.
- Buurman, J., & Babovic, V. (2016). Adaptation Pathways and Real Options Analysis: An approach to deep uncertainty in climate change adaptation policies. *Policy and Society*, 35(2), 137-150.
- Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., . . . Dewulf, A. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, 2, 26.
- Carpenter, T. M., & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of hydrology*, 329(1-2), 174-185.
- Catapa. (2019). Mining dam tragedies in Brazil. Tiré de <https://catapa.be/en/category/mining/disaster/>

- Cázares-Rodríguez, J. E., Vivoni, E. R., & Mascaro, G. (2017). Comparison of Two Watershed Models for Addressing Stakeholder Flood Mitigation Strategies: Case Study of Hurricane Alex in Monterrey, México. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(9). doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0001560
- CEAEQ. (2008). Cahier 7: Méthodes de mesure du débit en conduit ouvert. Dans *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* (p. 248 p).
- CEHQ. (2015). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Quebec:
- CEHQ. (2017). Lignes directrices pour l'estimation des débits de crue sur le territoire québécois. Tiré de <https://www.cehq.gouv.qc.ca/debits-crues/methodes-estimation.htm>
- Charron, I. (2016). Guide sur les scénarios climatiques: utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation (p. 94). Montréal, Qc, Canada.
- Chen, Y., & Cotton, G. (1988). *Design of roadside channels with flexible linings*. : SIMONS LI AND ASSOCIATES INC FORT COLLINS CO.
- Cheng, L., & AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Scientific reports*, 4, 7093.
- Clavet-Gaumont, J., Huard, D., Frigon, A., Koenig, K., Slota, P., Rousseau, A., . . . Perdikaris, J. (2017). Probable maximum flood in a changing climate: An overview for Canadian basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 11-25.
- Corrugated Steel Pipe Institute. (2007). *Handbook of steel drainage and highway construction products*. Cambridge, Ontario, Canada: CSPI
- Crouzet, E., Hubert, P., Olive, P., Siwertz, E., & Marce, A. (1970). Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement. *Journal of Hydrology*, 11(3), 217-229.
- CSMO Mines. (2015). *Estimation des besoins de main-d'oeuvre du secteur minier au Québec - 2015-2025*. :
- CW Team. (2004). Electrical conductivity/salinity fact sheet. *The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment, Division of Water Quality, factsheet*, 3(3.0).
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussiere, B., & Martin, V. (2005). Large scale applications of covers with capillary barrier effects to control the production of acid mine drainage. *Proceedings of post-mining*, 16-17.
- Dalrymple, T., & Benson, M. (1967). *Measurements of Peak Discharge by the Slope-Area Method* : US Government Printing Office.
- Darboux, F., Reichert, J., & Huang, C. (2004). *Soil roughness effects on runoff and sediment production*. Communication présentée à Conserving soil and water for society: Sharing solutions, Proc, 13th Int Soil Conservation Organization Conf, SR Raine, AJW Biggs, NW Menzies, DM Freebairn, and PE Tolmie, eds, Paper (p. 1-6).

- Davies, M., Martin, T., & Lighthall, P. (2000). Mine tailings dams: when things go wrong. *Tailings Dams*, 261-273.
- Debevoise, N. (1988). The application of the unit hydrograph technique to open channel flow data. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 227-236.
- Demers, I., Bussière, B., Benzaazoua, M., Mbonimpa, M., & Blier, A. (2008). Column test investigation on the performance of monolayer covers made of desulphurized tailings to prevent acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 21(4), 317-329.
- Desjarlais, C., & Blondlot, A. (2010). *Savoir s' adapter aux changements climatiques* : Ouranos.
- DHI. (2002). Mike-11: a modelling system for rivers and channels, reference manual : DHI Water & Environment Hørsholm,, Denmark.
- DHI. (2007). MIKE SHE User Manual—Volume 2: Reference Guide.
- DHI. (2017). *MIKE HYDRO River User Guide*.
- Digges La Touche, G. C., Helen; Lansley, Richard (2011). Probabilistic modelling for tailings remediation and restoration. Dans A. F. C. W. Thomas R. Rüde (édit.), *Mine Water – Managing the Challenges* (p. 217-221). Aachen, Germany.
- Dimri, A. (2009). Impact of subgrid scale scheme on topography and landuse for better regional scale simulation of meteorological variables over the western Himalayas. *Climate dynamics*, 32(4), 565-574.
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial hydraulics* : oxford university press.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* : Waveland press.
- Dinh, Q., Balica, S., Popescu, I., & Jonoski, A. (2012). Climate change impact on flood hazard, vulnerability and risk of the Long Xuyen Quadrangle in the Mekong Delta. *International journal of river basin management*, 10(1), 103-120.
- Dooge, J. C. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of geophysical research*, 64(2), 241-256.
- dos Santos, F. M., de Oliveira, R. P., & Mauad, F. F. (2018). Lumped versus distributed hydrological modeling of the Jacaré-Guaçu Basin, Brazil. *Journal of Environmental Engineering*, 144(8), 04018056.
- Ecometrix. (2014). *Preliminary Review of the Canadian Malartic ABA Geochemistry and Mine Waste Management Plans*. :
- Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., & Liebert, J. (2012). HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data?". *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3391-3404.
- El-Hassanin, A., Labib, T., & Gaber, E. (1993). Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of Burundi. *Agriculture, ecosystems & environment*, 43(3-4), 301-308.

- ERM Rescan. (2014). *Chapter 10 Surface Water Hydrology Predictive Study. Application for and Environmental Assessment Certificate / Environmental Impact Statement. Prepared for Pretium Resources Inc. by ERM Rescan.* :
- FERC. (2001). *Chapter 8. Determination of the probable maximum flood.* :
- Ferdosi, B., James, M., & Aubertin, M. (2015). Investigation of the effect of waste rock inclusions configuration on the seismic performance of a tailings impoundment. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(6), 1519-1537.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., . . . Eyring, V. (2014). Evaluation of climate models. Dans *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 741-866): Cambridge University Press.
- Fortin, J., Moussa, R., Bocquillon, C., & Villeneuve, J. (1995). Hydrotel, a distributed hydrological model compatible with remote sensing and geographical information systems. *Revue des sciences de l'eau/journal of water science*, 8(1), 97-124.
- Fretz, N. M. (2013). *Multi-year hydrologic response of experimental waste-rock piles in a cold climate: active-zone development, net infiltration, and fluid flow.* (University of British Columbia).
- Gagné, G., Beaudin, I., Leblanc, M., Drouin, A., Veilleux, G., Sylvain, J.-D., & Michaud, A. R. (2013). *Classement des séries de sol minéraux du québec selon les groupes hydrologiques. Rapport Final.* . :
- Gandonou, M. (2019). *Effet des changements climatiques sur la stabilité géotechnique d'un parc à résidus.* (Polytechnique Montréal).
- Garner, R., Naidu, T., Saavedra, C., Matamoros, P., & Lacroix, E. (2012). Water Management in Mining: A Selection of Case Studies. *International Council on Mining & Metals, London.*
- Garzonio, C. A., Piccinini, L., & Gargini, A. (2014). Groundwater modeling of fractured aquifers in mines: the case study of Gavorrano (Tuscany, Italy). *Rock mechanics and rock engineering*, 47(3), 905-921.
- Genivar. (2009). *Projet minier aurifère Canadian Malartic. Rapport no 260.* :
- Genivar. (2013). *Étude d'impact sur l'environnement et le milieu social. Projet Dumont – Réponses aux questions et commentaire de l'ACÉE, 1ère série reçue le 20 février 2013.* :
- Gervais, D., Roy, C., Thibault, A., Pednault, C., & Doucet, D. (2014). Technical Report on the mineral resource and mineral reserve estimates for the Canadian Malartic Property. *Mine Canadian Malartic*, 460.
- GIEC. (2007). *Changements climatiques 2007 - Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.* Cambridge, Royaume Uni :
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.* Genève, Suisse:

- Gobeil, G. (2018). *Projections climatiques de précipitations maximale probable (PMP) Pour Abitibi-Témiscamingue*. : UQAT:
- Gobeil, G. (2019). *Projections climatiques de précipitation maximale probable (PMP) pour l'Abitibi-Témiscamingue*. : UQAT.
- Golder. (2014a). *Conception du prolongement du parc à résidus et de la halde à stériles*. Québec:
- Golder. (2014b). *Plan conceptuel de gestion des eaux et bilan d'eau – Conditions ultimes d'opération*. :
- Golder. (2015a). *Dimensionnement préliminaire du système de drainage des eaux de surface au nord et à l'est du parc à résidus et de la halde à stériles*. :
- Golder. (2015b). *Étude hydrologique et hydraulique pour le système d'évacuation d'eau opérationnel du bassin de polissage 2015*. :
- GoldSim Technology Group. (2017). GoldSim: Using Simulation to Move Beyond the Limitations of Spreadsheet Models. *White Paper*. Tiré de www.goldsim.com
- Gouvernement du Québec. (2004). Manuel de conception des ponceaux. *Transports Québec, Direction des structures*.
- Gray, D. M., & Norum, D. (1967). *The effect of soil moisture on infiltration as related to runoff and recharge*. Communication présentée à Proceedings of hydrology symposium.
- Gribbin, J. E. (2013). *Introduction to Hydraulics & Hydrology: With Applications for Stormwater Management* : Nelson Education.
- Grunwald, S., & Norton, L. (2000). Calibration and validation of a non-point source pollution model. *Agricultural Water Management*, 45(1), 17-39.
- Guo, J. C. (2001). Rational hydrograph method for small urban watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(4), 352-356.
- Hafezparast, M., Araghinejad, S., Fatemi, S. E., & Bressers, H. (2013). A conceptual rainfall-runoff model using the auto calibrated NAM models in the Sarisoo River. *Hydrology Current Research*, 4(1), 1-6.
- Hersch, R. (1993). The velocity-area method. *Flow measurement and instrumentation*, 4(1), 7-10.
- Hershfield, D. M. (1965). Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal-American Water Works Association*, 57(8), 965-972.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations* : Elsevier.
- Hillel, D., & Hatfield, J. L. (2005). *Encyclopedia of soils in the environment* (vol. 3): Elsevier Amsterdam.
- HOBO Data loggers. (2017). Rain Gauge Smart Sensor (S-RGx-M002) Manual
- Horton, R. E. (1915). The melting of snow. *Monthly Weather Review*, 43(12), 599-605.

- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.
- Humphrey, J. (1990). Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. *International journal of heat and fluid flow*, 11(3), 170-195.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.
- ICMM. (2013). *Adapting to a changing climate: implications for the mining and metals industry* :
- ICOLD. (2001). Tailings Dams–Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt From Practical Experiences (Bulletin 121). *Commission Internationale des Grands Barrages, Paris*.
- Institut de la statistique du Québec. (2019). *La production minérale au Québec en 2017*. : Gouvernement du Québec.
- IPCC. (2013). Summary for policymakers in 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, Cambridge and New York, USA.
- IPCC. (2014). : *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Istok, J., & Boersma, L. (1986). Effect of antecedent rainfall on runoff during low-intensity rainfall. *Journal of Hydrology*, 88(3-4), 329-342.
- Ivanov, V. Y., Vivoni, E. R., Bras, R. L., & Entekhabi, D. (2004). Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resources Research*, 40(11).
- James, M., & Aubertin, M. (2012). The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments. Dans *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering* (p. 4166-4175).
- Kemp, D., Bond, C. J., Franks, D. M., & Cote, C. (2010). Mining, water and human rights: making the connection. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1553-1562.
- Kirkby, M., & Chorley, R. (1967). Throughflow, overland flow and erosion. *Hydrological Sciences Journal*, 12(3), 5-21.
- Krämer, M., Schüle, M., & Schütz, L. (1996). A method to determine rainwater solutes from pH and conductivity measurements. *Atmospheric Environment*, 30(19), 3291-3300.
- Kuchment, L., & Gelfan, A. (1996). The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modelling river runoff generation. *Journal of Hydrology*, 179(1-4), 23-36.
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408.

- Lane, S. N., & Richards, K. S. (1997). Linking river channel form and process: time, space and causality revisited. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(3), 249-260.
- Ledoux, E., Girard, G., De Marsily, G., Villeneuve, J., & Deschenes, J. (1989). Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater. Dans *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling* (p. 435-454): Springer.
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.-L., Ludwig, R., Brietzke, G. B., . . . Braun, M. (2019). The ClimEx project: A 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(4), 663-693.
- Lee, K., Firoozfar, A. R., & Muste, M. (2017). Monitoring of unsteady open channel flows using the continuous slope-area method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1863-1874.
- Liu, Y., & Sun, F. (2010). Sensitivity analysis and automatic calibration of a rainfall–runoff model using multi-objectives. *Ecological Informatics*, 5(4), 304-310.
- Lucas, C. (2001). Baia Mare and Baia Borsa accidents: cases of severe transboundary water pollution. *Envtl. Pol'y & L.*, 31, 106.
- Luo, J., Wang, F., Tomsu, C., Druzynski, A., & Monninkhoff, B. FEFLOW-model for mine dewatering and mine water management close to groundwater systems of varying salinity, Pilbara, Western Australia.
- Lyon, S. W., Desilets, S. L., & Troch, P. A. (2008). Characterizing the response of a catchment to an extreme rainfall event using hydrometric and isotopic data. *Water Resources Research*, 44(6).
- Ma, Q., Zavattero, E., Du, M., Vo, N. D., & Gourbesville, P. (2016). Assessment of high resolution topography impacts on deterministic distributed hydrological model in extreme rainfall-runoff simulation. *Procedia Engineering*, 154, 601-608.
- Ma, Y., Menenti, M., Feddes, R., & Wang, J. (2008). Analysis of the land surface heterogeneity and its impact on atmospheric variables and the aerodynamic and thermodynamic roughness lengths. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D8).
- Máca, P., & Torfs, P. (2009). The influence of temporal rainfall distribution in the flood runoff modelling. *Soil & Water Research*, 4(2), 102-S110.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634-3650.
- Mailhot, A. P., G  r  my.; Talbot, Guillaume. . (2014). *Recommandations sur les majorations    considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec PHASE II. : INRS-Eau, Terre et Environnement.*

- Marcus, J. J. (1997). Mining environmental handbook: effects of mining on the environment and American environmental controls on mining.
- Martinez, C., & Ugorets, V. (2010). Use of numerical groundwater modelling for mine dewatering assessment. *WIM Santiago, Chile*, 318-326.
- Maxwell, R. M., & Miller, N. L. (2005). Development of a coupled land surface and groundwater model. *Journal of Hydrometeorology*, 6(3), 233-247.
- McCuen, R. H., & Bondelid, T. R. (1983). Estimating unit hydrograph peak rate factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109(2), 238-250.
- McJannet, D., Cook, F., & Burn, S. (2013). Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage. *Water Resources Research*, 49(3), 1415-1428.
- MDDELCC. (2017). *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales. 102 p. et annexes [En ligne].* . : Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/manuel-calcul-conception/index.htm>
- MDDELCC. (2018). Directive pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement. Québec.
- MDDEP. (2012). Directive 019 sur l'industrie minière
- Meals, D. W., & Dressing, S. (2008). Surface water flow measurement for water quality monitoring projects. *Tech Notes*, 3.
- Meierdiercks, K. L., Smith, J. A., Baeck, M. L., & Miller, A. J. (2010). Heterogeneity of Hydrologic Response in Urban Watersheds 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(6), 1221-1237.
- MEQ. (1999). *Guide des essais de pompage et leurs interprétations* : [Québec]: Québec, Ministère de l'environnement.
- MERN. (2019). *Choisir le secteur minier du Québec.* : Gouvernement du Québec.
- Meshkat, M., Amanian, N., Talebi, A., Kiani-Harchegani, M., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Effects of Roughness Coefficients and Complex Hillslope Morphology on Runoff Variables under Laboratory Conditions. *Water*, 11(12), 2550.
- Meteorological Services of Canada. (1951-2019). *Station results - Historical data. Val d'Or A, Climate Id: 7098600.*
- Meteorological Services of Canada. (1971-2000). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1971 à 2000.
- Michalski, A. (2000). Flow measurements in open irrigation channels. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 3(1), 12-16.
- Michaud, A. R., Drouin, A. M., A, Talbot, G. H., David, Biner, S., Lagacé, R., & Rocha, N. R., Gagné, G. (2013). *Mise à jour des normes et procédures de conception des ouvrages hydro-agricoles dans un contexte de changements climatiques.* Quebec, Canada: Consortium de recherche OURANOS. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA).

- Mine-Arnaud (2013, Septembre 2013). [Questions et demandes d'information provenant de participants de l'audience concernant le projet d'ouverture et d'exploitation d'une mine d'apatite par Mine Arnaud — Courriel du BAPE daté du 17 septembre 2013].
- Mine Canadian Malartic. (2018). *Rapport de développement durable*. :
- Miyazaki, T. (2006). *Water flow in soils* : CRC Press.
- Mockus, V. (1957). Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. *US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Latham, MD*.
- Mohammed, H., Yohannes, F., & Zeleke, G. (2004). Validation of agricultural non-point source (AGNPS) pollution model in Kori watershed, South Wollo, Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(2), 97-109.
- Morton, F. I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 66(1-4), 1-76.
- Moss, R., Babiker, W., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., . . . Hibbard, K. (2008). Towards New Scenarios for the Analysis of Emissions: Climate Change, Impacts and Response Strategies : Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat (IPCC).
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., . . . Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- MRNF. (2006). *Portrait territorial: Abitibi-Témiscamingue*. Québec, Canada:
- Musiyarira, H. K., Tesh, D., & Dzinomwa, G. (2017). Sustainable water management: implications for mining in environmentally sensitive areas. *Geo-Resources Environment and Engineering (GREE)*, 2, 130-135.
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Emissions scenarios. Special report of the Intergovernmental panel on climate change : Cambridge University Press, Cambridge.
- Nalecki, P., & Gowan, M. (2008). *Mine Water Management—Dynamic, Probabilistic Modelling Approach*. Communication présentée à Proceedings, 10th International Mine Water Association Congress (p. 533-536).
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. e. a., Srinivasan, R., & Williams, J. (2002). Soil and water assessment tool user's manual version 2000. *GSWRL report*, 202(02-06).
- Neuner, M., Smith, L., Blowes, D. W., Sego, D. C., Smith, L. J., Fretz, N., & Gupton, M. (2013). The Diavik waste rock project: Water flow through mine waste rock in a permafrost terrain. *Applied geochemistry*, 36, 222-233.
- Nichol, C., Smith, L., & Beckie, R. (2003). Water flow in uncovered waste rock—A multi-year large lysimeter study. *Proceedings of the 6 th ICARD (July 12-18, Cairns Australia)*, 919-926.
- Nichol, C., Smith, L., & Beckie, R. (2005). Field-scale experiments of unsaturated flow and solute transport in a heterogeneous porous medium. *Water Resources Research*, 41(5).
- Nielsen, S. A., & Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Hydrology Research*, 4(3), 171-190.

- NRCS. (2007). National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology. *USDA Soil Conservation Service: Washington, DC, USA*.
- NRCS. (2015). *NEH: Chapter 4: Storm Rainfall Depth and Distribution*. :
- Ouranos. (2015). *Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21e siècle*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques: Ressources naturelles Canada.
- Pearce, T., Ford, J., Prno, J., & Duerden, F. (2009). Climate change and Canadian mining: opportunities for adaptation. *Report prepared for the David Suzuki Foundation*, 1-50.
- Pearce, T. D., Ford, J. D., Prno, J., Duerden, F., Pittman, J., Beaumier, M., . . . Smit, B. (2011). Climate change and mining in Canada. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 16(3), 347-368.
- Perilya. (2018). *Broken Hill North Mine Water Management Plan*. :
- Peterka A.J. (1967). *Irrigation operators' workshop, 1967 Water measurement procedures*, HYD-577 Denver: Bureau of reclamation.
- Petersen-Øverleir, A. (2006). Modelling stage—discharge relationships affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. *Hydrological sciences journal*, 51(3), 365-388.
- Phillips, J. V., & Tadayan, S. (1998). *Verification of roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona* (Rapport n° 2330-7102). : US Geological Survey; For sale by US Geological Survey Information Services
- Price, R., & Vojinovic, Z. (2008). Urban flood disaster management. *Urban Water Journal*, 5(3), 259-276.
- Rango, A., & Martinec, J. (1995). Revisiting the degree-day method for snowmelt computations 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(4), 657-669.
- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of hydrology*, 198(1-4), 69-97.
- Rescan Environmental Services Ltd. (2013). *KSM PROJECT Mine Site Water Model Report*. :
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.
- Rivard, G. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales*. :
- ROBVQ. (2006). *Formation sur la gestion intégrée de l'eau par bassin versant*. :
- Roca, M., Murphy, A., Walker, L., & Vallesi, S. (2019). *A review of the risks posed by the failure of tailings dams wallingford*. United Kingdom: HR Wallington.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0* : National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency Cincinnati.

- 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.
- Roy, P. (2015). *Synthèse des changements climatiques pour le secteur minier*. Montréal: Ouranos
- Roy, P., Fournier, É., & Huard, D. (2017). *Standardization Guidance for Weather Data, Climate Information and Climate Change Projections*, . Montreal: Ouranos.
- Ryhming, I. L. (2004). *Dynamique des fluides: un cours de base du deuxième cycle universitaire* : PPUR presses polytechniques.
- Sahoo, G., Ray, C., & De Carlo, E. (2006). Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream. *Journal of Hydrology*, 327(1-2), 94-109.
- Sammarco, O. (2004). A tragic disaster caused by the failure of tailings dams leads to the formation of the Stava 1985 Foundation. *Mine Water and the Environment*, 23(2), 91-95.
- Scharffenberg, W. A. (2016). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's manual Version 4.2* : US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Schneider, J. M., Rickenmann, D., Turowski, J. M., & Kirchner, J. W. (2015). Self-adjustment of stream bed roughness and flow velocity in a steep mountain channel. *Water Resources Research*, 51(10), 7838-7859.
- Schwarz, R., Gerth, A., Morgenstern, S., & Hebner, A. (2009). *Strategies for managing environmental problems and water treatment in mining*. Communication présentée à International Mine Water Conference” Pretoria, South Africa.
- SCS. (1986). *Technical release: Urban hydrology for small watersheds*. : US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Services météorologiques du Canada. (1969-1999). Données historiques, Val d'Or A, Id climatologique: 7098600.
- Shelp, M., Upton, B., Zhan, G., & Sibilski, U. (2009). *Mine Water Management in Modern African Mining Operations*. Communication présentée à Proceedings of the International Mine Water Conference. Water Institute of Southern Africa & International Mine Water Association, Pretoria, South Africa (p. 262-266).
- Sklash, M. G., & Farvolden, R. N. (1979). The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43(1-4), 45-65.
- Smith, C. F., Cordova, J. T., & Wiele, S. M. (2010). *The continuous slope-area method for computing event hydrographs*.
- Smith, C. F., & Cordova, J. T. W., S.M. (2010). The Continuous Slope-Area Method for Computing Event Hydrographs: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5241. 37 p.

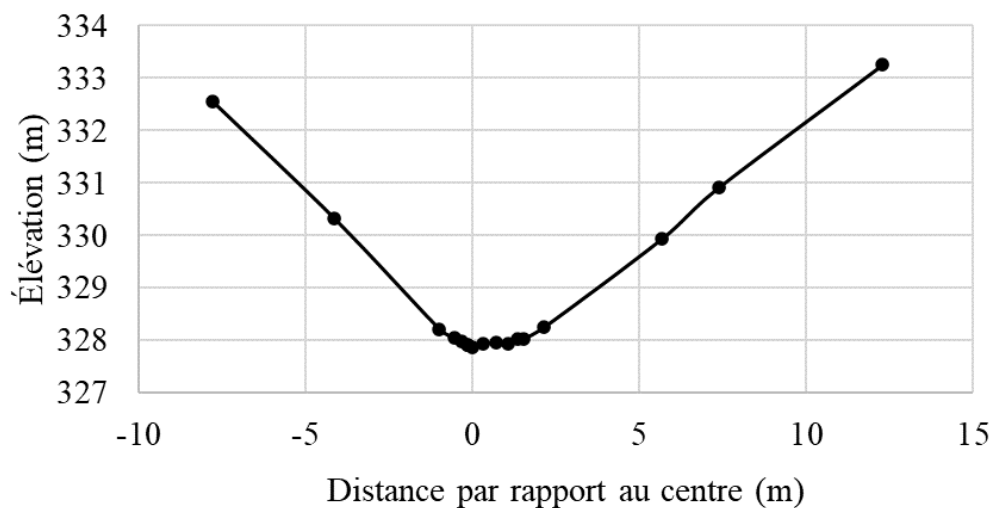
- Smith, L. J., Blowes, D. W., Jambor, J. L., Smith, L., Sego, D. C., & Neuner, M. (2013). The Diavik Waste Rock Project: Particle size distribution and sulfur characteristics of low-sulfide waste rock. *Applied geochemistry*, 36, 200-209.
- SNC-Lavalin. (2004). *Estimation des conditions hydrométéorologiques conduisant aux crues maximales probables (CMP) au Québec, Rapport final*. Montréal, Qc:
- Soldán, P., Pavonič, M., Bouček, J., & Kokeš, J. (2001). Baia Mare accident—brief ecotoxicological report of Czech experts. *Ecotoxicology and environmental safety*, 49(3), 255-261.
- Steenhuis, T., Agnew, L., Gérard-Marchant, P., & Walter, M. (2005). Overland flow. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 3, 130-134.
- Strahler, A. N. (1958). Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *Geological Society of America Bulletin*, 69(3), 279-300.
- StrataGold. (2017). *Eagle gold project: Construction and operation water management plan*. :
- Su, W., & Miller, H. (1995). *Waste pile stability and debris flow formation*. Communication présentée à The 35th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- Tallaksen, L. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of hydrology*, 165(1-4), 349-370.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. doi:10.1175/bams-d-11-00094.1
- Thompson, D. B. (2006). The rational method. *David B. Thompson Civil Engineering Department Texas Tech University*. pp, 1-7.
- Tullis, B. P., & Barfuss, S. (2009). *Conservation through calibration and communication*. Communication présentée à Water resources management V. Proceedings of the Fifth International Conference on Sustainable Water Resources Management, Malta, 2009 (p. 65-74).
- Turnipseed, D. P., & Sauer, V. B. (2010). *Discharge measurements at gaging stations* (Rapport n° 2328-7055). : US Geological Survey.
- USDA, S. (1954). Handbook of channel design for soil and water conservation. *TP-61*.
- USDI. (2001). *Water measurement manual*.
- Van der Linden, P., & Mitchell, J. F. B. (2009). ENSEMBLES: Climate change and its impacts- Summary of research and results from the ENSEMBLES project.
- Van Essen Instruments. (2016). Product manuel - Diver.
- Van Niekerk, H. J., & Viljoen, M. J. (2005). Causes and consequences of the Merriespruit and other tailings-dam failures. *Land Degradation & Development*, 16(2), 201-212. doi:10.1002/ldr.681

- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., . . . Lamarque, J.-F. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- Viessman, W., Lewis, G. L., & Knapp, J. W. (1996). *Introduction to hydrology: fourth edition*. United States of America: HarperCollins College.
- Wang, Y., & Yang, X. (2018). Sensitivity analysis of the surface runoff coefficient of hipims in simulating flood processes in a large basin. *Water*, 10(3), 253.
- Wares, R., & Prud'homme, S. (2013). La mine Canadian Malartic, partie sud de la Ceinture de l'Abitibi, Québec, Canada : découverte et mise en valeur d'un gisement aurifère archéen à fort tonnage. *Bulletin Québec Mines*.
- Wheater, H., Chandler, R., Onof, C., Isham, V., Bellone, E., Yang, C., . . . Segond, M.-L. (2005). Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 403-416.
- Williams-Sether, T., Asquith, W. H., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., & Fang, X. (2004). Empirical, dimensionless, cumulative-rainfall hyetographs developed from 1959-86 storm data for selected small watersheds in Texas. *Statistical Characteristics of Storm Interevent Time, Depth, and Duration for Eastern New Mexico, Oklahoma, and Texas*.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Wise, R. M., Fazey, I., Smith, M. S., Park, S. E., Eakin, H., Van Garderen, E. A., & Campbell, B. (2014). Reconceptualising adaptation to climate change as part of pathways of change and response. *Global Environmental Change*, 28, 325-336.
- WMO. (2009). *Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP)* / World Meteorological Organization. Geneva: World Meteorological Organization.
- WMO. (2018). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). *World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland, Volume II – Measurement of Cryospheric Variables*.
- Woodward, D. (2010). Dans *National Engineering Handbook - Part 630 Hydrology*
- Wright, A. (2006). *Understanding Waste Rock Dump Hydrology is Essential for Effective Closure Planning and ARD Management*. Communication présentée à Proceedings of the First International Seminar on Mine Closure (p. 417-426).
- WSP. (2014). *Projet minier d'Arianne Phosphate au lac à Paul. Caractérisation hydrologique du secteur à l'étude, en conditions actuelles et futures. Révision no 02. : Rapport de WSP Canada Inc. (anciennement GENIVAR Inc.) à Arianne Phosphate Inc.*
- WSP. (2015a). *CMGP – Étude d'impact sur l'environnement :*
- WSP. (2015b). *Projet Akasaba Ouest, Val-d'Or, Qc. Étude d'impact environnemental et social. Volume 1 – Rapport principal. :*

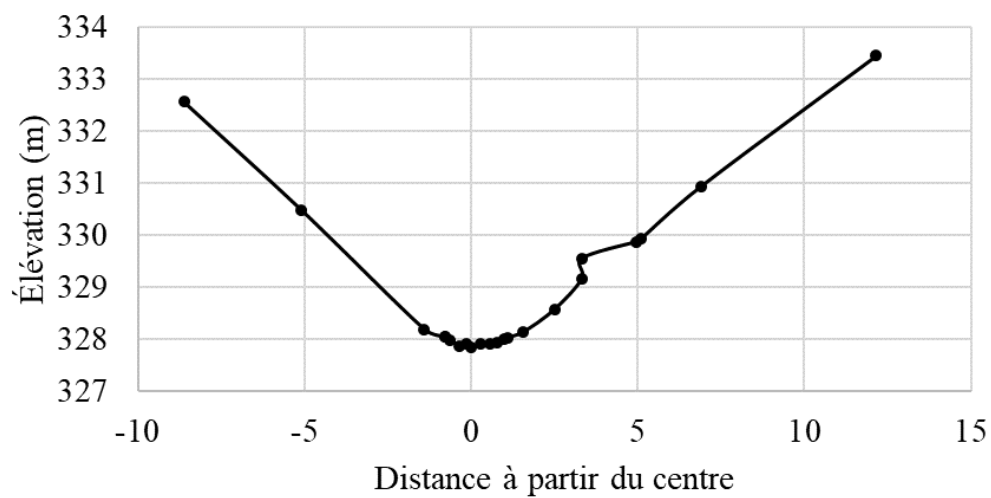
- Yanful, E. K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(8), 1207-1228.
- Zhang, X., Flato, G., Kirchemeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., . . . V.Karin, V. (2019). *Les changements de température et de précipitations pour le Canada*. Ottawa, Ontario:
- Zhou, Z., Smith, J. A., Wright, D. B., Baeck, M. L., Yang, L., & Liu, S. (2019). Storm catalog-based analysis of rainfall heterogeneity and frequency in a complex terrain. *Water Resources Research*, 55(3), 1871-1889.
- Zuzel, J. F., & Cox, L. M. (1975). Relative importance of meteorological variables in snowmelt. *Water Resources Research*, 11(1), 174-176.

ANNEXE A : SECTIONS ARPENTÉES DES FOSSÉS COLLECTEURS

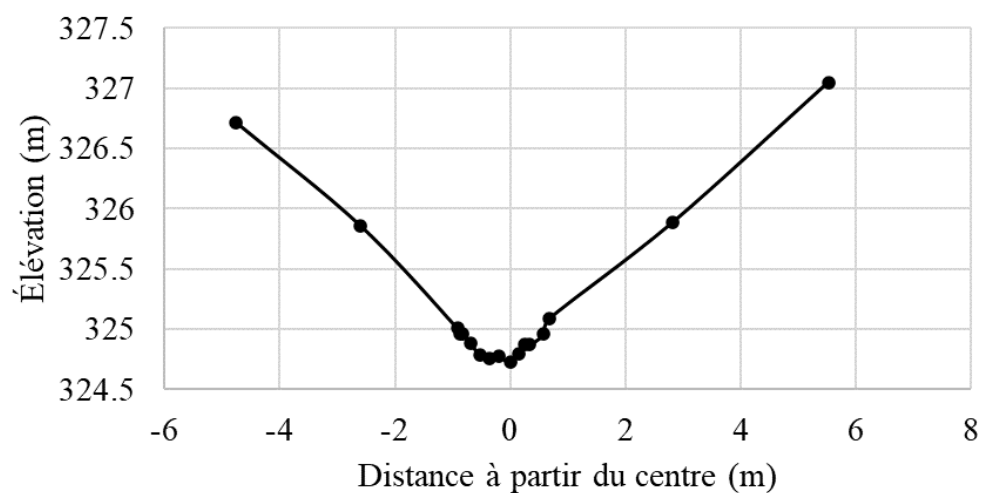
A1.1 : Coupe transversale au capteur amont de la Station de mesure Nord



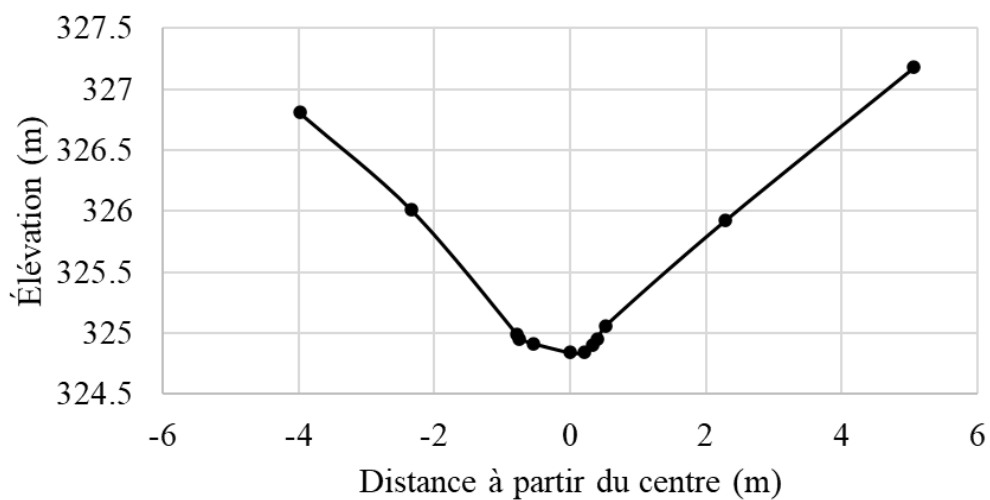
A1.2 : Coupe transversale au capteur aval de la Station de mesure Nord



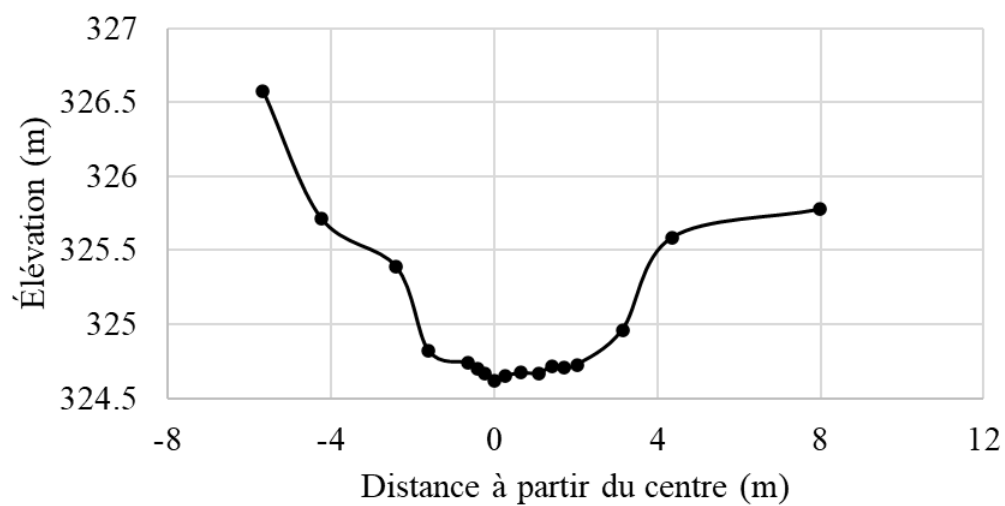
A1.3 : Coupe transversale au capteur amont de la Station de mesure Sud



A1.4 : Coupe transversale au capteur aval de la Station de mesure Sud



A1.5 : Coupe transversale au capteur amont de la Station de mesure Sud-Est



A1.6 : Coupe transversale au capteur aval de la Station de mesure Sud-Est

