

Suivi de l'écoulement de l'eau dans un recouvrement minier à grande échelle par intégration combinée de la modélisation hydrogéologique et de la méthode de tomographie de résistivité électrique en time-lapse

par

Leila BEDOUI

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 19 FÉVRIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Leila Bedoui, 2026



Cette [licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de créditer l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Adrien Dimech, directeur de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Boulanger-Martel, codirecteur de mémoire  
Institut de Recherche Mines et Environnement à l'Université du Québec en Abitibi-  
Témiscamingue

Mme Karine Sylvain, codirectrice de mémoire  
Département des génies civil, géologique et des mines à Polytechnique Montréal

M. François Duhaim, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Li Zhen Cheng, membre du jury  
Institut de Recherche Mines et Environnement à l'Université du Québec en Abitibi-  
Témiscamingue

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 JANVIER 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, le Professeur Adrien Dimech, pour son encadrement de grande qualité, ses précieux conseils, sa disponibilité et ses encouragements tout au long de ce projet, sans quoi je n'aurais pas pu aboutir à ce travail et y prendre autant de plaisir. Son expertise et les nombreuses opportunités qu'il m'a offertes, notamment la participation à des conférences, ont rendu cette première expérience de recherche absolument passionnante !

Je remercie sincèrement mes codirecteurs Karine Sylvain et Vincent Boulanger-Martel pour leur engagement, leur enthousiasme, leur générosité dans le partage de leurs connaissances ainsi que pour leur soutien exceptionnel durant la dernière ligne droite! Merci Karine pour ton aide inestimable et ton expertise en modélisation hydrogéologique, bien avant même d'être officiellement ma codirectrice, et Vincent, pour ton accueil à l'IRME et ton accompagnement dans la modélisation depuis le début. Ma reconnaissance va également à Bruno Bussière et Benoit Plante pour leurs commentaires très constructifs et leur révision d'articles. Je souhaite remercier Gwendoline Hotton pour les échanges enrichissants et Christophe Turcotte pour la formation au laboratoire. J'aimerais également remercier les membres du jury, François Duhaime et Li Zhen Cheng, d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire malgré les délais très courts.

Je tiens à remercier la compagnie Rio Tinto pour nous avoir permis de réaliser nos mesures géophysiques sur leur site. Je suis également reconnaissante envers la compagnie Atkins Réalis pour toutes les données de terrain fournies. Un merci tout particulier à Mike Bellemare et François Bergeron pour leur aide précieuse lors de la campagne de terrain.

Merci à la *Task Force*, Alexis et Thierry, ainsi qu'à Clarissa, Rose-Anne, Jean-Luc, le groupe de géophysique de Polytechnique et le laboratoire du HC3 pour leur aide et tous les beaux moments partagés ensemble. Un merci particulier à mes amis Chloé, Clara, Anouk, Thomas, Yassine et tous ceux qui ont rendu cette aventure Montréalaise inoubliable à tous les égards ! Enfin, je remercie du fond du cœur mes parents, Patricia et Ezzeddine, ainsi que toute ma famille, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants malgré la distance.



# **Suivi de l'écoulement de l'eau dans un recouvrement minier à grande échelle par intégration combinée de la modélisation hydrogéologique et de la méthode de tomographie de résistivité électrique en time-lapse**

Leila BEDOUI

## **RÉSUMÉ**

L'exploitation minière génère d'importantes quantités de résidus dont la gestion représente un enjeu environnemental majeur. Ces résidus, entreposés à l'air libre dans des parcs de plusieurs hectares, peuvent produire un drainage minier contaminé au contact de l'eau. Une solution efficace pour limiter cette contamination consiste à recouvrir les résidus d'une couverture minière, dont le rôle est d'empêcher l'eau issue des précipitations de s'infiltrer jusqu'aux résidus. Parmi les recouvrements existants, la couverture à effet de barrière capillaire (CEBC), composée de plusieurs couches aux propriétés hydrogéologiques contrastées favorisant la déviation latérale de l'eau, est particulièrement adaptée au climat humide du Québec. L'évaluation de son efficacité sur le long terme repose sur l'implantation de sondes ponctuelles de teneur en eau et de succion dans les différentes couches du recouvrement. Plus récemment, les méthodes géophysiques, en particulier la tomographie de résistivité électrique en suivi temporel (TL-ERT), offrent une approche complémentaire, non invasive et à plus grande échelle, pour le suivi de la dynamique spatio-temporelle de l'eau dans ce type de structures.

Ce mémoire présente l'application de la méthode TL-ERT pour la surveillance de l'écoulement de l'eau dans une CEBC inclinée multicouches de faible épaisseur installée à l'échelle pilote dans un parc à résidus miniers au Québec. Ce travail de recherche propose en particulier une méthodologie qui intègre la modélisation hydrogéologique dans le traitement des données TL-ERT, afin de réduire les incertitudes liées à l'interprétation conventionnelle de ces mesures.

Une étude de faisabilité a d'abord été menée en amont de la campagne de terrain pour optimiser les chances d'avoir des données de bonne qualité, suivie d'une campagne de mesures de huit jours durant laquelle des données TL-ERT ont été acquises en continu avant, pendant et après l'injection d'une durée de 4 heures d'un traceur d'eau saline. Enfin, un modèle hydrogéologique, calibré sur les données de teneur en eau des sondes mises en place au sein du recouvrement, a permis une interprétation plus fiable et précise des résultats qui a ainsi confirmé l'efficacité du recouvrement à dévier l'eau latéralement en bas de pente. Les résultats soulignent la pertinence de l'approche d'interprétation proposée qui constitue une preuve de concept pour évaluer de manière plus précise le comportement hydrogéologique de recouvrements miniers de faible épaisseur présentant un fort contraste de résistivité entre leurs couches.

**Mots-clés** : résidus miniers, restauration de sites miniers, couverture à effet de barrière capillaire, tomographie de résistivité électrique, écoulement d'eau, modélisation hydrogéologique

# **Monitoring water flow in a large-scale mine cover system using a combination of hydrogeological modelling and time-lapse electrical resistivity tomography**

Leila BEDOUI

## **ABSTRACT**

The mining industry is responsible for the generation of substantial quantities of tailings, which poses significant environmental challenges in terms of their management. These tailings, stored in tailings storage facilities covering several hectares, can have the potential to produce contaminated mine drainage when they come into contact with water. A viable solution to the problem of contamination is to cover the tailings with a mine cover system. The purpose of a mine cover system is to prevent rainwater from infiltrating into the tailings. Among the existing covers, the cover with capillary barrier effects (CCBE), composed of several layers with contrasting hydrogeological properties that promote lateral water diversion, is particularly well suited to Quebec's humid climate. The assessment of its long-term effectiveness is based on the installation of punctual sensors to measure water content and suction in the different layers of the cover. In recent years, geophysical methods, particularly time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT), have emerged as a complementary, non-invasive, and large-scale approach to monitor the spatio-temporal dynamics of water within these structures.

This master thesis presents the implementation of the TL-ERT method for monitoring water flow in a thin, multi-layered, inclined CCBE installed on a pilot scale at a tailings storage facility in Quebec. More specifically, this research proposes a methodology that integrates hydrogeological modelling into the processing of TL-ERT data, with the aim of reducing the uncertainties associated with the conventional interpretation of these measurements.

A feasibility study was first conducted prior to the field campaign to optimise the chances of obtaining good quality data, followed by an eight-day measurement campaign during which TL-ERT data were continuously acquired before, during and after a four hours injection of a saline water tracer. Finally, a hydrogeological model, calibrated using water content data from sensors installed within the CCBE, enabled a more reliable and accurate interpretation of the results which confirmed the effectiveness of the cover system in diverting water laterally downslope. The results highlight the relevance of the proposed interpretation approach and provide proof of concept for a more accurate assessment of the hydrogeological behaviour of thin mine covers characterized by high resistivity contrast between their layers.

**Keywords:** mine tailings, mine site reclamation, cover with capillary barrier effect, electrical resistivity tomography, water flow, hydrogeological modeling





## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
1.1 Notions fondamentales en hydrogéologie non saturée .....	10
1.1.1 Conductivité hydraulique saturée .....	10
1.1.2 Succion et capillarité.....	12
1.1.3 Équation de Richards .....	16
1.1.4 Courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité.....	18
1.2 Notions en restauration minière .....	25
1.2.1 Drainage minier contaminé.....	25
1.2.2 Principaux systèmes de recouvrements .....	26
1.2.3 La CEBC.....	28
1.2.4 Modélisation numérique des systèmes de recouvrement.....	32
1.3 Géophysique appliquée à l'environnement minier .....	34
1.3.1 Principe de la tomographie de résistivité électrique .....	35
1.3.2 Paramètres affectant la résistivité électrique.....	39
1.3.3 Modélisation et inversion en ERT .....	45
1.3.4 Applications de l'ERT en environnement minier .....	50
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT .....	53
2.1 Justification de l'étude .....	53
2.2 Méthodologie du travail.....	55
2.3 Présentation des articles.....	58
2.3.1 Article 1: Étude de faisabilité géophysique préalable à la campagne de terrain .....	58
2.3.2 Article 2: Intégration de la modélisation hydrogéologique dans l'interprétation des données ERT.....	59
CHAPITRE 3 NUMERICAL FEASIBILITY STUDY ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS AS AN AUTONOMOUS MONITORING METHOD FOR MINE COVER SYSTEMS REDUCING WATER INFILTRATION.....	61
3.1 Introduction.....	62
3.1.1 Context.....	62
3.1.2 Cover monitoring techniques .....	63
3.2 Materials and methods .....	65
3.2.1 Tested cover configuration .....	65
3.2.2 Feasibility study for geophysical imaging .....	66
3.2.3 Tested scenarios .....	68
3.3 Numerical results .....	68

3.3.1	Ability of geophysics to detect different hydrogeological behaviors within the cover.....	68
3.3.2	Importance of electrode spacing for flow monitoring .....	70
3.3.3	Impact of mesh quality.....	72
3.4	Discussion.....	73
3.4.1	Choice of instrumentation.....	73
3.4.2	Limitations of the study .....	73
3.4.3	Future work.....	74
3.5	CONCLUSION.....	75
CHAPITRE 4	INTEGRATING HYDROGEOLOGICAL MODELING AND TIME-LAPSE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY TO MONITOR WATER INFILTRATION IN A MINE WASTE COVER SYSTEM .....	77
4.1	Introduction.....	79
4.2	Site description.....	81
4.2.1	Study area.....	81
4.2.2	Cover system description.....	82
4.3	Materials and methods .....	83
4.3.1	General workflow of the study .....	83
4.3.2	TL-ERT monitoring of the controlled infiltration test.....	86
4.3.3	Conventional ERT data inversion and temperature correction.....	87
4.3.4	Numerical hydrogeological model.....	89
4.3.5	Moisture content-resistivity relationship .....	90
4.3.6	Synthetic apparent resistivity data generation .....	91
4.4	Results.....	92
4.4.1	Conventional inversion of the TL-ERT dataset .....	92
4.4.2	Hydrogeological model calibration.....	95
4.4.3	Comparison between hydrogeological modeling and field TL-ERT data .....	97
4.5	Discussion.....	102
4.5.1	Applicability of TL-ERT monitoring for <i>in situ</i> cover performance assessment.....	102
4.5.2	Using TL-ERT data as a technique for constraining hydrogeological models .....	103
4.5.3	Limitations of the study and recommendations for broader application.....	105
4.6	Conclusion .....	107
CHAPITRE 5	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	109
5.1	Retour sur des étapes clés du projet.....	109
5.1.1	Le modèle hydrogéologique .....	109
5.1.2	Correction de l'effet de la température sur les données inversées.....	113
5.2	Retour sur les OS .....	117

5.2.1	Étude de faisabilité numérique (OS1).....	117
5.2.2	Traitement conventionnel des données de terrain (OS2).....	119
5.2.3	Mise en œuvre de l’approche combinée (OS3).....	120
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		123
ANNEXE I POSTER PRÉSENTÉ À EGU (AVR.2025).....		127
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		129



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques principales des zones saturée et non saturée .....13
Tableau 1.2	Exemples de hauteur capillaire pour différents types de sols.....16
Tableau 1.3	Comparaison entre les différents dispositifs standards.....38
Tableau 3.1	Geophysical parameters and their associated values .....69
Tableau 3.2	Modelling parameters and their associated values .....70
Tableau 4.1	Basic material properties obtained from laboratory measurements. $k_{sat}$ values were estimated using the modified Kozeny Carman equation for non plastic materials (Mbonimpa et al., 2006) and air entry values (AEV) were determined according to the method of tangents of Fredlund et Xing (1994) .....89
Tableau 4.2	Archie's parameters values at 25°C based on typical values reported in the literature for materials used in similar CCBE covers (Dimech et al., 2023). Pore water resistivity $\rho_w$ was derived from <i>in situ</i> bulk electrical conductivity measurements recorded by Teros 12 sensors at various depths, following the methodology described by (Dimech et al., 2019). $\theta$ was obtained from the water content values extracted from SEEP/W .....91



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Répartition des parcs à résidus au Québec .....9
Figure 0.2	(a) Vue satellite du site de résidus de bauxite de Rio Tinto (b) Représentation schématique de la configuration du recouvrement et du dispositif géophysique mis en place .....12
Figure 1.1	Représentation des différentes zones hydrogéologiques en subsurface (zone vadose, frange capillaire et zone saturée) Adaptée de Woessner et Poeter (2020) .....12
Figure 1.2	Apparition d'une tension $T_s$ perpendiculaire à la surface libre à l'interface eau-air (cas d'une interface plane) Adaptée de Delage et Cui (2000).....14
Figure 1.3	Représentation schématique de la remontée capillaire dans les pores d'un sol (un pore est équivalent à un tube cylindrique dans cette représentation) Adaptée de Delage et Cui (2000) .....15
Figure 1.4	Interdépendance des paramètres hydrauliques .....17
Figure 1.5	Représentation schématique de la CRE pour un même matériau lors du premier cycle de drainage/mouillage Adaptée de Mbonimpa et al. (2021) .....19
Figure 1.6	Causes principales de l'hystérésis : effet bouteille d'encre et angle de contact Adaptée de Delage et Cui (2000) .....20
Figure 2.1	Description des étapes de l'inversion « hydrogéophysique ». Les pointillés rouges représentent les éléments qui diffèrent de l'inversion conventionnelle. Dans l'inversion conventionnelle, le modèle hydrogéologique final est remplacé par un modèle de résistivité de la subsurface, traduit par la suite en teneur en eau par l'intermédiaire d'une relation pétrophysique .....54
Figure 2.2	Planification du projet : répartition du travail selon les objectifs spécifiques (OS) .....55
Figure 2.3	Méthodologie suivie pour réaliser l'OS1 .....56
Figure 2.4	Méthodologie suivie pour réaliser l'OS2 .....57
Figure 2.5	Méthodologie suivie pour réaliser l'OS3 .....58

Figure 3.1	Schematic representation of the inclined CCBE selected for one of the field experimental tests.....	65
Figure 3.2	Feasibility study approach inspired by Robinson et al. (2020) .....	69
Figure 3.3	Simulation of synthetic data sets for two flow cases and inversion/ratio results .....	71
Figure 3.4	Inversion ratio results over time for different electrode spacings <b>a):</b> 0.5 m; <b>(b):</b> 1 m and <b>(c):</b> 4 m .....	71
Figure 3.5	Inversion results for two mesh refinements with 0.5 m electrode spacing .....	72
Figure 3.6	Schematic of the geophysical instrumentation and its location in the different cover configurations .....	75
Figure 4.1	(a) Satellite imagery of the 200-ha tailings storage facility located in Jonquière, Quebec, Canada. (b) Schematic view of the experimental CCBE and location of the hydrogeological sensors, the geoelectrical monitoring system and the controlled infiltration test. (c) 2D cross section of the experimental CCBE inclined with a slope of 7% .....	83
Figure 4.2	Overview of the methodology used to assess the <i>in situ</i> behavior of inclined cover system using geoelectrical monitoring. The different parts of this flowchart correspond to the following methodology sections (4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 and 4.3.6).....	85
Figure 4.3	Schematic representation of ERT and infiltration tests setup, showing electrode layout, trench geometry and water delivery system used for the controlled infiltration test .....	87
Figure 4.4	Inverted resistivity results from the monitoring campaign: (a) a 2D inverted resistivity distribution showing three vertical virtual sensor profiles located above the trench, close to the trench and downslope from the trench; (b) temporal evolution of inverted resistivity corrected at 25°C at the sensor positions for the three locations, and (c) close-up of infiltration test with the corresponding 2D resistivity ratio 8 hours after the first infiltration event.....	94
Figure 4.5	Uncalibrated and calibrated hydrogeological properties used in the model for (a) water retention curves and (b) permeability functions .....	95

Figure 4.6	Experimental site data used for hydrogeological model calibration and TL-ERT monitoring campaign: (a) precipitation and air temperature recorded by a nearby weather station, interpolated soil temperatures derived from Teros 12 sensors, (b) simulated $\theta$ using the uncalibrated hydrogeological properties from Table 4.1 and Figure 4.5 (dotted lines) and (c) simulated $\theta$ using the calibrated hydrogeological properties derived from Figure 4.5 (solid lines).....	96
Figure 4.7	Conversion of the SEEP/W model to TL-ERT synthetic data: (a) interpolation of $\theta$ values on a 2D pyGIMLi mesh and conversion to resistivity values adjusted to field temperature; (b) temporal evolution of $\theta$ and resistivity at selected slope positions, and (c) example of a simulated apparent resistivity pseudo-section (October 23, 13:00) generated using the same acquisition protocol as in the field two hours after the beginning of the infiltration test .....	99
Figure 4.8	(a) Graphical illustration of the depth of investigation (DOI*) calculated from Roy et Apparao (1971) of various Wenner configuration in the inclined CCBE. (b) Comparison of simulated and measured apparent resistivity variations at three slope positions (top, middle, and bottom) for different depths within the cover, with mean RMSE indicated for each position. (c) RMSE values for each Wenner configuration as a function of $x_A$ , the location of A electrode .....	101
Figure 5.1	Démarche de la modélisation hydrogéologique, de la définition du modèle à la simulation de l'infiltration du traceur .....	110
Figure 5.2	Modèle SEEP/w avec les conditions limites et le maillage.....	111
Figure 5.3	Séries temporelles de teneur en eau, conductivité interstitielle et succion pour les trois stations de sonde (haut, milieu et bas de pente) correspondant à la période de calibration du modèle. Chaque station comprend quatre capteurs TEROS 12 disposés verticalement (un capteur au milieu de chaque couche) .....	112
Figure 5.4	CRE de terrain mesurées par les sondes TEROS 12 et TEROS 21 sur une période allant de novembre 2024 à juin 2025 .....	113
Figure 5.5	Conditions de précipitation et de température sur le terrain pendant la période de monitoring TL-ERT .....	114
Figure 5.6	Haut : séries temporelles de température mesurées par les sondes TEROS 12 au milieu de chaque couche du recouvrement.	

	Bas : aperçu de la variation relative de la conductivité électrique au cours du temps en fonction de la température .....115
Figure 5.7	Profils de Température vs. Profondeur pour quelques pas de temps ERT.....116
Figure 5.8	Représentation schématique des modèles géophysique et hydrogéologique servant à sélectionner les paramètres d'intérêt pour la campagne de terrain.....118
Figure 5.9	Processus d'acquisition des données avec un protocole Wenner et inversion de ces données avec prise en compte de la température.....120
Figure 5.10	Différentes étapes pour générer des résistivités apparentes simulées depuis un modèle hydrogéologique, comparées ensuite aux données mesurées .....121

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

1D	Une dimension (variation en z)
2D	Deux dimensions (variations en x et z)
AEV	Pression d'entrée d'air (Air Entry Value)
CCBE	Cover with Capillary Barrier Effect
CEBC	Couverture avec Effet de Barrière Capillaire
CL	Lean Clay (Argile inorganique de faible à moyenne plasticité)
CRE	Courbe de Rétention d'Eau
DMA	Drainage Minier Acide
DMB	Drainage Minier Basique
DMC	Drainage Minier Contaminé
DDL	Down Dip Limit (Distance d'infiltration maximale de la pente)
DOI	Profondeur d'investigation (Depth Of Investigation)
ERT	Electrical Resistivity Tomography (tomographie de résistivité électrique)
EGU	European Geosciences Union (Conférence sur les géosciences à Vienne)
FDR	Frequency Domain Reflectometry
GEOMTL	GeoMontreal 2024 (Conférence de la Société canadienne de géotechnique)
GW	Well-graded Gravel (Gravier bien calibré)
LSHCC	Low Saturated Hydraulic Conductivity Cover (Recouvrement à faible conductivité hydraulique saturée)
MK	Modèle de Kovacs Modifié
KCM	Modèle de Kozeny-Carman Modifié
OS	Objectif Spécifique

QC	Québec, Canada
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)
SEEP/W	Logiciel de modélisation hydrogéologique
SC	Clayey Sand (Sable argileux)
SRC	Store-and-Release Cover (Recouvrement évapo-transpirant)
SAS4000	Résistivimètre développé par ABEM
TDR	Time Domain Reflectometry
TL-ERT	Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (Tomographie de résistivité électrique en suivi temporel)
TSF	Tailings Storage Facility (Parc à résidus miniers)
USCS	Unified Soil Classification System (Système de classification des sols)
WEV	Water Entry Value (Pression résiduelle)
WRC	Water Retention Curve (Courbe de rétention d'eau)

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$q_{wl}$	Débit spécifique [ $L^3T^{-1}L^{-2}$ ]
$k_{sat}$	Conductivité hydraulique saturée [ $LT^{-1}$ ]
$k_{x,y,z}$	Conductivité hydraulique dans le repère cartésien [ $LT^{-1}$ ]
$k(\psi)$	Fonction de perméabilité
$h$	Charge hydraulique en milieu saturé; de succion en milieu non saturé [L]
$h_z$	Énergie potentielle d'élévation [L]
$h_p$	Énergie potentielle de pression [L]
$p$	Pression du fluide [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]
$\rho$	Densité du fluide [ $ML^{-3}$ ]
$\rho_s$	Densité des grains [ $ML^{-3}$ ]
$g$	Accélération gravitationnelle [ $LT^{-2}$ ]
$z$	Élévation par rapport à un point de référence [L]
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau [ $ML^{-2}T^{-2}$ ]
$\mu_w$	Viscosité dynamique de l'eau [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]
$D_{10}$	Diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique [L]
$D_{60}$	Diamètre des grains correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique [L]
$C_u$	Coefficient d'uniformité du matériau [-]
$C_G$	Constante du modèle de KCM pour les sols granulaires [-]
$C_P$	Constante du modèle de KCM pour les sols plastiques [-]
$x$	Paramètre de tortuosité du modèle KCM [-]

## XXIV

$\chi$	Paramètre empirique pour les sols plastiques dans le modèle de KCM [-]
$w_L$	Limite de liquidité [-]
$\Psi_{tot}$	Succion totale (somme de la succion matricielle et osmotique) [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Psi$	Succion matricielle [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Psi_a$	Pression d'entrée d'air (AEV) [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Psi_r$	Pression résiduelle (WEV) [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\Psi_n$	Paramètre normatif [L]
$\Psi_0$	Succion d'un sol à l'état sec ( $S_r = 0$ ) [L]
$\Psi_\pi$	Succion osmotique [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\pi$	Potentiel osmotique [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$u_a$	Pression d'air [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$u_w$	Pression d'eau [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$r$	Rayon du tube capillaire [L]
$T_s$	Tension de surface de l'eau [ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
$H_c$	Hauteur de la remontée capillaire [L]
$\alpha$	Angle de raccordement entre le ménisque et le solide [-]
$\theta(\psi)$	Fonction de rétention d'eau
$\theta_w$	Teneur en eau volumique [-]
$\theta_s$	Teneur en eau volumique à saturation [-]
$\theta_r$	Teneur en eau volumique résiduelle [-]
$S_r$	Degré de saturation [-]
$S_a$	Degré de saturation lié aux forces d'adhésion [-]

$S_c$	Degré de saturation lié aux forces capillaires [-]
$h_{co}$	Remontée capillaire équivalente [L]
$C(\psi)$	Paramètre d'équilibre thermodynamique de Fredlund et Xing [-]
$a_c$	Coefficient d'adhésion [-]
$n$	Porosité du matériau [-]
$e$	Indice des vides du matériau [-]
$\alpha_v$	Constante d'ajustement du modèle de van Genuchten [ $L^{-1}$ ]
$n_v$	Constante d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
$m_v$	Constante d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
$\sigma_{25}$	Conductivité électrique normalisée à 25°C [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\sigma_T$	Conductivité électrique mesurée in-situ à la température T [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\sigma$	Conductivité électrique du milieu poreux [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\sigma_w$	Conductivité électrique du fluide interstitiel [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\sigma_s$	Conductivité électrique de surface des grains solides [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\sigma_c$	Conductivité électrique de la phase argileuse [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ]
$\rho$	Résistivité électrique [ $ML^3T^{-3}I^{-2}$ ]
$\rho_{25}$	Résistivité électrique normalisée à 25°C [ $ML^3T^{-3}I^{-2}$ ]
$\rho_T$	Résistivité électrique mesurée in-situ à la température T [ $ML^3T^{-3}I^{-2}$ ]
$\rho_w$	Résistivité électrique du fluide interstitiel [ $ML^3T^{-3}I^{-2}$ ]
$t_c$	Facteur de dépendance entre la conductivité électrique et la température [-]
$T$	Température de subsurface mesurée sur le terrain [Θ]
$T_{moy}$	Température moyenne annuelle de l'air [Θ]

$\Delta T$	Amplitude annuelle de la température de l'air [ $\Theta$ ]
$d$	Paramètre de profondeur du modèle de température (Brunet, Clément, et Bouvier (2010)) [L]
$t$	Jour de l'année [T]
$\varphi$	Déphasage entre la température de l'air et celle de la surface [ $\Theta$ ]
$m_a$	Exposant de cimentation dans la loi d'Archie [-]
$n_a$	Exposant de saturation dans la loi d'Archie [-]
$B$	Mobilité des ions dans la double couche ionique (modèle de Waxman et Smits (1968)) [ $M^{-1}T^2I$ ]
$Q_v$	Densité volumique de charge en excès dans la double couche (modèle de Waxman et Smits (1968)) [ $L^{-3}TI$ ]
$F^*$	Facteur de formation du milieu poreux non saturé [-]
$\phi_s$	Fraction volumique de la phase solide (modèle de Mollehuara Canales et al. (2020)) [-]
$\phi_c$	Fraction volumique d'argiles (modèle de Mollehuara Canales et al. (2020)) [-]
$V$	Potentiel électrique [ $ML^2T^{-3}I^{-1}$ ]
$K$	Facteur géométrique liée à la géométrie d'un quadripôle [L]
$\delta$	Fonction de Dirac
$\vec{\nabla}(f)$	Opérateur gradient avec $f$ une fonction quelconque
$\nabla(\vec{f})$	Opérateur divergent
$\Delta f$	Opérateur laplacien scalaire
$\vec{j}$	Vecteur densité de courant [ $L^{-2}I$ ]
$I$	Intensité du courant [I]
$\vec{E}$	Vecteur de l'intensité du champ électrique [ $MLT^{-3}I^{-1}$ ]

$\Phi(m)$	Fonction coût à minimiser
$d_{\text{obs}}$	Vecteur de résistivités mesurées sur le terrain
$d(m)$	Vecteur de résistivités calculé à partir d'un modèle $m$ de résistivité
$W_m$	Matrice de régularisation
$W_d$	Matrice de pondération des données mesurées
$m$	Modèle de résistivité à une itération données
$m_{\text{ref}}$	Modèle de résistivité initial utilisé comme référence
$\beta$	Paramètre de régularisation
$J$	Matrice jacobienne
$\lambda$	Régularisation horizontale [-]
$Z_{\text{weight}}$	Régularisation verticale [-]
$a$	Erreur absolue liée au résistivimètre [ $ML^3T^{-3}I^{-2}$ ]
$b$	Erreur relative à la mesure de résistivité [-]



# INTRODUCTION

## 0.1 Contexte de l'étude

### 0.1.1 Génération de rejets miniers au Québec

L'industrie minière occupe une place centrale dans l'économie mondiale en fournissant les métaux essentiels au fonctionnement de notre société de consommation. Son rôle est d'autant plus crucial dans le contexte actuel de transition énergétique qui entraîne une hausse significative de la demande en certains métaux dits « critiques », tels que le lithium, le cuivre, le manganèse ou encore les terres rares. Le marché de ces ressources a déjà doublé au cours des cinq dernières années et se poursuivra à l'avenir avec une demande mondiale en technologies bas-carbone, telles que les batteries pour véhicules électriques ou les panneaux solaires, qui pourrait être multipliée par deux à quatre à l'horizon 2040 (Gibson, Frijhoff, & Fedosenko, 2024).

Cependant, cette croissance soutenue du secteur minier s'accompagne de défis environnementaux majeurs, notamment en ce qui concerne la gestion des rejets miniers. En effet, l'extraction du minerai d'intérêt, réalisée principalement dans des mines à ciel ouvert qui concentrent plus de 80% de la production mondiale de métaux contre moins de 20% pour les mines souterraines (Ghorbani et al., 2023), génère des quantités de rejets miniers considérables. Le volume de rejets produits est généralement équivalent à celui de la roche extraite contenant du minerai exploitable. Cela s'explique par l'exploitation d'un grand nombre de gisements à haut tonnage et faible teneur, c'est-à-dire que les concentrations en métal sont souvent de l'ordre de quelques grammes par tonne de minerai (Calvo, Mudd, Valero, & Valero, 2016).

Les rejets miniers usuellement répartis en deux grandes catégories, les stériles miniers et les résidus miniers, sont entreposés dans des infrastructures distinctes. Les stériles miniers, roches sans valeur économique extraites pour accéder au minerai, sont entreposés dans des haldes souvent sous forme de rehaussement en bancs. Les haldes à stériles peuvent contenir des volumes de roches dépassant les millions de mètres cubes et atteindre des hauteurs de plus de 300 mètres (Blight, 2009; Martin et al., 2017; Palomo, Bard, Campaña, & Anabalon, 2008).

Les résidus miniers sont des matériaux fins issus des procédés de traitement du minerai. Ils sont entreposés à la surface, dans des parcs à résidus dont la structure vise à les isoler de l'environnement. Ces parcs sont ainsi délimités par des digues construites progressivement au fur et à mesure de l'entreposage des résidus. Environ 3500 parcs à résidus sont recensés dans le monde, dont la superficie peut varier de quelques à plusieurs milliers d'hectares (Lottermoser, 2010b). Les résidus peuvent soulever des enjeux géochimiques liés à la génération et au transport de drainage minier contaminé (DMC) dont le pH peut être acide, neutre ou alcalin. Le DMC survient lorsque les résidus réagissent avec l'eau (pluie, ruissellement) et/ou l'oxygène atmosphérique et libèrent des éléments dans les eaux de drainage pouvant être délétères pour l'environnement si leur concentration excède les normes environnementales (Lottermoser, 2010a).

Cette étude se concentre sur la problématique environnementale posée par les parcs à résidus miniers au Québec, en particulier en ce qui concerne la génération de DMC. Le Québec, l'une des principales provinces minières au Canada avec l'Ontario et la Colombie-Britannique, s'inscrit pleinement dans le contexte global de développement minier : en 2022, une vingtaine de mines en activité étaient recensées, contribuant à hauteur de 12 milliards de dollars au produit intérieur brut (PIB) de la province, soit une hausse de 57% par rapport à 2014 (Québec, 2024b). Le secteur génère plus de 51 000 emplois et attire d'importants investissements : environ 5,7 milliards de dollars en 2023, soit une augmentation de plus de 19% par rapport à l'année précédente (Québec, 2024a). La gestion des rejets miniers est donc là aussi un enjeu critique : le Québec compte environ soixante parcs à résidus représentés sur la Figure 0.1, dont les volumes importants nécessitent des stratégies de restauration adaptées pour prévenir toute contamination à long terme (Dimech et al., 2022).

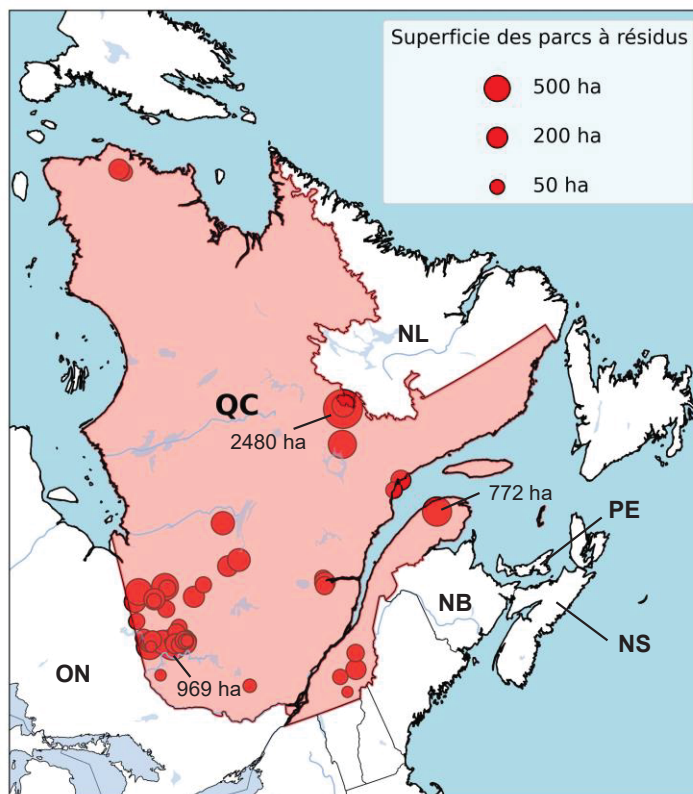


Figure 0.1 Répartition des parcs à résidus au Québec  
Adaptée de Dimech et al. (2022)

### 0.1.2 Gestion du drainage contaminé et restauration minière

Le cadre réglementaire Québécois intègre le concept de restauration des sites miniers en exigeant que toute compagnie souhaitant ouvrir une mine soumette au Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF) un plan de fermeture et de remise en état du site avant le début de ses activités. Ce plan doit être mis à jour tous les cinq ans et soumis de nouveau au ministère pour approbation. Les mises à jour récentes de la loi sur les mines (Loi 63) et de la Directive 019 élaborée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) qui décrit les exigences techniques à respecter, témoignent d'une volonté de concilier développement minier et protection de l'environnement (MRNF, 2024b). La restauration d'un site minier, qui débute à la fin de l'exploitation, vise principalement à remettre le site dans un état acceptable.

Cela nécessite notamment de réduire tout risque pour la santé et la sécurité des personnes, de limiter la propagation de contaminants et de favoriser l'autonomie du site, de sorte qu'il n'ait pas besoin d'intervention à long terme (MRNF, 2024a). Dans le but d'optimiser la gestion du site post-exploitation dans son ensemble, la compagnie minière peut également envisager de le restaurer progressivement, c'est-à-dire de débiter les travaux avant la cessation des activités (MRNF, 2024a). Ces travaux incluent la gestion intégrée des rejets miniers, notamment par revalorisation pour réduire les besoins en matériaux d'emprunt, par désulfuration dans le cas de rejets générateurs de drainage minier acide (DMA) ou par filtration pour diminuer leur teneur en eau et améliorer leur stabilité (Aubertin et al., 2015; Demers & Pabst, 2021a). Face à ces défis, de nombreuses solutions techniques de restauration ont émergé telles que les systèmes de couvertures multicouches, constituées de matériaux naturels et/ou synthétiques, posées directement sur les résidus miniers et dont le rôle est de limiter l'infiltration de l'eau issue des précipitations (Bussière & Guittonny, 2021a). Divers outils de surveillance de ces systèmes sont mis en œuvre afin d'assurer le maintien de leur performance hydrogéologique sur le long terme et de prévenir tout risque de contamination des eaux de drainage en cas de défaillance. Il s'agit entre autres, des capteurs de teneur en eau et de succion installés à différentes profondeurs dans les recouvrements, des lysimètres servant à évaluer la quantité et la qualité de l'eau de percolation, des piézomètres pour mesurer la hauteur de la nappe phréatique, ainsi que des stations météorologiques enregistrant des paramètres tels que la température de l'air, l'humidité relative, les précipitations, le rayonnement solaire, la vitesse et la direction du vent. À noter que le choix des instruments varie selon la fonction spécifique du recouvrement (Bussière et al., 2021). Plus récemment, la géophysique, en particulier la méthode de tomographie de résistivité électrique en continue (TL-ERT), est utilisée de manière complémentaire. Un de ses avantages est de permettre le suivi indirect de l'évolution de la teneur en eau dans les recouvrements, de manière non invasive et sur de plus grandes surfaces (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2023; Maqsoud, Bussiere, Aubertin, Chouteau, & Mbonimpa, 2011).

### 0.1.3 Origine du projet de recherche

Face à des enjeux environnementaux de plus en plus complexes, notamment concernant la gestion de la ressource en eau, il devient essentiel de mieux comprendre et quantifier les processus hydrogéologiques. Plusieurs auteurs (Binley et al., 2015; Dimech et al., 2022; Wagner & Uhlemann, 2021) soulignent la contribution importante de l'hydrogéophysique comme méthode de caractérisation non invasive du sous-sol. La méthode TL-ERT en particulier, est largement employée en raison de sa sensibilité aux variations de teneur en eau et aux contrastes de conductivité électrique entre le fluide et le milieu poreux (Samouëlian, Cousin, Tabbagh, A, & Richard, 2005). L'imagerie spatio-temporelle des propriétés électriques obtenue par TL-ERT permet de suivre indirectement l'évolution de différents processus, tels que la migration de gaz ou de contaminants (Johnson et al., 2012; Steelman, Klazinga, Cahill, Endres, & Parker, 2017) ou encore les écoulements d'eau en zone vadose à l'aide de traceurs salins, aussi bien en laboratoire (Koestel, Kemna, Javaux, Binley, & Vereecken, 2008) qu'à l'échelle du terrain (Hübner, Günther, Heller, Noell, & Kleber, 2017; Lamb et al., 2019).

En revanche, l'application de la méthode TL-ERT à l'environnement minier est relativement récente : seulement environ 3% des publications scientifiques recensées y font référence (Dimech et al., 2022). Parmi ces publications, certaines d'entre elles ont démontré son potentiel pour évaluer la performance de systèmes de recouvrements miniers installés à l'échelle pilote dans le but de limiter la génération de drainage minier acide (DMA) (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2019; Dimech et al., 2023). Il est donc important de tester la méthode TL-ERT dans d'autres contextes miniers ayant des enjeux et des stratégies de conception des recouvrements différents. Dans cette optique, ce projet de maîtrise vise également à installer un dispositif géophysique sur un recouvrement minier.

La planification de la fermeture par Rio Tinto de son parc à résidus de bauxite, situé à proximité de l'usine Vaudreuil à Jonquière (Québec) (Rio Tinto, 2024), a donné lieu à la construction d'un recouvrement pilote qui est devenu le site de cette étude (Figure 0.2).

La configuration retenue, d'une superficie de 6000 m<sup>2</sup>, résulte d'essais en laboratoire et de modélisations numériques préliminaires menés conjointement par des acteurs industriels et des

chercheurs. Cette configuration, d'une épaisseur totale de 1 m, se compose de quatre couches successives, depuis la surface : 30 cm de mort-terrain, 20 cm de gravier, 30 cm d'argile et 20 cm de gravier. L'ensemble des matériaux utilisés provient de carrières à proximité du site.

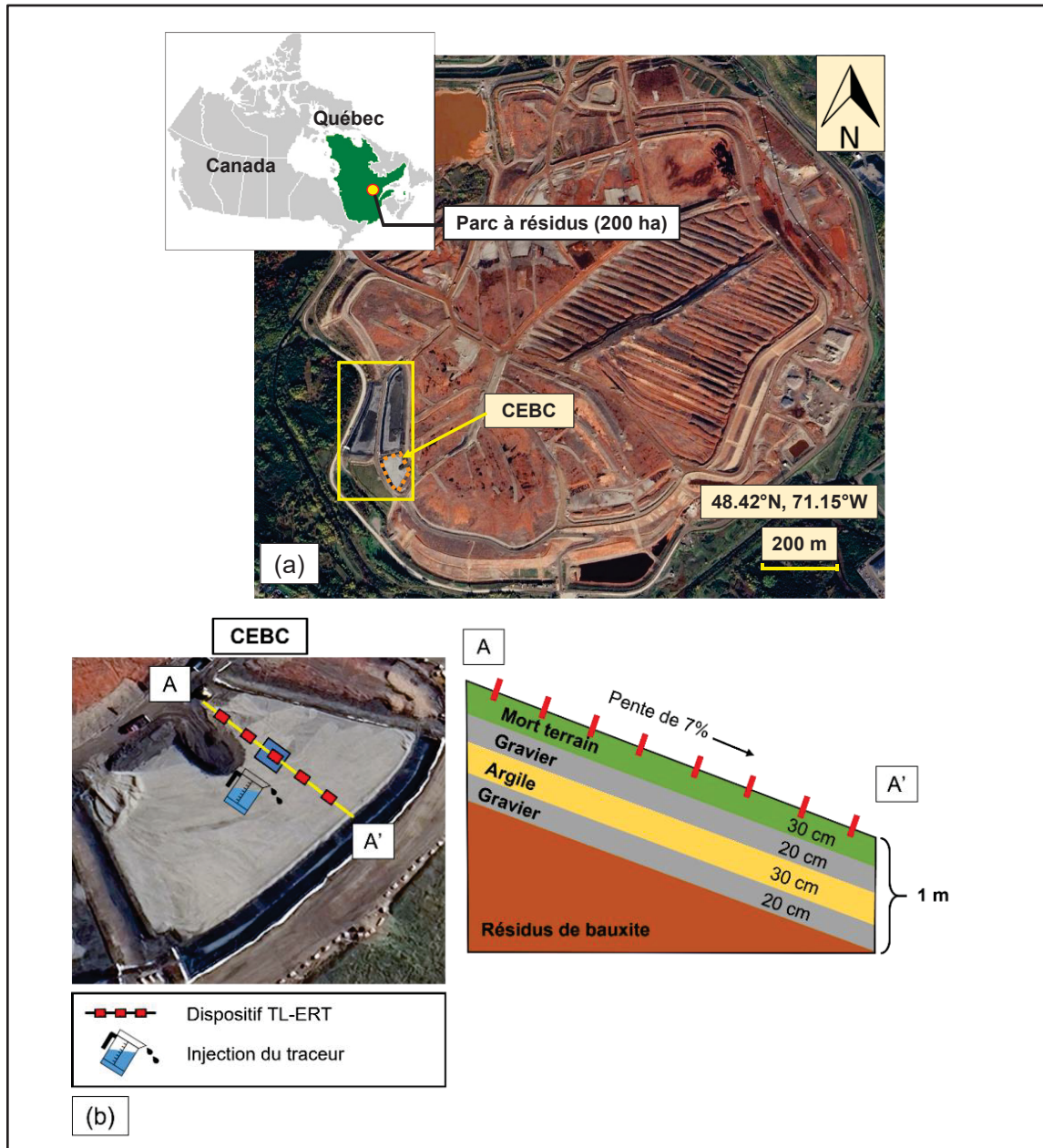


Figure 0.2 (a) Vue satellite du site de résidus de bauxite de Rio Tinto.  
 (b) Représentation schématique de la configuration du recouvrement et du dispositif géophysique mis en place

## **0.2 Description du projet de recherche**

### **0.2.1 Objectifs du projet**

L'objectif principal de ce projet est d'obtenir une imagerie de l'écoulement de l'eau au sein de la CEBC inclinée, en intégrant un modèle hydrogéologique dans le traitement des données.

Pour répondre à cet objectif, trois objectifs spécifiques (OS) ont été définis :

- **OS1:** Réaliser une étude de faisabilité numérique préalable à l'instrumentation sur le terrain, afin de maximiser la pertinence et la qualité du jeu de données géophysiques.
- **OS2:** Effectuer un traitement conventionnel des données électriques acquises sur le terrain, afin d'obtenir des imageries de la dynamique de l'écoulement de l'eau.
- **OS3:** Proposer une approche alternative couplée pour l'élaboration d'un modèle conceptuel. Cette approche conjointe de la géophysique et de la modélisation hydrogéologique doit permettre une meilleure compréhension de l'écoulement de l'eau dans le recouvrement.

### **0.2.2 Retombées du projet**

Les retombées du projet concernent les OS1 et OS3, qui s'inscrivent dans la continuité de travaux déjà présents dans la littérature, qu'il s'agisse d'évaluer la faisabilité numérique d'une campagne de terrain à l'aide de modèles conceptuels (J. Robinson, Johnson, & Rockhold, 2020), ou de coupler des informations hydrogéologiques et géophysiques afin de diminuer les incertitudes inhérentes au traitement des données géophysiques (Ferré et al., 2009; Hinnell et al., 2010; Wagner & Uhlemann, 2021). L'originalité de ce travail réside dans l'application de ces OS au contexte de la restauration minière. L'OS1 est d'autant plus pertinent dans ce contexte que les matériaux et la géométrie du système sont connus à l'avance, ce qui permet d'adapter au mieux la configuration géophysique au recouvrement en question.

De plus, l'OS3 est particulièrement approprié aux recouvrements de faible épaisseur présentant de forts contrastes de propriétés entre les couches, car ces caractéristiques compliquent l'interprétation des données ERT, surtout lorsque les électrodes sont placées en surface (Perri,

Cassiani, Gervasio, Deiana, & Binley, 2012). Cette méthode hydrogéophysique couplée développée à l'OS3, permettra donc de mieux quantifier l'écoulement de l'eau dans le recouvrement par comparaison avec un modèle hydrogéologique. De manière complémentaire, l'OS3 pourrait permettre, dans le cadre d'une étude future, de calibrer les modèles hydrogéologiques à partir des données géophysiques. À terme, les OS1 et OS3 pourraient être intégrés dans un protocole standard pour l'évaluation et le suivi de l'efficacité des recouvrements par la méthode TL-ERT, de la phase d'étude de faisabilité à l'interprétation finale des résultats.

### **0.2.3 Contenu du mémoire**

Le mémoire est organisé en cinq chapitres distincts et structuré autour de deux articles. Suite à ce chapitre introductif, une revue de littérature (Chapitre 1) pose les bases techniques de ce mémoire. Le chapitre 2 apporte une justification de l'étude au regard des travaux existants dans la littérature et présente un aperçu du contenu des articles constituant les chapitres suivants. Les chapitres 3 et 4 constituent le cœur du mémoire. Ils regroupent deux articles rédigés respectivement pour la conférence *GeoMontréal 2024* et pour une soumission à la revue *Vadose Zone Journal*. Ces articles contribuent à répondre à l'objectif général qui est de proposer une méthodologie d'interprétation des données TL-ERT pour suivre l'écoulement de l'eau dans un recouvrement minier. L'article de conférence répond à l'OS1 en présentant une étude de faisabilité numérique visant à déterminer les paramètres optimaux du dispositif géophysique et de l'essai d'infiltration. L'article soumis à la revue répond aux OS2 et OS3. Une première section est consacrée au traitement conventionnel des données, suivie d'une approche couplée intégrant un modèle hydrogéologique pour interpréter quantitativement l'écoulement de l'eau. Le chapitre 5 propose une discussion générale des travaux réalisés. Finalement, la dernière section de ce mémoire synthétise l'ensemble du travail effectué et formule plusieurs recommandations pour une poursuite potentielle du projet.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Tel que mentionné en introduction, les recouvrements miniers sont des systèmes complexes conçus pour limiter la génération et la propagation de contaminants issus des rejets miniers (Bussière & Guittonny, 2021a). Ces systèmes, généralement constitués d'une succession de couches de matériaux granulaires de granulométrie différentes, visent soit à limiter l'accessibilité de l'oxygène ou à contrôler les infiltrations d'eau et la température des rejets (Plante, Schudel, & Benzaazoua, 2021). Le suivi du comportement de ces systèmes sur le long terme est souvent réalisé avec de l'instrumentation géotechnique classique (Bussière et al., 2021; C. Power, Ramasamy, & Mkandawire, 2018), mais certaines techniques géophysiques, comme la méthode TL-ERT, s'avèrent prometteuses pour augmenter la résolution spatio-temporelle des données de suivi (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2019; Dimech et al., 2023; Maqsoud et al., 2011). La présente revue de littérature vise donc à présenter les différentes notions théoriques en lien avec la conception des recouvrements miniers en milieu non saturé, l'évaluation de leur performance et leur surveillance sur le long terme. Dans un premier temps, les notions fondamentales en hydrogéologie des milieux saturé et non saturé sont rappelées. Ensuite, les différents types de recouvrements miniers utilisés comme barrière à infiltration d'eau sont décrits. Enfin, le principe théorique de la méthode ERT est présenté.

## 1.1 Notions fondamentales en hydrogéologie non saturée

### 1.1.1 Conductivité hydraulique saturée

En milieu poreux saturé, l'écoulement de l'eau est décrit par l'équation de Darcy (Darcy, 1856) souvent exprimée en fonction du débit spécifique  $q_{wl}$  [ $L^3T^{-1}L^{-2}$ ], qui correspond au taux d'écoulement d'eau par unité de surface (Woessner & Poeter, 2020) (1D):

$$q_{wl} = -k_{sat} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (1.1)$$

Avec  $k_{sat}$  la conductivité hydraulique saturée [ $LT^{-1}$ ];  $\Delta h$  la variation de la charge hydraulique [ $L$ ];  $\Delta z$  séparant les deux points de mesure de la charge hydraulique dans la direction  $z$  [ $L$ ]. Le terme  $\frac{\Delta h}{\Delta z}$  correspond au gradient hydraulique. L'eau se déplace des zones où le gradient hydraulique est élevé vers celui où il est plus faible (Hubbert, 1940).

Cette équation, applicable aux fluides incompressibles en régime laminaire (Hubbert, 1957), montre que l'écoulement de l'eau dépend à la fois du gradient de charge hydraulique et de la conductivité hydraulique saturée du milieu. La charge hydraulique  $h$ , est définie comme une énergie mécanique par unité de poids du fluide (Freeze & Cherry, 1979) et peut être décomposée en une hauteur gravitaire  $h_z$  [ $L$ ] et une hauteur de pression  $h_p$  [ $L$ ] :

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g} = h_z + h_p \quad (1.2)$$

Avec  $z$  l'élévation par rapport à un niveau de référence [ $L$ ];  $p$  la pression du fluide [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];  $\rho$  la masse volumique du fluide [ $ML^{-3}$ ] et  $g$  l'accélération gravitationnelle [ $LT^{-2}$ ].

La conductivité hydraulique saturée  $k_{sat}$  est caractérisée par la capacité d'un matériau poreux à laisser passer l'eau. Elle dépend des propriétés du fluide, de la distribution granulométrique des grains, de leur caractéristique (indice des vides, forme et agencement des grains) ainsi que de la présence éventuelle de gaz non dissous dans l'eau interstitielle (Taylor, 1948). Sa mesure

peut être réalisée soit sur le terrain via, entre autres, des essais d'infiltration au perméamètre de Guelph et des essais à simple et double anneaux (Dubuc, 2018; Lanoix, Pabst, & Aubertin, 2020), ou en laboratoire, selon les essais de perméabilité standardisés à charge constante ou variable (ASTM, 2006, 2016a) par exemple.

Pour des estimations rapides, des modèles prédictifs permettent d'évaluer  $k_{sat}$  à partir de propriétés géotechniques de base, ce qui est utile lors de la phase préliminaire d'un projet. De manière générale, le modèle de Kozeny-Carman Modifié (KCM), proposé par Mbonimpa, Aubertin, Chapuis, et Bussière (2002), est utilisé. Ce modèle prend en compte des paramètres d'entrée différents selon le type de sol. Les paramètres d'entrée pour les sols granulaires sont le diamètre des grains correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique  $D_{10}$  [L] et le coefficient d'uniformité  $C_U = D_{60}/D_{10}$  [-] :

$$k_{sat} = C_G \cdot \frac{\gamma_w}{\mu_w} \cdot \frac{e^{3+x}}{1+e} \cdot C_u^{1/3} \cdot D_{10}^2 \quad (1.3)$$

Avec  $\gamma_w$  le poids unitaire de l'eau [ $ML^{-2} T^{-2}$ ] ( $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$  à  $20^\circ\text{C}$ );  $\mu_w$  la viscosité dynamique de l'eau [ $ML^{-1} T^{-1}$ ] ( $\mu_w = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  à  $20^\circ\text{C}$ );  $e$  l'indice des vides du matériau [-];  $C_G$  le coefficient empirique utilisé pour les sols granulaires [-] généralement égal à 0.1 et  $x$  le paramètre prenant en compte la tortuosité du milieu (généralement égal à 2).

Pour les sols plastiques, il s'agit de la limite de liquidité  $w_L$  [-] et de la masse volumique des grains  $\rho_s$  [ $ML^{-3}$ ] :

$$k_{sat} = C_p \cdot \frac{\gamma_w}{\mu_w} \cdot \frac{e^{3+x}}{1+e} \cdot \frac{1}{\rho_s^2 \cdot w_L^{2 \cdot \chi}} \quad (1.4)$$

Avec  $C_p$  le coefficient empirique pour les sols plastiques (argiles majoritairement) [-] et  $\chi$  le paramètre empirique reflétant la compressibilité et la structure du sol [-].

### 1.1.2 Succion et capillarité

Les recouvrements se trouvent généralement dans la zone vadose, c'est-à-dire au-dessus de la nappe phréatique, où le sol n'est pas complètement saturé en eau. Dans cette zone, l'eau s'écoule à travers un milieu triphasique, composé d'une phase solide (les grains du sol), d'une phase liquide (l'eau interstitielle), et d'une phase gazeuse (l'air contenu dans les pores). Cette eau est soumise à une pression négative (ou succion) par rapport à la pression atmosphérique, prise comme référence (Woessner & Poeter, 2020). Les différentes zones dans un sol sont représentées à la Figure 1.1 et leurs caractéristiques principales sont récapitulées dans le Tableau 1.1.

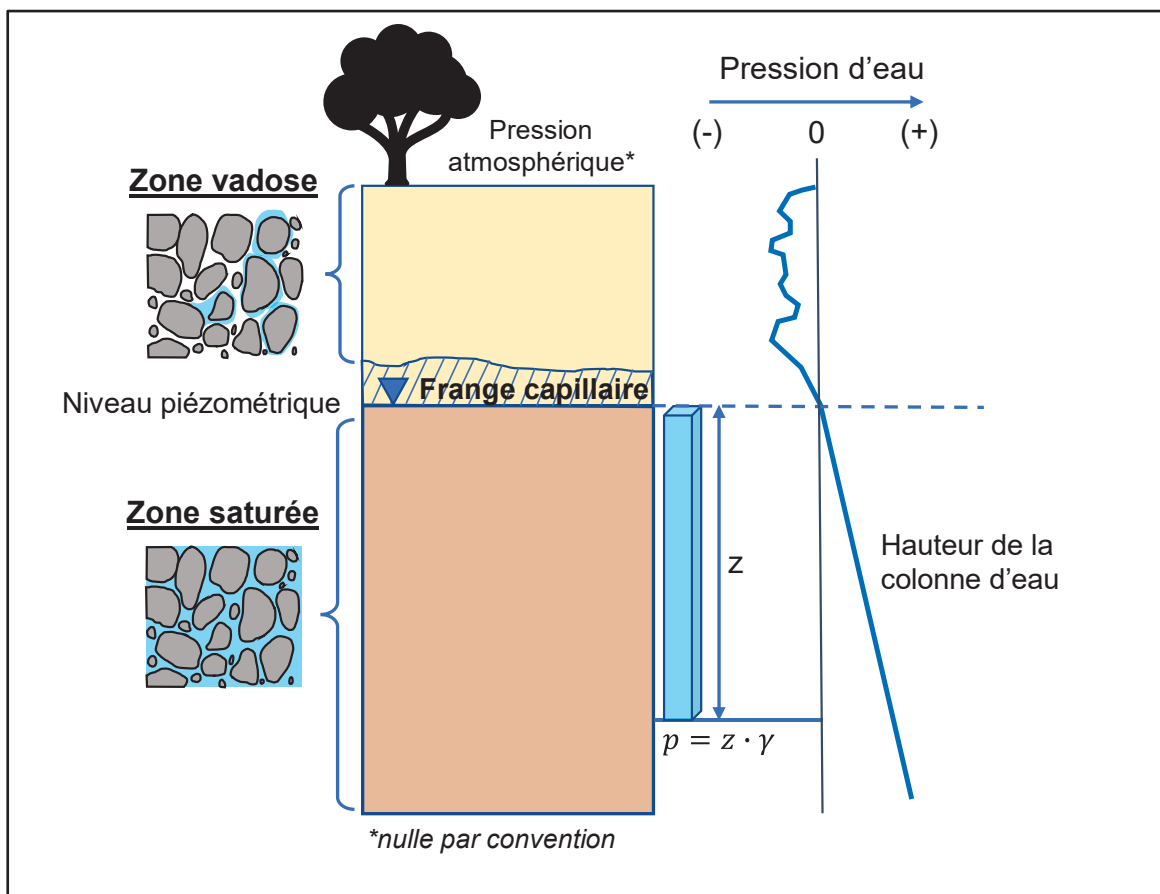


Figure 1.1 Représentation des différentes zones hydrogéologiques en subsurface (zone vadose, frange capillaire et zone saturée)  
Adaptée de Woessner et Poeter (2020)

Tableau 1.1 Caractéristiques principales des zones saturée et non saturée  
Adapté de Freeze et Cherry (1979)

<b>Zone saturée</b>	<b>Zone vadose (non saturée)</b>
Sous le niveau piézométrique	Au-dessus de la nappe phréatique
Pores complètement saturés en eau : $\theta = n$	Pores partiellement saturés en eau : $\theta < n$
Pression positive : $p > 0$	Pression négative (ou succion): $\psi < 0$
Conductivité hydraulique constante : $k = k_{sat}$	Conductivité hydraulique et teneur en eau fonctions de la succion : $\theta = \theta(\psi)$ et $k = k(\psi)$

Avec  $n$  la porosité du matériau [-]

Dans la zone vadose, la mise en mouvement de l'eau repose sur la présence d'un gradient de charge de succion, comparable au gradient de charge hydraulique en milieu saturé (Delage & Cui, 2000). La succion représente l'énergie nécessaire pour maintenir une particule d'eau en suspension au-dessus de la nappe, contre la gravité. Elle s'exprime selon deux composantes principales : la succion matricielle  $\psi$  et la succion osmotique  $\psi_\pi$ . La succion matricielle résulte principalement des interactions physiques à l'interface air-eau-solide responsables de la capillarité alors que la succion osmotique est liée à la concentration ionique de l'eau interstitielle. L'expression du potentiel total  $\psi_{tot}$  s'écrit (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012):

$$\psi_{tot} = \psi + \psi_\pi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1.5)$$

Avec  $u_a$  la pression d'air [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];  $u_w$  la pression d'eau [ $ML^{-1}T^{-2}$ ] et  $\pi$  le potentiel osmotique [ $ML^{-1}T^{-2}$ ].  $u_a$  et  $u_w$  sont usuellement exprimées en kPa.

Dans la majorité des cas, la succion osmotique reste faible comparée à la succion matricielle (aussi appelée succion capillaire) et peut être négligée (Fredlund et al., 2012). La succion capillaire devient alors la principale force motrice de l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé.

La charge de succion est définie par (Delage & Cui, 2000):

$$h = \frac{\psi}{\gamma_w} + z \quad (1.6)$$

Avec  $\psi$  la succion matricielle qui ne tient pas compte du potentiel osmotique [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ],  $\gamma_w$  le poids volumique de l'eau [ $\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}$ ] (9,81 kN/m<sup>3</sup> à 20 °C) et  $z$  l'élévation par rapport à un point de référence [L].

La succion matricielle étant directement liée à la capillarité, il est important de détailler ce phénomène. Dans un sol saturé, les molécules d'eau sont soumises à des forces identiques dans toutes les directions (cas (a) de la Figure 1.2). En revanche, une molécule d'eau située à l'interface eau-air subit des forces d'attraction plus importantes du côté de l'eau que de l'air (cas (b) de la Figure 1.2) (Delage & Cui, 2000). Cette molécule est malgré tout maintenue en équilibre par une tension de surface  $T_s$  [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ].

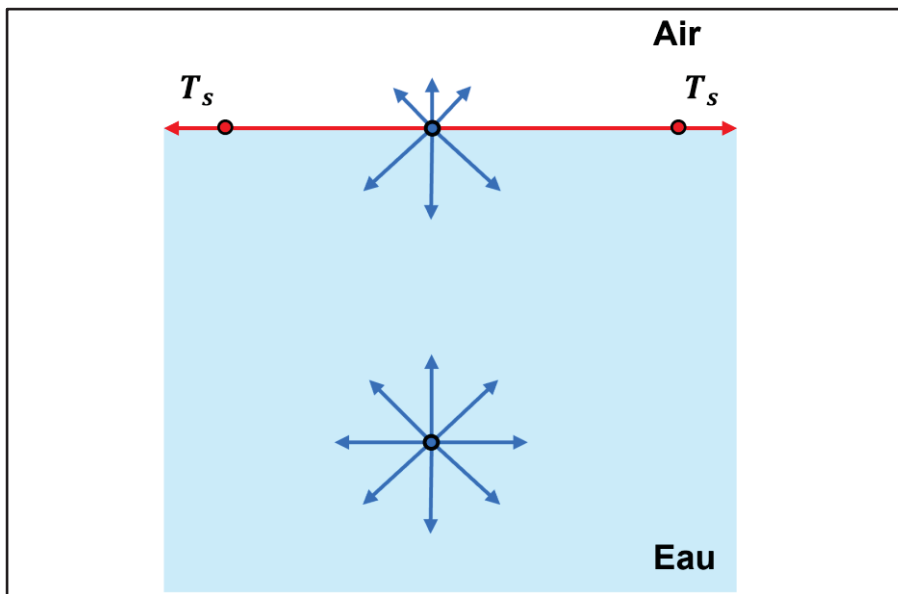


Figure 1.2 Apparition d'une tension  $T_s$  perpendiculaire à la surface libre à l'interface eau-air (cas d'une interface plane)  
Adaptée de Delage et Cui (2000)

En milieu non saturé, cette tension crée une courbure de la surface de l'eau, appelée ménisque (Figure 1.3). Cette courbure, combinée aux forces d'adhésion entre l'eau et les parois solides, est à l'origine de la remontée capillaire (Delage & Cui, 2000; Fredlund et al., 2012).

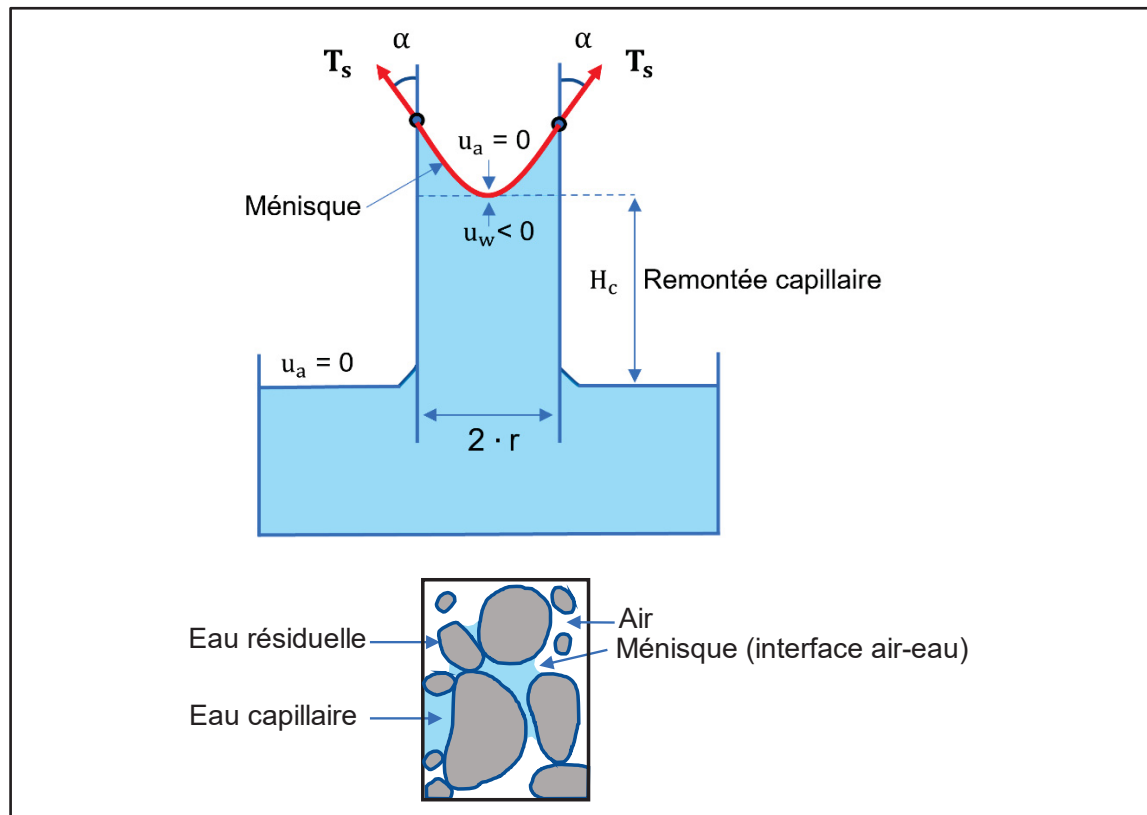


Figure 1.3 Représentation schématique de la remontée capillaire dans les pores d'un sol (un pore est équivalent à un tube cylindrique dans cette représentation)  
Adaptée de Delage et Cui (2000)

L'ampleur de la remontée capillaire  $H_c$  [L], fonction du rayon des pores  $r$  [L], peut être estimée par (Taylor, 1948):

$$H_c = \frac{2 \cdot T_s}{r \cdot \gamma_w} \quad (1.7)$$

Le Tableau 1.2 ci-dessous donne un ordre de grandeur de remontée capillaire pour différents types de sols, et suggère que plus le rayon des pores est petit, plus la succion est grande (remontée capillaire importante), ce qui explique que les sols fins retiennent davantage d'eau sous forme capillaire.

Tableau 1.2 Exemples de hauteur capillaire pour différents types de sols  
Tiré du cours de GNM1008 - Environnement minier et restauration de sites, Vincent  
Boulangier-Martel

Type de sol	H <sub>c</sub> (cm)
Gravier fin	2 - 10
Sable grossier	5 - 15
Sable fin	30 - 100
Silt	100 – 1 000
Argile	1 000 – 3 000

Enfin, d'autres facteurs influencent également le comportement capillaire dans un sol, comme la température qui affecte la valeur de  $T_s$  ou encore l'état du matériau selon qu'il est en phase de mouillage ou de drainage (Fredlund et al., 2012).

### 1.1.3 Équation de Richards

La caractérisation de manière quantitative de l'écoulement de l'eau en milieu non saturé peut être décrite mathématiquement par l'équation de Richards (Équation 1.9), développée à partir de l'équation de Darcy et de l'équation de conservation de la masse (Hillel, 2003b; Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\psi)}{\partial z} \quad (1.8)$$

Avec  $\theta_w$  la teneur en eau volumique [-],  $k_{x,y,z}$  la conductivité hydraulique [ $LT^{-1}$ ] selon les axes  $(x, y, z)$  dans un système de coordonnées cartésien qui est fonction de la succion matricielle  $\psi$ .

Cette équation est fortement non linéaire, car la succion, la teneur en eau et la conductivité hydraulique sont des variables interdépendantes. Une augmentation de la teneur en eau (ou du degré de saturation  $S_r$ ) élargit le rayon de courbure des ménisques, ce qui diminue la succion matricielle et donc la remontée capillaire. La gravité devient alors la force dominante, entraînant l'eau vers la nappe (Woessner & Poeter, 2020). De même, une augmentation de la teneur en eau engendre une diminution de la tortuosité du réseau poreux, ce qui augmente la conductivité hydraulique du milieu (Musy & Soutter, 1991). La Figure 1.4 illustre l'interdépendance des variables  $k$ ,  $\psi$  et  $S_r$  : plus la succion  $\psi$  augmente, plus l'air remplace progressivement l'eau dans les pores, et donc plus la conductivité hydraulique  $k$  diminue à mesure que le chemin d'écoulement devient de plus en plus tortueux.

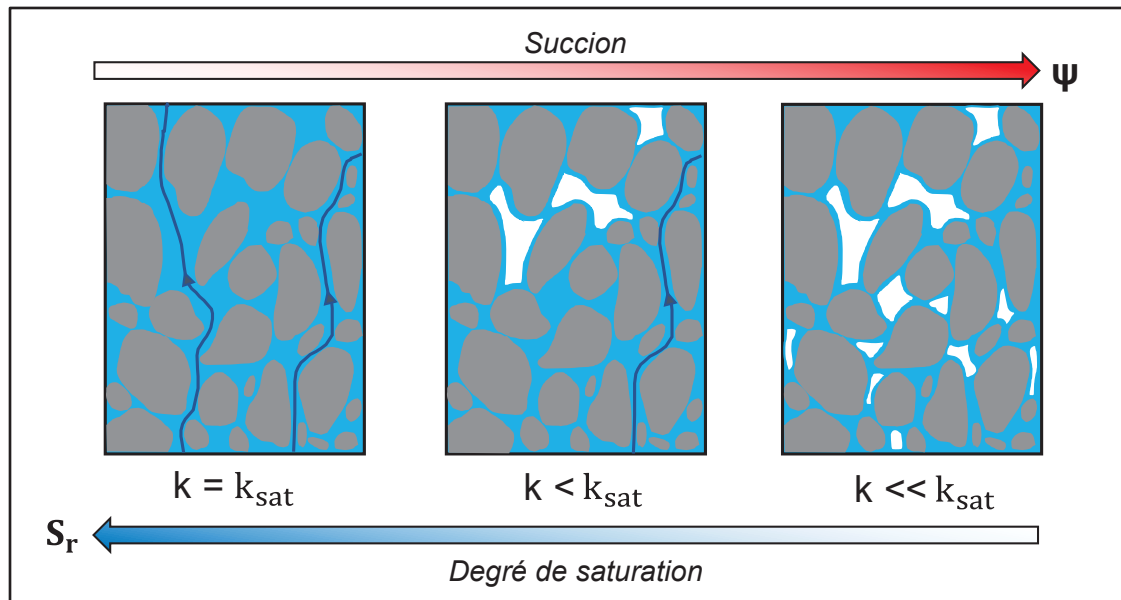


Figure 1.4 Interdépendance des paramètres hydrauliques

#### 1.1.4 Courbe de rétention d'eau et fonction de perméabilité

La résolution de l'équation de Richards nécessite une bonne connaissance des propriétés hydrauliques des matériaux. Ces propriétés sont décrites graphiquement par la courbe de rétention d'eau (CRE) et la fonction de perméabilité (Hillel, 2003a; Mbonimpa, Boulanger-Martel, Bussière, & Maqsooud, 2021). La CRE,  $\theta(\psi)$ , représentée à la Figure 1.5, traduit la capacité d'un sol à retenir l'eau selon la succion qui lui est appliquée. Les valeurs importantes de cette courbe sont l'AEV (*Air Entry Value*, valeur d'entrée d'air), la WEV (*Water Entry Value*, valeur d'entrée d'eau), la teneur en eau à saturation ( $\theta_s$ ) et la teneur en eau résiduelle ( $\theta_r$ ) qui est liée à l'adsorption de l'eau aux grains. L'AEV est la succion  $\psi_a$  à partir de laquelle les plus gros pores du sol commencent à se vider. La WEV a une signification différente selon la phase de mouillage ou de drainage. En drainage, il s'agit de la succion  $\psi_r$  à partir de laquelle les conditions résiduelles sont atteintes. Autrement dit, peu importe la valeur de succion appliquée, une petite partie de l'eau restera toujours « prisonnière » à la surface des grains en raison des forces d'adsorption, et ne sera donc pas drainée. En mouillage, cette valeur correspond au seuil à partir duquel l'eau commence à entrer dans les pores. À noter que les AEV et WEV sont déterminées graphiquement en utilisant la méthode des tangentes (Fredlund & Xing, 1994).

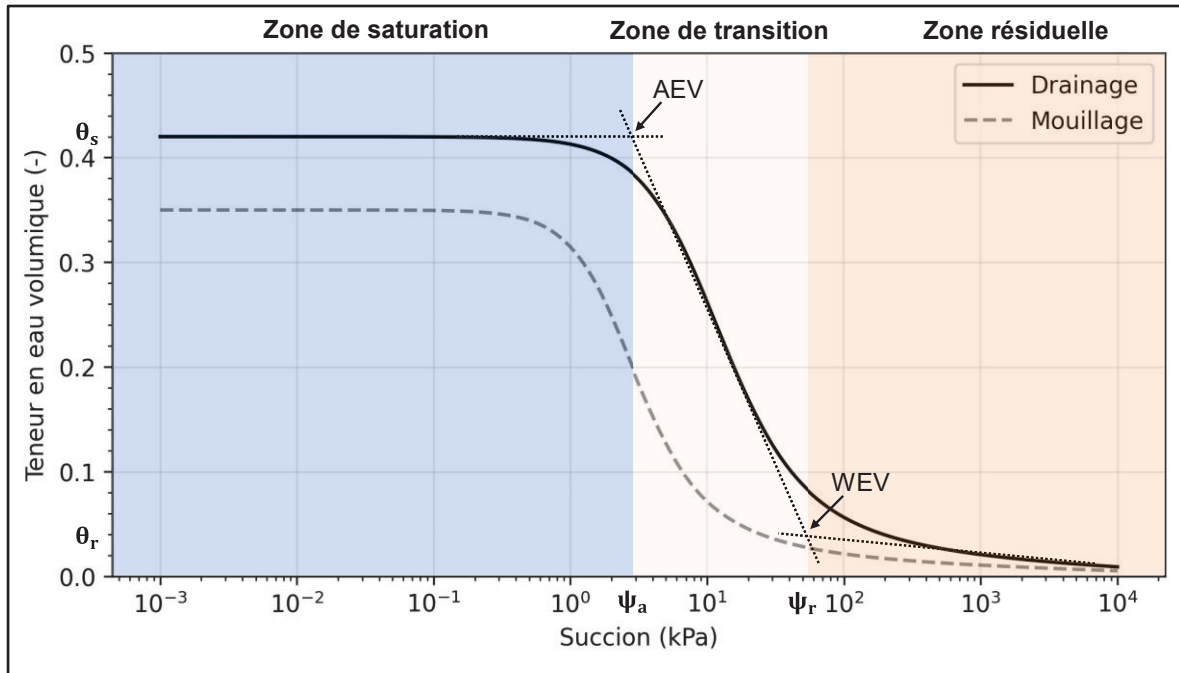


Figure 1.5 Représentation schématique de la CRE pour un même matériau lors du premier cycle de drainage/mouillage  
Adaptée de Mbonimpa et al. (2021)

Comme illustré à la Figure 1.5, la CRE n'est pas unique pour un matériau donné. Le premier cycle de drainage–mouillage produit deux courbes appelées courbe limite en drainage et courbe limite en mouillage. La courbe limite en drainage, obtenue une seule fois à cause de l'air qui reste emprisonné dans les pores après le premier drainage, est la limite supérieure alors que la courbe limite en mouillage définit la frontière inférieure. Entre ces courbes limites, découlent des courbes principales qui elles-mêmes génèrent des courbes primaires et enfin secondaires (Pham, Fredlund, & Barbour, 2005). La non unicité de la relation  $\theta(\psi)$ , appelée hystérésis, se manifeste par une teneur en eau plus élevée en drainage qu'en mouillage pour une même succion. Les causes prépondérantes, schématisées à la Figure 1.6, (Delage & Cui, 2000; Hillel, 2003a; Maqsood, Bussière, Aubertin, & Mbonimpa, 2012) sont : l'effet bouteille d'encre, d u à la géométrie des pores (gros pores reliés par des petits goulots) et la différence d'angle de contact entre les phases de mouillage et de drainage, modifiant la courbure du ménisque et donc la succion matricielle.

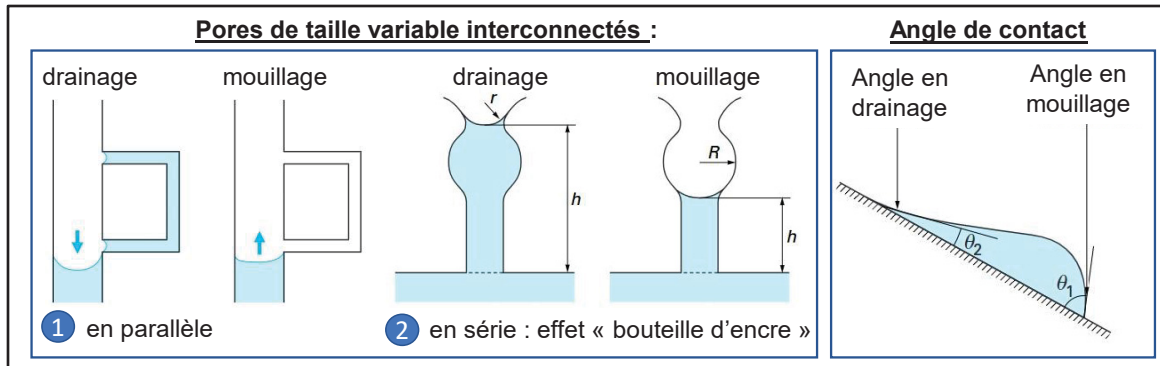


Figure 1.6 Causes principales de l'hystérésis : effet bouteille d'encre et angle de contact  
Adaptée de Delage et Cui (2000)

Il existe plusieurs façons d'obtenir une courbe de rétention d'eau (CRE), que ce soit en laboratoire ou sur le terrain. En laboratoire, les approches sont variables selon la granulométrie des matériaux et la plage de succion visée. Pour des valeurs de succion comprises entre 0 et 1500 kPa, plage typique des silts et des résidus miniers, la méthode standard Tempe Cell (ASTM, 2025) est utilisée. Les principaux modèles mathématiques qui décrivent la CRE à partir de données expérimentales sont : Gardner (1958); Brooks et Corey (1964); van Genuchten (1980) et Fredlund et Xing (1994). Le modèle de van Genuchten (1980) a l'avantage d'être applicable à des sols de granulométries variées, allant des sols fins comme les argiles limoneux (van Genuchten, 1980) à des sols grossiers comme les stériles miniers (Kalonji Kabambi, Bussière, & Demers, 2017; Peregoedova, 2012):

$$\theta_w = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha_v \cdot \psi)^{n_v}]^{m_v}} \quad (1.9)$$

Avec  $\theta_w$  la teneur en eau volumique [-];  $\theta_s$  la teneur en eau volumique à saturation [-];  $\theta_r$  la teneur en eau volumique résiduelle [-];  $\alpha_v$  le paramètre du modèle dont la valeur correspond approximativement à l'inverse de l'AEV [ $L^{-1}$ ];  $n_v$  une constante d'ajustement liée à la pente de désaturation une fois l'AEV atteinte [-] et  $m_v$  une constante liée aux conditions résiduelles [-].

Sur le terrain, la CRE peut être reconstituée en combinant des mesures simultanées de succion et de teneur en eau volumique effectuées au même emplacement (Bussière et al., 2021; Mbonimpa et al., 2021). La succion matricielle peut être mesurée à l'aide de tensiomètres pour les faibles succions (Marinho, Take, & Tarantino, 2008), dont le principe repose sur l'enregistrement de la différence de pression à travers une plaque céramique poreuse d'AEV élevée. Dans le cadre du recouvrement expérimental de ce projet, la succion matricielle est mesurée à l'aide de capteurs de potentiel hydrique de type *Watermark* et *TEROS 21* (METERGroup), lesquels couvrent une plage de mesures allant d'environ -9 à -2 000 kPa, avec une résolution d'environ 0,1 kPa pour les faibles succions (< 100 kPa).

La teneur en eau volumique est obtenue indirectement à l'aide de sondes diélectriques TDR (*Time Domain Reflectometry*) (D. Robinson, Schaap, Or, & Jones, 2005; Topp, Davis, & Annan, 1980) ou FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) (Dean, Bell, & Baty, 1987; Yoshikawa & Overduin, 2005), telles que les sondes *TEROS 12* (METERGroup) également utilisées dans ce projet pour la surveillance du recouvrement. Ces capteurs mesurent la permittivité électrique du sol, soit par le temps de propagation d'une impulsion électromagnétique (TDR), soit par la période de charge du milieu (FDR). La permittivité électrique mesurée est ensuite convertie en teneur en eau via une relation pétrophysique, comme l'équation empirique de Topp et al. (1980) utilisée pour les sondes *TEROS 12*. Le volume d'investigation de ces sondes est d'environ 1 L, et leur précision est de l'ordre de  $\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$  après calibration.

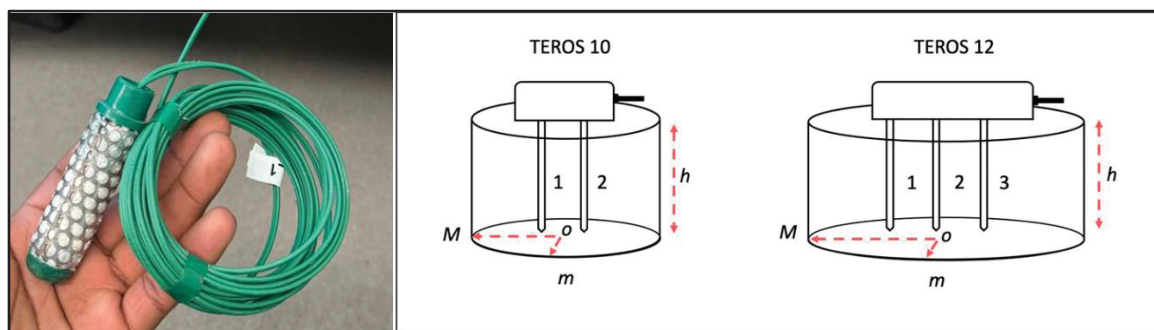


Figure 1.7 Exemple d'un capteur de potentiel hydrique *Watermark* (à gauche) et schématisation de sondes diélectriques *TEROS* (à droite)

Adaptée de Cominelli, Rivera, Brown, Ochsner, et Patignani (2024)

La calibration consiste à comparer les teneurs en eau mesurées indirectement par les sondes diélectriques à des teneurs en eau déterminées par la méthode gravimétrique (ASTM, 2019), puis à établir une relation empirique (linéaire ou polynomial) permettant d'ajuster les mesures. Plusieurs travaux ont montré que cette étape est indispensable, en particulier pour les sols à forte conductivité interstitielle (eau salée) ou contenant une proportion significative de particules argileuses, dont la conduction de surface atténue le signal TDR (Jacobsen & Schjønning, 1993; Zegelin, White I., & Russell, 1992). Dans le cas des rejets miniers riches en minéraux sulfurés générateurs d'acidité, les sondes TDR donnent systématiquement des teneurs en eau plus élevées que celles obtenues par la méthode gravimétrique, ce qui conduit à une surestimation de l'efficacité des recouvrements à barrière d'oxygène (Maqsoud, Gervais, Bussière, & Le Borgne, 2017).

Ces méthodes directes d'obtention de la CRE peuvent parfois être longues à mettre en œuvre. Des modèles prédictifs ont donc été développés afin d'obtenir plus rapidement un aperçu du comportement des sols en milieu non saturé. Le modèle prédictif de Kovacs modifié (MK) (Aubertin, Mbonimpa, Bussière, & Chapuis, 2003), utilisé dans ce projet, repose sur des propriétés géotechniques de base telles que le diamètre  $D_{10}$ , le coefficient d'uniformité  $C_u$ , la porosité  $n$  et la limite de liquidité  $w_L$ , et s'applique à des tailles de particule allant des matériaux fins pulvérulents ou cohésifs à des sables grossiers. L'hypothèse prépondérante de ce modèle est que la saturation totale d'un sol non saturé résulte à la fois de la saturation capillaire, dominée par les forces capillaires dans les pores, notée  $S_c$  [-] et la saturation d'adhésion, liée aux forces d'adhésion entre l'eau et la surface des grains, notée  $S_a$  [-] (Kovács, 1981).

La saturation totale  $S_r$  est exprimée selon (Aubertin et al., 2003):

$$S_r = \frac{\theta_w}{n} = 1 - (1 - S_c) \cdot (1 - S_a) \quad (1.10)$$

Avec  $\theta_w$  la teneur en eau volumique [-],  $n$  la porosité totale du milieu poreux [-] et  $\langle y \rangle = 0.5 (y + |y|)$  les parenthèses de Macaulay.

La saturation capillaire  $S_c$  est une fonction de la distribution statistique de la taille des pores :

$$S_c = 1 - \left[ \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \cdot \exp \left[ -m \cdot \left( \frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (1.11)$$

Avec  $h_{co}$  la hauteur de la remontée capillaire [L];  $\psi$  la succion matricielle [L]; et  $m = \frac{1}{C_u}$ , le paramètre associé à la distribution de la taille des pores pour les matériaux granulaires [-]. La remontée capillaire  $h_{co}$  est estimée à partir d'une relation empirique dérivée de la loi capillaire, adaptée par Aubertin et al. (2003) :

$$h_{co} = \frac{0,75}{e \cdot D_{10} \cdot [1 + 1,17 \cdot \log(C_u)]} \quad (1.12)$$

La saturation d'adhésion  $S_a$  est liée aux forces d'attraction électrostatiques entre la surface des grains et les molécules bipolaires de l'eau. Ces forces contribuent à l'apparition d'une fine pellicule d'eau autour des particules solides :

$$S_a = a_c \cdot C(\psi) \cdot \left[ \frac{\left( \frac{h_{co}}{\psi_n} \right)^{2/3}}{e^{1/3} \cdot \left( \frac{\psi}{\psi_n} \right)^{1/6}} \right] \quad (1.13)$$

Avec  $a_c$  le coefficient d'adhésion [-],  $C(\psi)$  le paramètre d'équilibre thermodynamique de Fredlund et Xing (1994) pour la valeur résiduelle [-] ;  $\psi_n$  la valeur normative de succion [L], généralement  $\psi_n = 1$  cm et  $e$  l'indice des vides [-].

La fonction d'équilibre thermodynamique est donnée par :

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{\psi_0}{\psi_r} \right)} \quad (1.14)$$

Avec  $\psi_0 = 10^7$  cm correspondant à la succion d'un sol à l'état sec [L] et  $\psi_r$  la succion résiduelle [L] calculée par :

$$\psi_r = 0,86 \cdot h_{co}^{1.2} \quad (1.15)$$

La seconde variable qui apparaît dans l'équation de Richards est la fonction de perméabilité, notée  $k(\psi)$ , qui représente la variation de la conductivité hydraulique avec la succion.

La détermination expérimentale de la conductivité hydraulique en conditions non saturées est plus complexe qu'en milieu saturé, car elle varie selon la succion (Fredlund et al., 2012). Dans la majorité des cas, la fonction de perméabilité est donc déduite, de manière indirecte, à partir de la CRE et de la valeur de  $k_{sat}$  en utilisant des expressions mathématiques. Les équations de Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980), Mualem (1976), Fredlund et Xing (1994) sont des exemples de modèles mathématiques utilisés pour déduire la fonction de perméabilité.

Dans ce projet, l'équation de van Genuchten (1980) ci-dessous a été utilisée dont les paramètres ont déjà été définis plus haut :

$$k(\psi) = k_{sat} \cdot \frac{\{1 - (\alpha_v \cdot \psi)^{n_v-1} \cdot [1 + (\alpha_v \cdot \psi)^{n_v}]^{-m_v}\}^2}{[1 + (\alpha_v \cdot \psi)^{n_v}]^{m_v/2}} \quad (1.16)$$

## 1.2 Notions en restauration minière

### 1.2.1 Drainage minier contaminé

Le choix des recouvrements miniers visant à limiter la production de DMC dépend principalement de la nature des résidus. Les résidus contiennent, de manière très simplifiée, trois types de minéraux: ceux qui ont le potentiel d'acidifier les eaux de drainage (e.g. sulfures), ceux qui ont la capacité de neutraliser l'acidité produite (e.g. carbonates, silicates) et enfin ceux qui sont pratiquement inertes (e.g. quartz). Le pH des eaux de drainage résulte alors de l'équilibre entre les pouvoirs acidifiant et neutralisant de ces minéraux. Il existe trois types de DMC, classés en fonction du pH des eaux de drainage (INAP, 2009; Nordstrom, Blowes, & Ptacek, 2015; Plante et al., 2021) dont les caractéristiques principales sont récapitulées à la Figure 1.8: le drainage minier acide (DMA) caractérisé par un pH inférieur 6, le drainage minier neutre (DMN) avec un pH compris entre 6 et 9 et le drainage minier alcalin ou basique (DMB) dont le pH est situé entre 9 et 12.

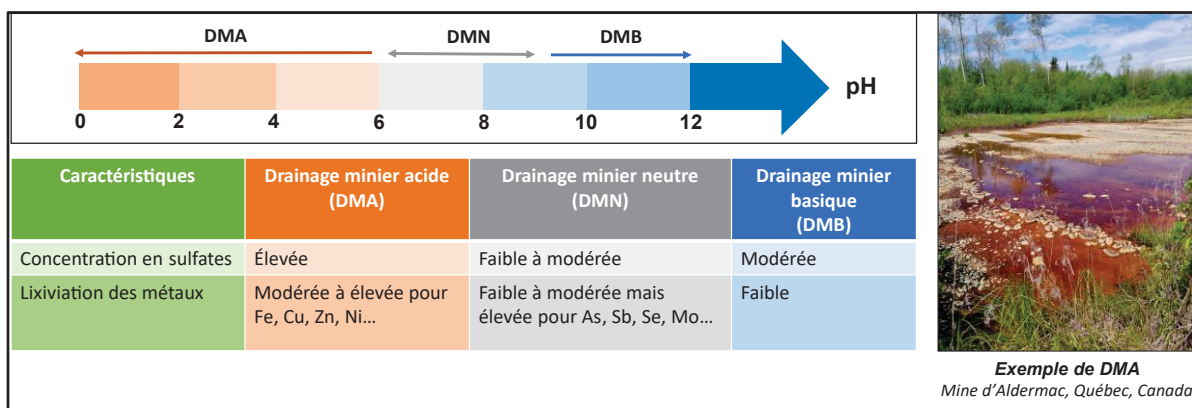


Figure 1.8 Récapitulatif des trois types de DMC  
Adaptée de INAP (2009)

Dans ce projet, les résidus à isoler de l'environnement sont des résidus de bauxite. Contrairement aux résidus sulfurés générateurs de DMA, les résidus de bauxite ne contiennent pas de sulfures. Il s'agit de sous-produits du procédé Bayer, au cours duquel l'alumine est extraite à l'aide de soude caustique. Ces résidus sont donc constitués d'un mélange d'oxydes,

principalement de fer (sous forme d'hématite, responsable de leur couleur rouge), d'aluminium, de silicium et de soude caustique résiduelle issue du procédé (G. Power, Gräfe, & Klauber, 2011; Rio Tinto, 2024). Leur potentiel de contamination provient de la mise en solution d'oxydes métalliques et d'hydroxyde de sodium au contact de l'eau, contribuant à la génération de drainage minier basique (DMB).

Les sections suivantes se concentrent donc exclusivement sur la conception de recouvrements destinés à limiter l'infiltration de l'eau de pluie, principal facteur de génération de DMB dans les résidus de bauxite.

### 1.2.2 Principaux systèmes de recouvrements

Les recouvrements sont considérés comme les méthodes les plus pertinentes pour la restauration des sites miniers métallifères (Bussière & Guittonny, 2021a). Ils permettent de limiter l'action d'un ou plusieurs réactifs responsables de la génération de DMC en s'appuyant sur différents processus physico-chimiques. Plusieurs types de recouvrements existent, chacun visant à contrôler un ou plusieurs réactifs générateurs de DMC. Certains recouvrements ont pour objectif de limiter l'infiltration d'eau, comme les recouvrements à faible conductivité hydraulique saturée (Low Saturated Hydraulic Conductivity Cover, LSHCC) et les recouvrements évapo-transpirants (Store-and-Release Cover, SRC) (Bussière & Wilson, 2021; Maqoud, Bussière, & Mbonimpa, 2021). D'autres types de recouvrements visent à limiter la diffusion de l'oxygène, tels que les recouvrements hydriques (*Water Covers*, WC), les CEBC ou les recouvrements à nappe phréatique surélevée (*Elevated Water Table*, EWT) (Awoh, Mbonimpa, & Bussière, 2021; Demers & Pabst, 2021b; Pabst, 2021). Il existe également des recouvrements insulaires, utilisés dans des climats arctiques, pour contrôler la température des résidus miniers (Boulangier-Martel, Bussière, & Côté, 2021).

Dans cette section, les recouvrements à barrière d'infiltration d'eau sont abordés plus en détails, car c'est l'un des réactifs problématiques ciblés par ce projet. Les recouvrements à barrière d'infiltration d'eau reposent sur les principes d'écoulement de l'eau dans les

géomatériaux en milieu non saturé. Le but est de limiter l'infiltration d'eau vers les résidus et de contrôler les interactions entre l'eau et les minéraux, qui peuvent conduire à la formation de DMC. La LSHCC est un recouvrement constitué d'une ou plusieurs couches dont l'élément central est une barrière hydraulique caractérisée par un matériau à très faible conductivité hydraulique saturée ( $k_{\text{sat}} < 10^{-9}$  m/s). Cette faible perméabilité permet de ralentir significativement l'infiltration de l'eau vers les couches sous-jacentes. Différents matériaux peuvent être utilisés pour cette couche, que ce soit des matériaux naturels (argile, silt), ou synthétiques (géomembranes, géosynthétiques bentonitiques composés d'une couche de bentonite encadrée par des géotextiles) (Maqsood et al., 2021). Initialement développés pour les sites d'enfouissement de déchets domestiques, ces recouvrements ont été adaptés au contexte minier, notamment pour des parcs à résidus au Québec comme celui d'Aldermac où la barrière hydraulique est une géomembrane (Maqsood, Mbonimpa, Bussière, Benzaazoua, & Dionne, 2015; Rarison, Mbonimpa, Bussière, Turcotte, & Pouliot, 2023).

La SRC, davantage adaptée aux régions arides ou semi-arides, est composée de deux couches, une couche de matériau fin qui assure la rétention temporaire de l'eau, reposant sur une couche de matériau grossier. Cette disposition crée un effet de barrière capillaire détaillé dans la section suivante. L'objectif de la SRC est que l'eau infiltrée soit stockée temporairement dans la couche fine, puis évacuée par évapotranspiration avant que sa capacité de stockage maximale ne soit atteinte. Si cette capacité est dépassée (lorsque la pression à l'interface atteint la WEV du matériau grossier), une percolation dans le matériau grossier peut se produire (Bussière & Wilson, 2021).

Dans les recouvrements visant à limiter la diffusion de l'oxygène, les CEBCs sont très efficaces, surtout dans les régions au climat humide comme le Québec. Pour qu'une CBEC soit fonctionnelle, elle doit garantir un degré de saturation suffisamment élevé dans la couche de rétention d'eau (habituellement supérieur à 85%) (Demers & Pabst, 2021b). Ce type de recouvrement a été mis en œuvre à grande échelle sur plusieurs sites miniers abandonnés ou en fin d'opération au Québec, comme sur les sites Lorraine au Témiscamingue (Bussière et al., 2015; Dagenais, Aubertin, Bussière, & Cyr, 2005) et LTA Malartic (Bussière et al., 2003; Dagenais, Aubertin, Bussière, & Martin, 2005).

Dans cette étude, la CEBC inclinée a été utilisée pour limiter l'infiltration de l'eau. La section suivante détaille le principe général d'une CEBC, la structure et le rôle des différentes couches, ainsi que l'effet de la pente sur la déviation latérale de l'eau et les paramètres de conception influençant sa performance.

### 1.2.3 La CEBC

La CEBC est un recouvrement multicouche composé de matériaux de granulométries différentes. Le contraste des propriétés hydrogéologiques entre les différentes couches du recouvrement en pente crée un effet de barrière capillaire qui limite l'infiltration de l'eau vers les résidus (Aubertin et al., 2015; Bussière, 1999; Demers & Pabst, 2021b; Morel-Seytoux, 1992). Cet effet apparaît lorsqu'une couche de matériau fin (AEV élevée,  $k_{sat}$  faible) est placée au-dessus d'un matériau plus grossier (AEV faible,  $k_{sat}$  élevée) (Mbonimpa et al., 2021).

Les contrastes des courbes de rétention d'eau  $\theta(\psi)$  et de fonctions de perméabilité  $k(\psi)$ , dont un exemple pour le silt et le gravier est présenté à la Figure 1.9, expliquent ce comportement. En milieu saturé, les matériaux granulaires grossiers (ex : sable, gravier) présentent une conductivité hydraulique beaucoup plus élevée que les matériaux fins (ex : silt, argile). En revanche, lorsque le milieu se désature, c'est-à-dire que l'air remplace progressivement l'eau dans les pores, la tendance s'inverse : un matériau grossier se draine très rapidement, ce qui entraîne une chute brutale de sa conductivité hydraulique pour de faibles succions. Le matériau fin, au contraire, conserve une capacité de rétention élevée et ne se désature qu'à des succions plus importantes (Figure 1.9). C'est précisément ce contraste qui maintient l'eau dans la couche fine et crée l'effet de barrière capillaire.

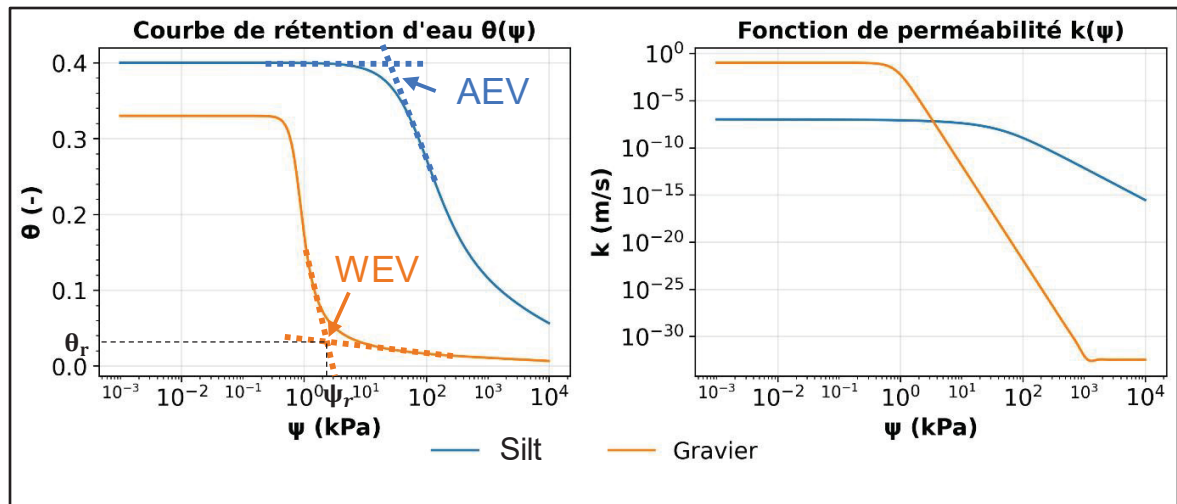


Figure 1.9 Comparaison des courbes  $\theta(\psi)$  et  $k(\psi)$  entre un gravier et un silt

En pratique, pour que l'effet de barrière capillaire soit efficace, deux conditions doivent être satisfaites. D'une part, l'AEV du matériau fin doit être supérieure à la succion résiduelle du matériau grossier, et, d'autre part, une différence de conductivité hydraulique saturée d'au moins trois ordres de grandeur doit idéalement être respectée entre les deux couches (Aubertin, 1995). La juxtaposition de plusieurs matériaux fins et grossiers limite aussi les flux d'eau ascendants des résidus vers le recouvrement. Lorsqu'un matériau grossier se retrouve au-dessus d'un matériau fin, la remontée capillaire est interrompue, ce qui protège la couche fine contre la désaturation et empêche la remontée d'eau contaminée. Le même principe est utilisé dans les recouvrements à nappe surélevée (Dagenais, Aubertin, Bussière, & Martin, 2005; Ouangrawa, Aubertin, Molson, Zagury, & Bussière, 2005; Ouangrawa, Molson, Aubertin, Bussière, & Zagury, 2009; Pabst, 2021).

La configuration type d'une CEBC comprend habituellement entre trois et cinq couches, jouant chacune un ou plusieurs rôles (Figure 1.10) (Aubertin et al., 2015; Demers & Pabst, 2021b). À noter que toutes les épaisseurs et les conductivités hydrauliques à saturation types des couches sont mentionnées à la Figure 1.10. Les deux premières couches en partant de la surface, souvent combinées, assurent la protection contre l'érosion (vent, pluie), les intrusions biologiques (racines, animaux fouisseurs) et les activités anthropiques (camions, VTT, etc). La couche végétale supérieure favorise la croissance de la végétation. La couche de protection sous-

jacente est faite de matériaux grossiers (gravier, roches concassées etc.). Elle limite les effets climatiques (cycles de gel/dégel) et protège les couches internes du recouvrement. Le cœur du recouvrement est constitué d'une couche de rétention d'eau encadrée par deux couches de bris capillaire (Aubertin, 1995). La couche de bris capillaire supérieure est constituée d'un matériau grossier à  $k_{sat}$  élevée et AEV faible qui facilite le drainage latéral et interrompt les flux ascendants par capillarité. La couche de rétention d'eau agit comme principale barrière à l'infiltration. Les matériaux utilisés sont des sols fins (souvent du silt) ayant une AEV élevée (supérieure à la WEV de la couche inférieure) et un  $k_{sat}$  faible. Enfin la couche de bris capillaire inférieure, directement posée sur les résidus, possède les mêmes caractéristiques que la couche de bris capillaire supérieure. Celle-ci permet d'éviter la désaturation de la couche de rétention par le bas, limite les remontées capillaires et empêche une potentielle migration de contaminants provenant des résidus. Elle joue aussi un rôle structurel, en servant de support pour la mise en place des couches supérieures. En effet, les résidus ont généralement une faible capacité portante (Bussière, 2007) qui rend difficile la circulation de machinerie lourde.

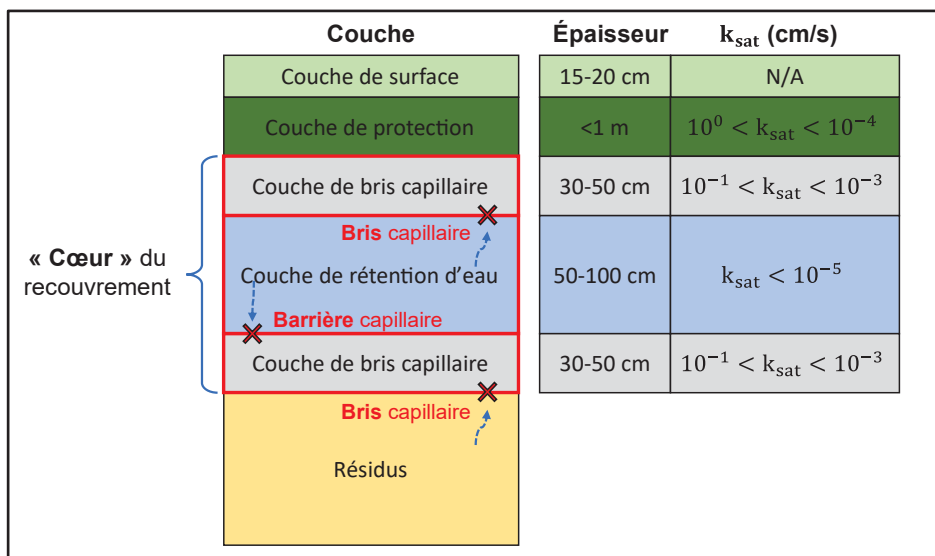


Figure 1.10 Structure typique d'une CEBC avec mise en évidence des effets de barrière capillaires dans le « cœur » du recouvrement  
Adaptée de Demers et Pabst (2021b)

Une CEBC inclinée favorise le drainage latéral, jusqu'à une limite appelée distance d'infiltration maximale de la pente (DDL, *Down Dip Limit*), à partir de laquelle une infiltration de l'eau dans la couche sous-jacente a lieu. Cette limite est représentée par un cercle rouge sur la Figure 1.11. L'écoulement latéral entre le sommet de la pente et le DDL correspond à la capacité de déviation de la barrière capillaire (Bussière, 1999; Ross, 1990). La longueur effective, définie comme la distance horizontale entre le sommet de la pente et le DDL, augmente avec l'inclinaison de la pente (Bussière et al., 2003; Demers & Pabst, 2021b): plus la pente est importante, plus l'eau a tendance à être déviée latéralement.

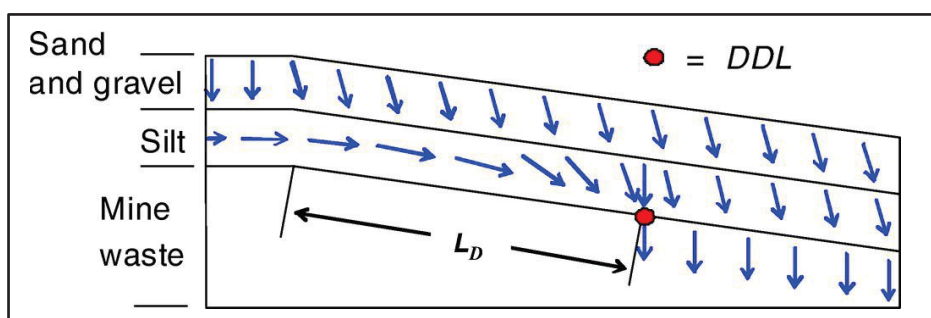


Figure 1.11 Représentation schématique de l'écoulement de l'eau dans un recouvrement incliné  
Tirée de Aubertin et al. (2009)

Des analyses de sensibilité numérique (Mbonimpa, Cissokho, Bussière, Maqoud, & Aubertin, 2008) montrent que les facteurs qui influencent la performance d'un recouvrement incliné sont l'angle d'inclinaison, et les propriétés de la couche de rétention d'eau (plus  $k_{sat}$  est faible moins elle se désature). En revanche, il a été montré que la longueur de la pente n'a pas d'impact significatif. De manière générale, les facteurs qui influencent la performance d'une CEBC sont la granulométrie des matériaux (Aubertin, Bussière, & Chapuis, 1996; Woysner & Yanful, 1995), les conditions du site (e.g. niveau de nappe, précipitations) (Weeks & Wilson, 2005), la contamination antérieure des matériaux (e.g. sites miniers abandonnés) (Bussière et al., 2006) et la végétation (Bussière & Guittonny, 2021b).

#### 1.2.4 Modélisation numérique des systèmes de recouvrement

La modélisation du comportement hydrogéologique des recouvrements en milieu non saturé repose sur la résolution numérique de l'équation de Richards. Plusieurs logiciels sont utilisés pour des applications diverses en hydrogéologie des milieux non saturés, tels que FEFLOW (Ramasamy, Power, & Mkandawire, 2018), PFLOTRAN (Hammond, Lichtner, & Mills, 2014; Lichtner et al., 2015), HydroGeoSphere (Brunner & Simmons, 2011), MODFLOW (Brunner, Simmons, Cook, & Therrien, 2010), HYDRUS (Karandish & Šimůnek, 2018; Radcliffe & Simunek, 2018) et SEEP/W (Geostudio, 2022). Parmi ces logiciels, SEEP/W est largement utilisé en restauration minière pour simuler le comportement hydrogéologique des recouvrements et prédire leur performance sur le long terme. De manière générale, la fiabilité de ce logiciel a été évaluée comparativement à d'autres codes numériques par Chapuis, Chenaf, Bussière, Aubertin, et Crespo (2001) et Chapuis (2009) au moyen de tests analytiques en conditions saturées et non saturées. Dans un contexte minier, SEEP/W a montré de bonnes corrélations entre les résultats simulés et les mesures effectuées au laboratoire ou sur le terrain (Aubertin et al., 2009; Bussière et al., 2003). À titre d'exemple, il a été employé pour évaluer le comportement d'un recouvrement monocouche incliné, constitué de sable compacté recouvert de stériles concassés, dont le but est de réduire l'infiltration de l'eau dans une halde à stérile réactive en induisant un effet de barrière capillaire (Dubuc, 2018). Il a également servi à analyser l'influence des changements climatiques ainsi que le rôle de la végétation sur la performance à long terme d'une CEBC dans un parc à résidus abandonné au Québec (Botula, Bussière, Guittonny, & Hotton, 2024; Hotton, 2019). Costa Silva (2024) l'a utilisé pour modéliser le comportement hydrogéologique de deux systèmes de recouvrement expérimentaux, en comparant les simulations aux observations de terrain.

SEEP/W simule le mouvement de l'eau (liquide et vapeur) dans des milieux poreux saturés et non saturés à l'aide de la méthode des éléments finis (Bathe, 2006; Zienkiewicz, 1989). La résolution repose sur trois étapes principales: la discrétisation du domaine, la définition des propriétés des matériaux qui repose sur les fonctions  $\theta(\psi)$  et  $k(\psi)$ , et la spécification des conditions aux limites. Plusieurs modèles empiriques sont couramment utilisés dans SEEP/w

pour décrire les courbes de rétention d'eau et les fonctions de perméabilité non saturée, notamment les modèles de van Genuchten (1980), de Fredlund et Xing (1994) et de Kovacs modifié (Aubertin et al., 2003). La fonction de perméabilité non saturée peut être obtenue à partir de la CRE et de la valeur de  $k_{\text{sat}}$  en utilisant le modèle de Fredlund et Xing (1994) ou celui de Mualem (1976), pour lequel van Genuchten (1980) a proposé une solution analytique. Le logiciel propose également des courbes types pour différents matériaux, allant de l'argile au gravier, mais permet aussi à l'utilisateur d'intégrer ses propres données expérimentales issues d'essais en laboratoire ou de mesures de terrain.

Concernant les conditions aux limites, SEEP/W permet de définir divers types de conditions, notamment des flux imposés, des charges hydrauliques, des pressions nulles ou des limites imperméables. Une particularité importante du logiciel est sa capacité à simuler les interactions entre le sol, la végétation et l'atmosphère grâce à la condition limite d'interaction sol-climat (Land Climate Interaction, LCI). Celle-ci intègre des phénomènes tels que l'évaporation, les précipitations, la couverture neigeuse et l'effet de la végétation, permettant ainsi de calculer de manière réaliste le bilan hydrique d'un recouvrement (Botula et al., 2024; Jalabert, 2024). Enfin, la calibration du modèle constitue une étape essentielle pour obtenir des simulations fiables. Dans le cas des CEBC, elle porte surtout sur les courbes de rétention d'eau, la conductivité hydraulique saturée et les paramètres climatiques imposés en surface. La démarche consiste généralement à comparer les résultats simulés avec des observations de terrain, comme les profils de succion, les teneurs en eau, les pressions interstitielles ou encore les flux mesurés, et à réduire l'écart par ajustement des courbes des matériaux.

Par ailleurs, la résolution numérique de l'équation de Richards est sensible aux non-linéarités des fonctions  $\theta(\psi)$  et  $k(\psi)$ , ce qui peut entraîner des problèmes de convergence, particulièrement dans des systèmes où les contrastes hydrogéologiques sont importants, comme dans les CEBC. Pour limiter ces problèmes, il est généralement recommandé de raffiner le maillage aux interfaces, de réduire la taille des pas de temps lors des phases transitoires rapides, ou encore de lisser légèrement la pente des courbes de rétention d'eau lorsqu'elles sont trop abruptes. Enfin, une initialisation réaliste des succions, basée sur des

mesures de terrain, améliore souvent la stabilité et la convergence du modèle (Castonguay, Ozeir, Medina, & Lessard; Geostudio, 2022).

### **1.3 Géophysique appliquée à l'environnement minier**

Parmi les différentes technologies de suivi et de caractérisation des ouvrages de restauration minière, les méthodes géophysiques (TL-ERT, GPR, MASW etc.) présentent un intérêt notable en raison de leur large couverture spatiale, de leur caractère non invasif et de leur mise en œuvre relativement facile (Binley et al., 2015). Elles peuvent être employées de manière indépendante (Dimech et al., 2024) ou combinées entre elles (Impinna et al., 2024; Maqsood et al., 2011) pour améliorer la caractérisation du comportement des recouvrements miniers. Ces méthodes permettent d'obtenir également des informations complémentaires sur le faciès des résidus miniers (i.e. structure interne et composition) (Mollehuara-Canales, Kozlovskaya, Lunkka, Moisis, & Pedretti, 2021; Rey, Mendoza, Martínez, Hidalgo, & Rodríguez, 2022). En parallèle, les technologies à fibre optique (e.g. DAS, DTS, DSS) se développent rapidement pour la surveillance et la détection précoce d'anomalies dans les barrages et les parcs à résidus miniers en réponse à plusieurs ruptures de barrages aux conséquences catastrophiques (Forbes, Ouellet, Suszek, Lato, & Russell, 2021; Inaudi, Walder, Blin, & Dinh, 2023; Johansson, Sjö Dahl, Mondanos, & Stork, 2023).

La dernière section de cette revue se concentre spécifiquement sur la méthode de tomographie de résistivité électrique (ERT) car elle a un bon potentiel pour imager les variations spatio-temporelles de la teneur en eau dans les recouvrements (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2023), et qu'elle constitue le cœur de ce projet de recherche. Les sections suivantes détailleront le principe théorique de l'ERT, les paramètres influençant la résistivité électrique, ainsi que les concepts de modélisation directe et indirecte en géophysique. Enfin, une présentation de l'application de l'ERT en environnement minier sera proposée.

### 1.3.1 Principe de la tomographie de résistivité électrique

Le principe général de la méthode ERT est de mesurer la distribution spatiale des conductivités électriques d'un sol ( $\sigma$ , exprimée en S/m) à l'aide d'électrodes, suite à l'injection d'un courant. Ce principe repose sur le théorème de Gauss et la loi d'Ohm. Le développement des équations suivantes s'appuie sur ces lois pour aboutir à la relation entre le courant injecté depuis une source ponctuelle et la distribution de potentielle électrique dans un milieu considéré. L'équation vectorielle de la loi d'Ohm dans un milieu 3D continu est donnée par (Loke, 2001):

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (1.17)$$

Avec  $\vec{J}$  le vecteur densité de courant [ $L^{-2}I$ ];  $\sigma$  la conductivité électrique du milieu [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ] et  $\vec{E}$  le vecteur de l'intensité du champ électrique [ $MLT^{-3}I^{-1}$ ]. La résistivité électrique du milieu,  $\rho$  en  $\Omega \cdot m$  (avec  $\rho = 1/\sigma$ ) est davantage utilisée en géophysique.

Le champ électrique dérivant d'un potentiel électrique  $V$  [ $ML^2T^{-3}I^{-1}$ ], il peut se réécrire sous la forme (Loke, 2001):

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (1.18)$$

Avec  $\vec{\nabla}f$  l'opérateur gradient.

En combinant les deux expressions précédentes (1.17) et (1.18), une relation analogue à la loi de Darcy est obtenue, liant gradient de potentiel et flux électrique (par comparaison avec le flux hydraulique) (Loke, 2001):

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \vec{\nabla}V \quad (1.19)$$

La densité de courant  $\vec{J}$  peut ensuite être reliée à l'intensité du courant  $I$  injecté à partir d'une source ponctuelle de coordonnées  $(x_s, y_s, z_s)$ , par l'équation de Dey et Morrison (1979):

$$\nabla(\vec{J}) = I \cdot [\delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s)] \quad (1.20)$$

Où  $\nabla(\vec{f})$  est l'opérateur divergence et  $\delta$  la fonction de Dirac telle que :

$$\delta(x - x_s) = \begin{cases} 1, & x = x_s \\ 0, & x \neq x_s \end{cases} \quad (1.21)$$

Finalement, la distribution de potentiel électrique  $V$  en tout point de l'espace  $(x, y, z)$  engendrée par l'injection d'un courant  $I$  issu de la source ponctuelle  $S$ , est calculée comme suit (Loke, 2001):

$$\sigma \nabla(\vec{\nabla}V) = -I \cdot [\delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s)] \quad (1.22)$$

Comme par définition  $\Delta f = \nabla(\vec{\nabla}f)$  est le Laplacien scalaire, l'équation différentielle suivante est obtenue :

$$\sigma \Delta V = -I \cdot [\delta(x - x_s) \cdot \delta(y - y_s) \cdot \delta(z - z_s)] \quad (1.23)$$

Cette équation est similaire à celle décrivant l'écoulement de l'eau en subsurface en régime permanent. Elle peut être résolue analytiquement pour des cas simples par l'introduction de conditions aux limites ou numériquement (voir section 1.3.3) dans des cas plus complexes où le milieu n'est plus homogène et isotrope (Singha, Johnson, Day-Lewis, & Slater, 2022).

La résolution analytique de l'équation (1.23) pour un milieu homogène, isotrope et semi-infini permet d'illustrer le principe d'obtention d'une mesure ERT. Une mesure de résistivité électrique en un point donné de la subsurface nécessite quatre électrodes placées à la surface, dont deux jouent le rôle de sources de courant (+I et -I) et deux autres celui de mesure de

potentiel. Ces électrodes sont nommées habituellement A et B pour l'injection de courant et M et N pour la mesure du potentiel (Figure 1.12). L'expression de la différence de potentiel entre M et N, basée sur le principe de superposition qui stipule que le potentiel en un point est la somme des potentiels créés par chaque source, est la suivante (Loke, 2001) :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{V_M - V_N}{I} = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1.24)$$

Avec AM, BM, AN et BN les distances entre les électrodes [L] et K appelé facteur géométrique [L].

Ainsi, en injectant un courant dans le sol et en mesurant la différence de potentiel, il est possible de déterminer la résistivité électrique  $\rho$ . Dans l'Équation (1.24) ci-dessus, le facteur géométrique K dépend uniquement de la configuration des électrodes, et permet de transformer la résistance mesurée en une propriété physique intrinsèque du milieu (Singha et al., 2022). La configuration des électrodes représente la façon dont les électrodes de courant et de potentiel sont agencées les unes par rapport aux autres. Plusieurs types de configurations (quadripôles) existent dont les plus courants sont (Loke, 2001): Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle, et pôle-pôle (Figure 1.12).

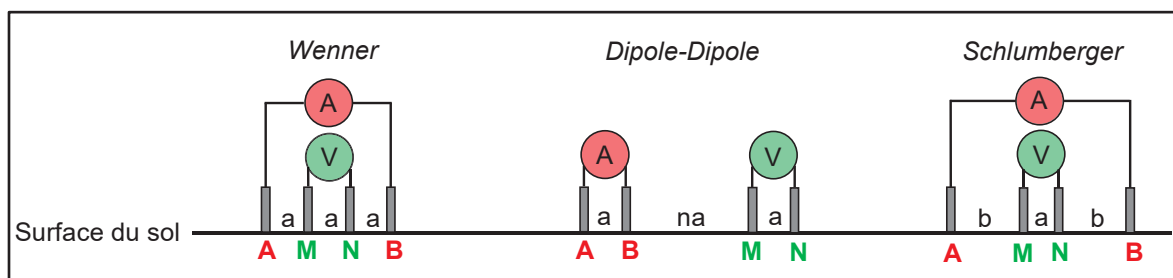


Figure 1.12 Représentation schématique des configurations d'électrode standards  
Adaptée de Singha et al. (2022)

Chaque dispositif présente des avantages et inconvénients en termes de résolution latérale et verticale, de profondeur d'investigation et de sensibilité au bruit (Tableau 1.3). À noter que la

profondeur d'investigation (DOI), correspond à la profondeur maximale à laquelle un dispositif peut encore fournir une information exploitable sur la résistivité du sous-sol (Dahlin & Zhou, 2004; Roy & Apparao, 1971). La sensibilité désigne la manière dont une variation locale de résistivité dans le sous-sol influence la mesure de potentiel enregistrée à la surface (Binley & Kemna, 2005). Le rapport signal sur bruit (S/N dans le tableau) représente le rapport entre l'amplitude du signal électrique utile mesuré (différence de potentiel générée par l'injection de courant) et l'amplitude du bruit parasite présent dans les données (LaBrecque & Yang, 2001). Ce paramètre est un indice de la qualité des mesures et de leur fiabilité en amont du processus de traitement des données.

Tableau 1.3 Comparaison entre les différents dispositifs standards  
Tiré de Dimech et al. (2020)

Nom du protocole	S/N	DOI	Sensibilité	Durée	Avantages/limitations
Wenner-Alpha	+++	+	+	--	+ : structures horizontales
Wenner-Beta	+	++	+++	--	
Wenner-Gamma	--	+	-	--	- : très grande instabilité
Schlumberger	+++	+	+	+	+ : structures horizontales
Dipôle-Dipôle	+	++	+++	+++	+ : structures verticales
Pôle-Pôle	+	+++	-	++	- : nécessite électrodes à l' $\infty$
Pôle-Dipôle	+	++	+	++	- : nécessite électrodes à l' $\infty$

Légende : -- : très faible, - : faible, + : moyen, ++ : bon et +++ : excellent.

Dans le cas où le milieu n'est plus homogène, la résistivité électrique mesurée est différente de la résistivité électrique réelle du sous-sol. Elle est communément appelée résistivité électrique apparente, qui correspond à une moyenne des résistivités présentes dans le sous-sol. La détermination des résistivités réelles à partir des résistivités apparentes est effectuée en résolvant le problème inverse décrit plus bas.

En pratique, l'ERT consiste à injecter un courant continu dans le sous-sol à l'aide de deux électrodes spécifiques, et à mesurer la différence de potentiel générée à l'aide de deux autres électrodes. Pour obtenir une imagerie 2D de la subsurface, cette séquence injection/mesure est répétée le long d'un profil d'électrodes disposées par exemple en ligne ou en forage (Figure

1.13). Chaque mesure repose sur une combinaison de quatre électrodes, et l'ensemble des combinaisons possible (plusieurs centaines) constitue une base de données riche en informations sur la subsurface (Loke, 2001). L'ERT peut aussi être utilisée en mode « time-lapse » (TL-ERT) pour suivre l'évolution temporelle de la résistivité du milieu. Dans cette configuration, le profil d'électrodes reste en place sur une période donnée, et les mesures sont réalisées automatiquement à intervalles réguliers (Chambers et al., 2022). Cette approche permet de détecter des dynamiques telles que le suivi de glissements de terrain (Holmes et al., 2020) ou des écoulements d'eau en subsurface (McLachlan, Chambers, Uhlemann, Sorensen, & Binley, 2020).

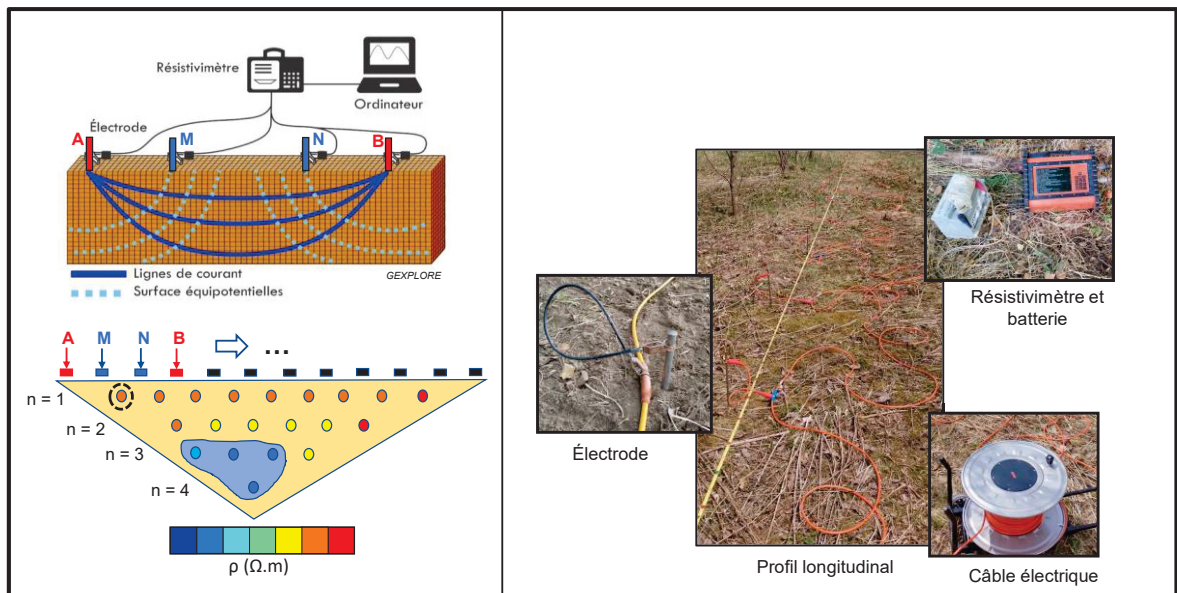


Figure 1.13 Dispositif sur le terrain

### 1.3.2 Paramètres affectant la résistivité électrique

À l'échelle de la mesure ERT, la détection par les électrodes M et N d'une variation de distribution de potentiel à la suite de l'injection d'un courant est possible grâce au déplacement des charges dans le sol résultant principalement de trois mécanismes microscopiques que sont la conduction électronique, la conduction ionique et la conduction de surface (Samouëlian et al., 2005) représentés schématiquement à la Figure 1.14. La conduction électronique est liée

au déplacement des électrons à l'intérieur des grains solides, notamment dans les minéraux métallifères. Elle dépend principalement de la minéralogie (teneur en particules métalliques) et de l'agencement des grains (Rhoades, Manteghi, Shouse, & Alves, 1989; Rhoades, Raats, & Prather, 1976). La conduction ionique résulte du transport des ions dissous dans le fluide interstitiel. Elle est fortement influencée par la porosité, la teneur en eau, ainsi que la nature et la concentration des ions dissous (Revil, Kessouri, & Torres-Verdín, 2014). Enfin, la conduction de surface repose sur les interactions électrochimiques entre les ions du fluide et les surfaces des particules solides, par le biais de la double couche ionique. Elle est généralement plus marquée dans les sols riches en argiles et en particules fines (Revil, Ahmed, & Matthai, 2018).

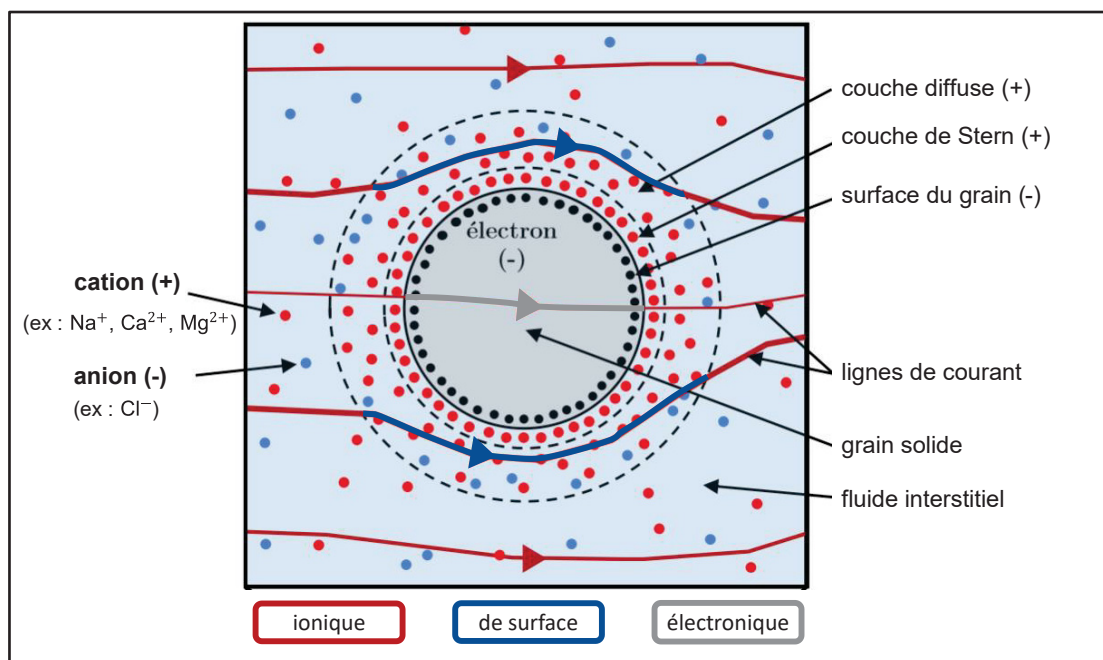


Figure 1.14 Représentation des trois types de conduction qui ont lieu à l'échelle microscopique  
Adaptée de Dimech (2020)

Le type de conduction prédominant dépend de la plage de valeurs de résistivité du milieu poreux et du fluide interstitiel (Figure 1.15). Un fluide interstitiel tel que l'eau salée favorisera une conduction de type ionique, tandis qu'un milieu poreux à forte résistivité, associé à une

eau interstitielle similaire à de l'eau douce, sera davantage caractérisé par une conduction de surface (Attia, Fratta, & Bassiouni, 2008).

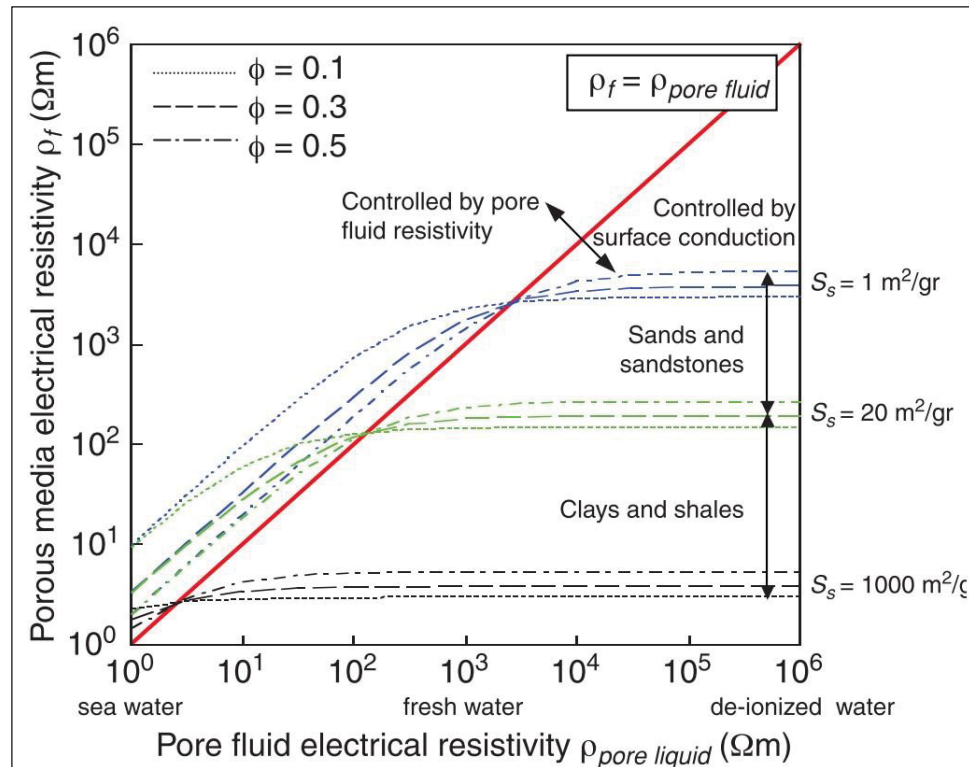


Figure 1.15 Prédominance d'un type de conduction ou l'autre selon les valeurs de résistivité électrique du milieu et du fluide interstitiel  
Tirée de Attia et al. (2008)

La Figure 1.16, illustrant les plages de valeurs de résistivités des milieux poreux typiques, montre qu'un même matériau peut prendre une large gamme de valeurs. Cette observation souligne que la valeur de résistivité d'un matériau ne dépend pas uniquement de ses propriétés intrinsèques (granulométrie, minéralogie etc.) mais également des propriétés du milieu environnant (nature du fluide interstitiel, température, teneur en eau etc.).

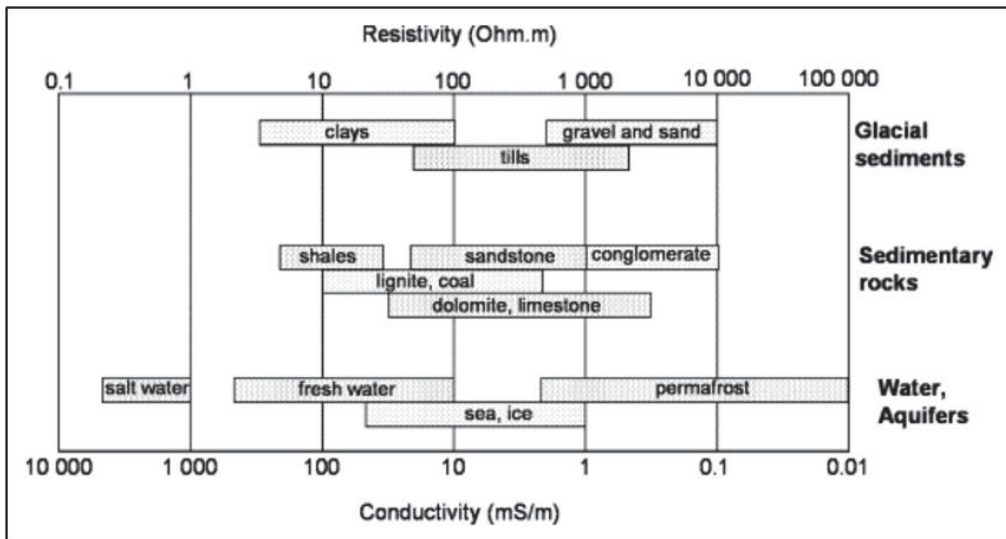


Figure 1.16 Plage de résistivité et conductivité typiques des milieux poreux  
Tirée de Samouëlian et al. (2005)

Parmi les propriétés externes au milieu poreux, la température est un paramètre qui influence de manière importante les valeurs de résistivités. L'augmentation de la température entraîne une hausse de la conductivité électrique à l'échelle microscopique, en raison de l'accroissement de la mobilité des ions. Une étude empirique menée en laboratoire sur des échantillons de sol ont montré qu'en moyenne, une hausse de 1°C de la température induit une augmentation d'environ 2% de la conductivité électrique (Hayley, Bentley, Gharibi, & Nightingale, 2007). Dans le cadre de mesures sur le long terme, les variations naturelles de température à la surface influencent les mesures de conductivité électrique. Il est donc nécessaire de corriger ces effets lorsque la température n'est pas le paramètre d'intérêt, afin d'éviter des biais dans l'interprétation des données (Brunet et al., 2010; Chambers et al., 2014; Rein, Hoffmann, & Dietrich, 2004; Uhlemann et al., 2016). Les modèles de correction visent à homogénéiser l'ensemble des valeurs de conductivités mesurées à une température de référence. L'équation suivante décrit un des modèles souvent utilisé à la température de 25°C (Ma, McBratney, Whelan, Minasny, & Short, 2011) :

$$\sigma_{25} = \frac{\sigma_T}{1 + t_c \cdot (T - 25)} \quad (1.25)$$

Avec  $\sigma_{25}$  la conductivité électrique à la température de 25°C [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ] (usuellement exprimée en  $\mu S/cm$ );  $\sigma_T$  la conductivité électrique à la température  $T$  du sous-sol mesurée sur le terrain [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ] et  $t_c$  le facteur de correction,  $0.018 \text{ } ^\circ C^{-1} < t_c < 0.022 \text{ } ^\circ C^{-1}$  (Hayley et al., 2007)

Le terme de température  $T$  dans le modèle ci-dessus peut être obtenu par l'équation de la chaleur qui dépend de la profondeur par rapport à la surface et du jour de l'année (Uhlemann et al., 2017) :

$$T_{modèle}(z, t) = T_{moy} + \frac{\Delta T}{2} \exp\left(-\frac{z}{d}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + \varphi - \frac{z}{d}\right) \quad (1.26)$$

Avec  $T_{moy}$  la température moyenne annuelle de l'air [ $^\circ C$ ],  $\Delta T$  l'amplitude annuelle de la température de l'air [ $^\circ C$ ],  $z$  la profondeur sous la surface [ $L$ ],  $d$  une profondeur caractéristique pour laquelle l'amplitude de la variation de température est réduite d'un facteur  $1/e$  [ $L$ ],  $t$  le jour de l'année [ $T$ ], et  $\varphi$  un terme de déphasage entre la température de l'air et la température de surface [ $^\circ C$ ]. En pratique, ce modèle de température peut être calibré avec des mesures de sondes de température implantées dans le milieu à différentes profondeurs (Brunet et al., 2010; Chambers et al., 2014; Uhlemann et al., 2017; Uhlemann et al., 2016).

Les mesures électriques obtenues par la méthode ERT sont généralement converties en termes de paramètres physiques d'intérêt tels que la teneur en eau ou la température. Cette conversion repose sur des relations pétrophysiques établissant un lien entre la conductivité électrique mesurée et les caractéristiques hydrogéologiques du sol. La loi d'Archie (1942) est un exemple de relation pétrophysique basée sur l'hypothèse que la conduction ionique est majoritaire devant les autres types de conduction. Cette relation était initialement utilisée pour évaluer le potentiel d'un réservoir en milieu saturé dans le domaine pétrolier et a, par la suite, été adaptée aux milieux non saturés (Lesmes & Friedman, 2005; Samouëlian et al., 2005). Cette version

modifiée présentée ci-dessous, qui établit un lien entre la conductivité électrique et le degré de saturation a été largement appliquée pour l'estimation de la teneur en eau (Binley, Cassiani, Middleton, & Winship, 2002; Brunet et al., 2010; Wenninger, Uhlenbrook, Lorentz, & Leibundgut, 2008):

$$\sigma = \frac{1}{F^*} \sigma_w = a \cdot n^{m_a} \cdot S_r^{n_a} \cdot \sigma_w \quad (1.27)$$

Avec  $\sigma$  et  $\sigma_w$  les conductivités électriques du milieu poreux et du fluide interstitiel respectivement [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ];  $F^* = \frac{1}{a} \cdot n^{-m_a} \cdot S_r^{-n_a}$  le facteur de formation du milieu poreux non saturé [-];  $m_a$  et  $n_a$  les exposants de cimentation et de saturation d'Archie respectivement [-].  $n_a$  dépend de la nature du fluide interstitiel et  $a$  est un paramètre de calibration.

L'Équation (1.27) est donc particulièrement pertinente dans le contexte de la restauration minière où l'eau s'écoule dans la zone vadose. D'autres relations dérivées de la loi d'Archie intègrent également les contributions de d'autres mécanismes de conduction électrique. La relation de Waxman et Smits (1968) introduit un terme supplémentaire relatif à la conduction de surface:

$$\sigma = \frac{1}{F^*} \sigma_w + \sigma_s = a \cdot n^{m_a} \cdot S_r^{n_a} \cdot \left( \sigma_w + \frac{B \cdot Q_v}{S_r} \right) \quad (1.28)$$

Avec  $\sigma_s$  la conductivité électrique de la surface des grains solides [ $M^{-1}L^{-3}T^3I^2$ ],  $B$  la mobilité des ions dans la double couche [ $M^{-1}T^2I$ ], et  $Q_v$  la densité volumique de charge en excès dans la double couche [ $L^{-3}TI$ ].

Cependant, relativement peu d'études ont porté sur l'établissement de relations pétrophysiques spécifiquement adaptées aux résidus miniers. Dans ce type de matériaux, la contribution de la conduction de surface, ainsi que celle de conduction électronique restent difficiles à quantifier.

Un modèle empirique a néanmoins été proposé par Mollehuara Canales et al. (2020) pour inclure les trois types de conduction (ionique, électronique et de surface):

$$\sigma = \sigma_w n^{n_a} S_r^{m_a} + \sigma_s \phi_s^{m_s} + \sigma_c \phi_c^{m_c} \quad (1.29)$$

Avec le premier terme ( $\sigma_w n^{n_a} S_r^{m_a}$ ) qui représente la conduction ionique de l'eau interstitielle décrite par la loi d'Archie. Les deux termes suivants traduisent respectivement la contribution de conduction de surface associée aux grains solides  $\phi_s$  [-] et la conduction associée à la phase argileuse  $\phi_c$  [-], dont les conductivités électriques intrinsèques sont  $\sigma_s$  et  $\sigma_c$ .

### 1.3.3 Modélisation et inversion en ERT

Généralement, les milieux étudiés sont complexes et comprennent de nombreuses hétérogénéités, ce qui nécessite de résoudre l'équation (1.23) de manière numérique par la méthode des éléments finis. Cette approche est appelée modélisation géophysique directe, car elle part d'un modèle de conductivité électrique connu pour simuler la distribution du potentiel électrique générée suite à l'injection d'un courant (Figure 1.17) (Singha et al., 2022). Elle peut être utilisée pour générer différents scénarios de jeux de données synthétiques en modifiant le modèle de départ (modification des distributions spatiales de conductivité électrique, des configurations de dispositifs d'électrodes, du niveau de bruit et de la discrétisation du modèle) (Rücker, Günther, & Wagner, 2017). Cela constitue un intérêt pour optimiser les paramètres d'acquisition avant une campagne d'investigation sur le terrain.

À titre d'exemple, J. Robinson et al. (2020) ont réalisé une étude de faisabilité numérique reposant sur un modèle couplé flux-transport et géoélectrique pour simuler la migration d'un panache de nitrate à proximité d'une installation de déchets nucléaires. L'étude a montré l'importance d'ajouter un traceur pour améliorer la détection du panache par la méthode ERT et la nécessité de faire les mesures en time-lapse pour suivre son évolution. En soulignant également les limites de la méthode, ce travail constitue une « recette » d'indications à suivre pour optimiser les chances d'obtenir des imageries de bonne qualité.

Dans ce projet, la modélisation géophysique directe a été utilisée pour sélectionner les paramètres d'acquisition les plus appropriés (type de dispositif, espacement d'électrodes) pour s'assurer que les contrastes électriques induits par les variations de teneur en eau dans le recouvrement minier peuvent être détectés par la méthode ERT (Bedoui, Dimech, Boulanger-Martel, Bussière, & Plante, 2024).

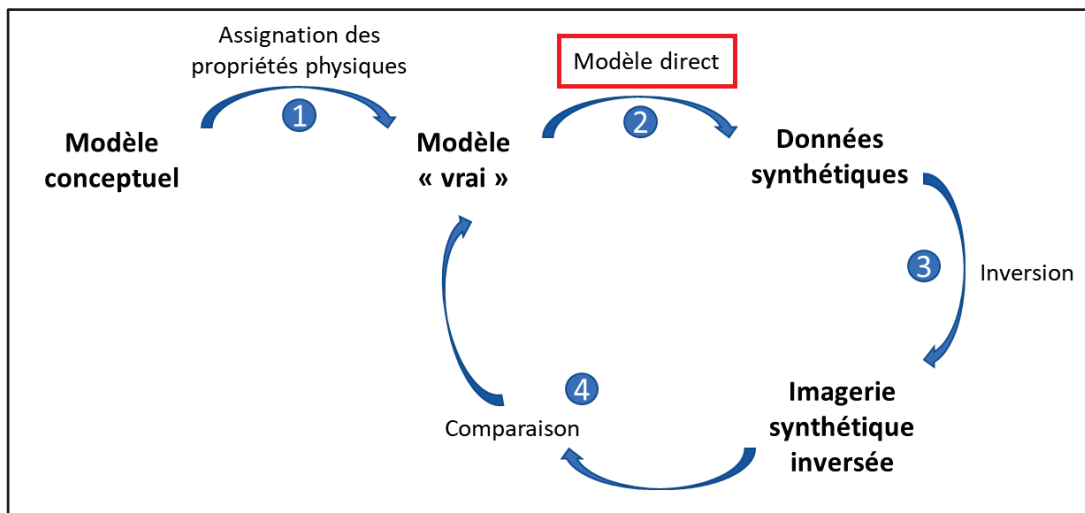


Figure 1.17 Démarche de la modélisation géophysique directe

L'inversion (aussi appelée modélisation géophysique indirecte) est le processus inverse qui consiste à retrouver un modèle de conductivité électrique du sous-sol à partir d'une distribution de potentiel mesurée (Figure 1.18).

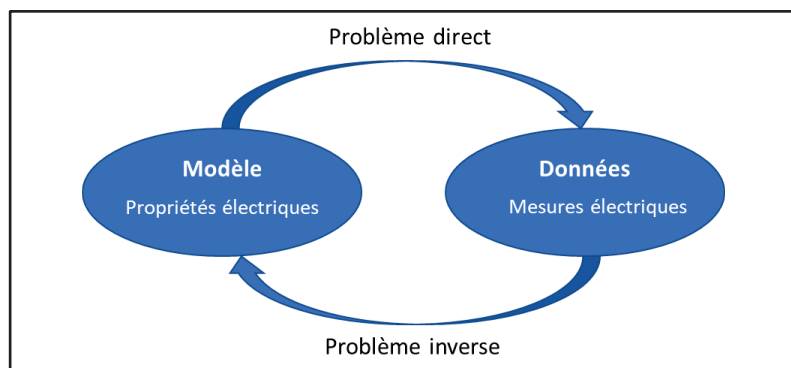


Figure 1.18 Lien entre la modélisation directe et indirecte

De manière concrète, l'inversion permet d'obtenir un modèle représentatif de la subsurface qui reproduit au mieux les données de résistivités apparentes mesurées. Plusieurs logiciels, souvent les mêmes que ceux utilisés pour la modélisation géophysique directe, permettent d'effectuer ce type d'inversion, comme Res2DInv (Loke & Barker, 1996), E4D (Johnson, Versteeg, Ward, Day-Lewis, & Revil, 2010), pyGIMLI (Rücker et al., 2017) ou encore SimPEG (Cockett, Kang, Heagy, Pidlisecky, & Oldenburg, 2015). De manière générale, le processus d'inversion se déroule en plusieurs étapes (Singha et al., 2022) récapitulées à la Figure 1.19. Un modèle de départ est initialisé avec une distribution de résistivité homogène, souvent définie comme étant la moyenne des résistivités apparentes mesurées sur le terrain. À partir de ce modèle de départ, des résistivités apparentes synthétiques sont calculées à l'aide de la modélisation directe (Équation (1.23)). Les données synthétiques sont ensuite comparées aux données mesurées, ce qui permet de calculer une erreur. Cette étape de comparaison constitue le cœur de l'inversion et correspond à la résolution d'un problème d'optimisation, dont le but est de minimiser une fonction de coût définie comme suit (Hayley, Pidlisecky, & Bentley, 2011):

$$\phi(m) = \frac{1}{2} \|W_d(d(m) - d_{obs})\|^2 + \frac{\beta}{2} \|W_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (1.30)$$

Avec  $d_{obs}$  le vecteur de résistivités apparentes mesurées sur le terrain;  $d(m)$  le vecteur de résistivités calculé à partir d'un modèle  $m$ ;  $W_d$  la matrice de pondération des données mesurées;  $W_m$  la matrice de pondération du modèle;  $m_{ref}$  le modèle de référence et  $\beta$  un paramètre de régularisation.

Le premier terme  $\left(\frac{1}{2} \|W_d(d(m) - d_{obs})\|^2\right)$  correspond à l'ajustement aux données, en minimisant l'écart entre les données observées et celles simulées par le modèle. Le second terme  $\left(\frac{\beta}{2} \|W_m(m - m_{ref})\|^2\right)$  est un terme de régularisation qui stabilise la solution, notamment à cause de la sur-paramétrisation du problème inverse. Parmi les paramètres de régularisation existants,  $\lambda$  contrôle le lissage global du modèle et  $Z_{weight}$  introduit une anisotropie verticale en pénalisant plus ou moins fortement les variations selon la profondeur

(Rücker et al., 2017). Günther (2004) propose une classification détaillée des différentes approches de régularisation utilisées dans la résolution du problème inverse. Outre la régularisation pour éviter des variations non réalistes du modèle, il est également possible de contraindre l'inversion en intégrant des données issues d'autres méthodes géophysiques. Ces méthodes complémentaires permettent de délimiter plus clairement les interfaces géologiques qui sont parfois difficilement visibles avec l'ERT. Par exemple, le GPR (Ground Penetrating Radar) est plus sensible aux changements d'interface dans un milieu (Bouchedda, Chouteau, Binley, & Giroux, 2012). Les données sismiques améliorent la localisation des contrastes structuraux grâce à la sensibilité de la vitesse sismique aux propriétés mécaniques (Gallardo & Meju, 2004). La gravimétrie apporte des informations sur les variations de densité, ce qui contribue à raffiner la géométrie des couches (Monteiro Santos, Afonso, & Dupis, 2007).

Si l'erreur obtenue est inférieure à une valeur cible, alors le modèle est accepté et correspond au résultat final. Sinon, l'Équation (1.30) est reprise en utilisant un algorithme d'optimisation qui met à jour le modèle à chaque itération. Cette mise à jour est assurée par l'algorithme de Gauss-Newton, qui permet de minimiser la fonction de coût à chaque pas (Hayley et al., 2011):

$$(J^T W_d^T W_d J + \beta W_m^T W_m) \cdot \delta m = - \left( J^T W_d^T W_d (d(m) - d_{obs}) + \beta W_m^T W_m (m - m_{ref}) \right) \quad (1.31)$$

Avec J la matrice jacobienne dont les éléments sont :  $J_{ij} = \frac{\partial m_i}{\partial d_j}$  et  $\delta m$  est la mise à jour du modèle à l'itération donnée.

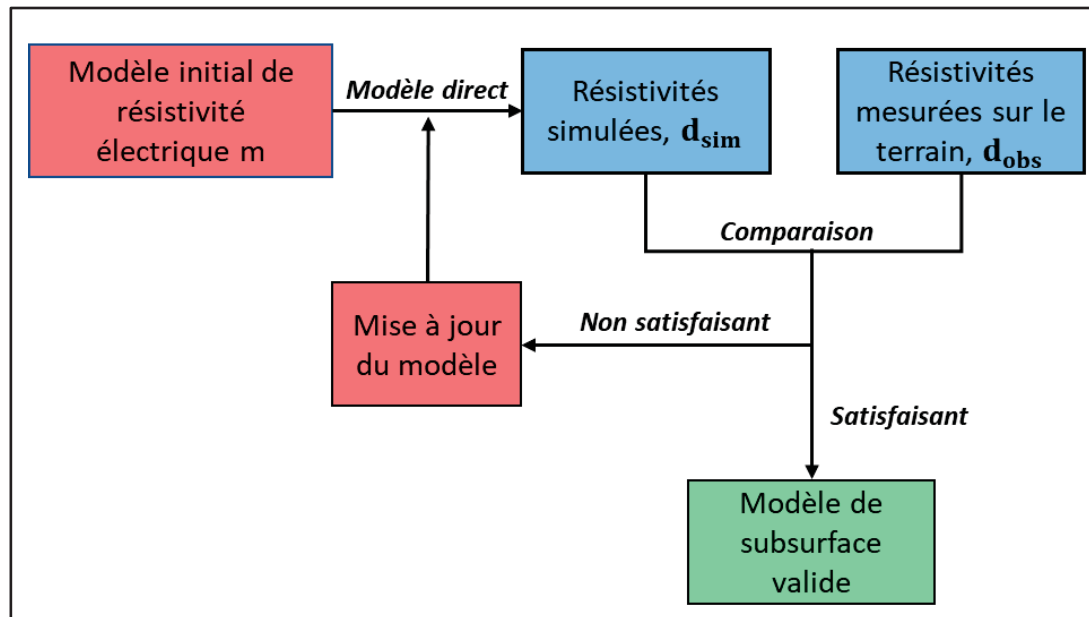


Figure 1.19 Aperçu simplifié du processus d'inversion  
Adaptée de Singha et al. (2022)

L'inversion des données ERT décrite dans ce paragraphe, suivie de leur conversion en un paramètre d'intérêt (e.g. teneur en eau), correspond à une « inversion hydrogéophysique non couplée » qui comprend des incertitudes inhérentes (Pleasant, Neves, Parsekian, Befus, & Kelleners, 2022). D'une part, l'étape d'inversion n'est pas unique et dépend fortement des paramètres de régularisation. Singha et Gorelick (2005) ainsi que Singha, Day-Lewis, Johnson, et Slater (2015) ont notamment montré que le suivi d'un traceur d'eau salée pouvait être systématiquement sous-estimé. D'autre part, les relations pétrophysiques utilisées pour convertir les résistivités électriques inversées (obtenues lors de la dernière itération de l'algorithme de Gauss) peuvent être établies de différentes manières : en laboratoire, par des mesures simultanées de résistivité et de teneur en eau sur des échantillons de sol (Amidu & Dunbar, 2007; Jayawickreme, Van Dam, & Hyndman, 2008); en combinant des mesures ponctuelles de teneur en eau issues de sondes (ex. TDR) avec les résistivités inversées (Brunet et al., 2010) ou encore en utilisant des paramètres issus de la littérature (Friedman, 2005). Chacune de ces approches présente ses limites : les mesures en laboratoire peuvent être biaisées par l'hystérésis des cycles mouillage/séchage et par le manque de représentativité spatiale ; la méthode combinant sondes et inversion cumule l'incertitude liée à la précision de l'inversion géophysique et à celle des mesures ponctuelles (Tso, Kuras, & Binley, 2019).

Ainsi, cette double source d'incertitude, liée à l'inversion et à la conversion des données électrique, complique l'interprétation quantitative, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer le degré de saturation des recouvrements pour estimer la stabilité géochimique des parcs à résidus miniers. Une façon d'améliorer les résultats d'inversion est de s'appuyer sur les données électriques issues d'un modèle physique (e.g. hydrogéologique), plutôt que sur celles provenant directement du modèle d'inversion. Cette approche est généralement appelée « inversion hydrogéophysique couplée » dans la littérature (Hinnell et al., 2010; Pleasants et al., 2022). Cette notion de couplage hydrogéophysique a fait l'objet d'une partie prépondérante de ce projet développée au chapitre 4.

#### **1.3.4 Applications de l'ERT en environnement minier**

L'utilisation de la méthode TL-ERT en environnement minier reste encore peu fréquente, bien qu'elle ait été introduite dans les années 2010. Cependant, les applications récentes de cette méthode montrent un bon potentiel, notamment pour surveiller les flux de lixiviats dans les haldes et évaluer la stabilité géotechnique des infrastructures de stockage des rejets miniers (Mainali, Nordlund, Knutsson, & Thunehed, 2015; Rucker, 2014; Tresoldi, Hojat, Zanzi, & Certo, 2020). En particulier, les systèmes permanents de monitoring TL-ERT pourraient jouer un rôle crucial dans la détection précoce de fuites ou d'autres anomalies géotechniques, contribuant ainsi à l'élaboration de stratégies de gestion visant à réduire les risques environnementaux (Dimech et al., 2022). Certaines études ont également démontré l'utilité de la TL-ERT pour caractériser le comportement hydrogéologique des rejets miniers (Greer, Burbey, Zipper, & Hester, 2017; Hester, Little, Buckwalter, Zipper, & Burbey, 2019) et pour évaluer l'efficacité des recouvrements miniers en surveillant la migration de l'eau et la saturation des couches de rétention (Dimech et al., 2019; Maqsoud et al., 2011).

Par exemple, Maqsoud et al. (2011) ont utilisé l'ERT en complément des sondes TDR pour évaluer l'intérêt de l'ajout d'un bris capillaire dans une CEBC inclinée afin de limiter la désaturation de la couche de rétention d'eau en amont de la pente (Figure 1.20).

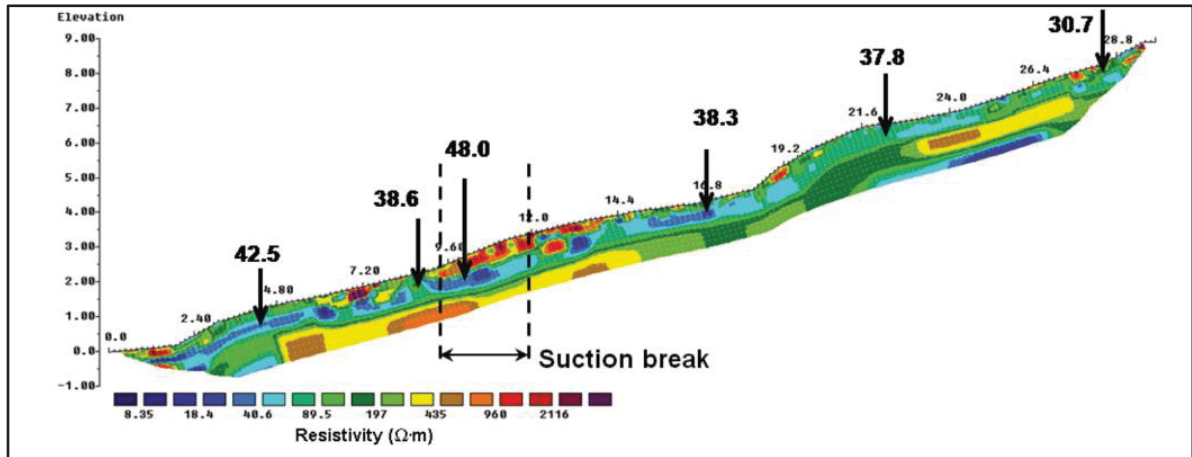


Figure 1.20 Pseudo-section 2D d'un modèle de résistivité inversé avec mise en évidence d'une zone de résistivité plus faible au niveau du bris de succion Tirée de Maqsood et al. (2011)

De même, Dimech et al. (2024); Dimech et al. (2019); Dimech et al. (2023) ont utilisé la TL-ERT pour suivre la performance de recouvrements expérimentaux dans des haldes à stérile et des parcs à résidus miniers au Québec (Figure 1.21).

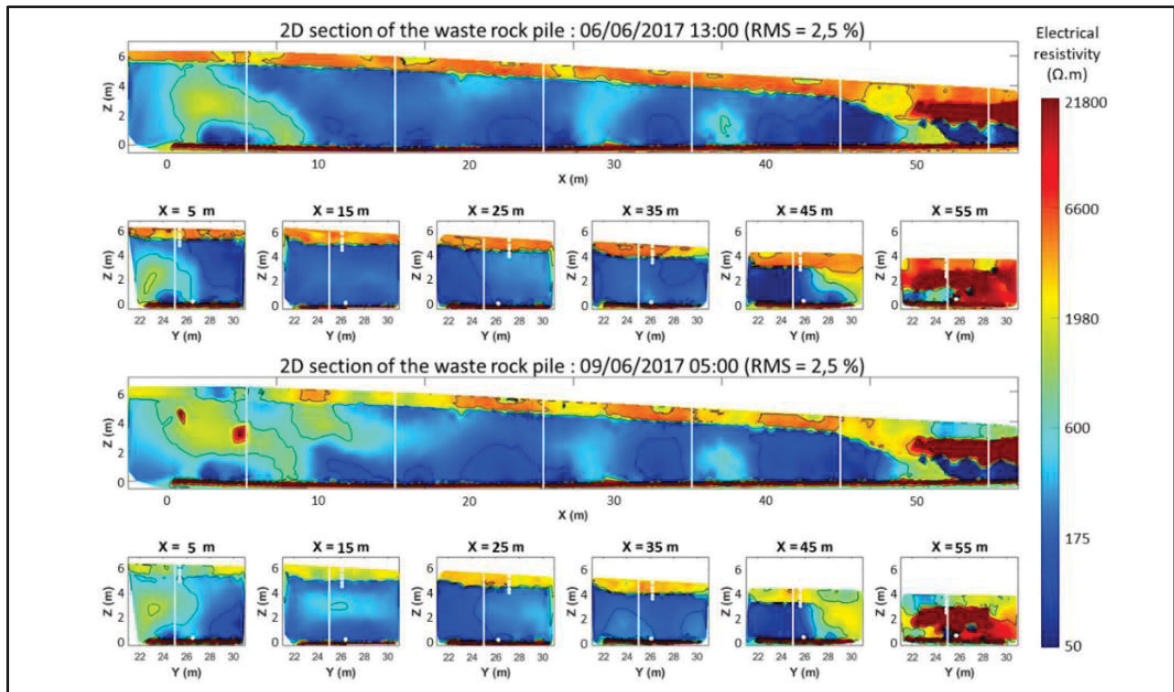


Figure 1.21 Distribution de la résistivité électrique dans une halde à stérile expérimentale Tirée de Dimech et al. (2019)



## CHAPITRE 2

### DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT

Ce chapitre a pour objectif de présenter la démarche adoptée dans le cadre de cette maîtrise recherche, ainsi que d'expliquer la structure du document.

Dans un premier temps, les incertitudes liées au traitement conventionnel sont précisées afin de mettre en évidence l'intérêt et la justification du travail poursuivi dans cette étude. Par la suite, la méthodologie est détaillée à travers la description des tâches réalisées pour chacun des sous-objectifs, en précisant leur chronologie. Enfin, la structure générale du mémoire est présentée, et les articles sont introduits en lien avec les objectifs de recherche auxquels ils répondent.

#### 2.1 Justification de l'étude

La revue de littérature a permis de mettre en évidence l'état actuel des pratiques de suivi des recouvrements miniers, leurs limites et les zones d'incertitude que ce projet cherche à réduire. Il est bien établi que les recouvrements, en particulier les recouvrements à effet de barrière capillaire (CCBE), jouent un rôle clé pour limiter la génération de DMC. Leur efficacité repose sur la réduction de l'infiltration d'eau et de la migration d'oxygène, et dépend du maintien d'un niveau de saturation adéquat dans la couche de rétention d'eau. Le suivi traditionnel de ces recouvrements repose sur des mesures ponctuelles, et les modèles hydrogéologiques, généralement calibrés à partir de ces données, permettent de simuler leur comportement à long terme. Cependant, la faible résolution spatiale de ces mesures réduit souvent la précision de l'évaluation de leur performance et dans un même temps, la fiabilité des simulations.

Les méthodes géophysiques, et notamment la méthode TL-ERT, ont été utilisées en complément pour obtenir des imageries spatio-temporelles de la teneur en eau avec une plus grande résolution spatiale. Cette technique permet de suivre la déviation de l'écoulement de l'eau dans les recouvrements, mais elle présente également des incertitudes : l'inversion n'est

pas unique et les relations pétrophysiques reproduisent difficilement la complexité réelle du terrain. Ces défis sont encore plus importants dans les recouvrements miniers, où les couches fines et les contrastes de résistivité complexifient l'interprétation. Certaines approches avancées existent, telles que les inversions conjointes, le couplage hydrogéophysique ou les calibrations en laboratoire, mais elles restent peu utilisées dans le contexte de la restauration minière.

Ce projet vise à réduire ces limitations en combinant les avantages des mesures géophysiques et de la modélisation hydrogéologique. L'objectif est double : d'une part, caractériser de manière plus précise l'écoulement de l'eau dans les recouvrements en s'appuyant sur un modèle hydrogéologique et sur des données ERT, et, d'autre part, affiner ce modèle en comparant les données synthétiques géophysiques issues de celui-ci aux données géophysiques mesurées sur le terrain. Cette comparaison permettrait d'améliorer la précision de la calibration des modèles hydrogéologiques et donc la prédiction de l'efficacité des recouvrements, car les jeux de données géophysiques ont une résolution spatiale plus large que les capteurs ponctuels. La comparaison constituerait une itération d'une « inversion hydrogéophysique » schématisée à la Figure 2.1.

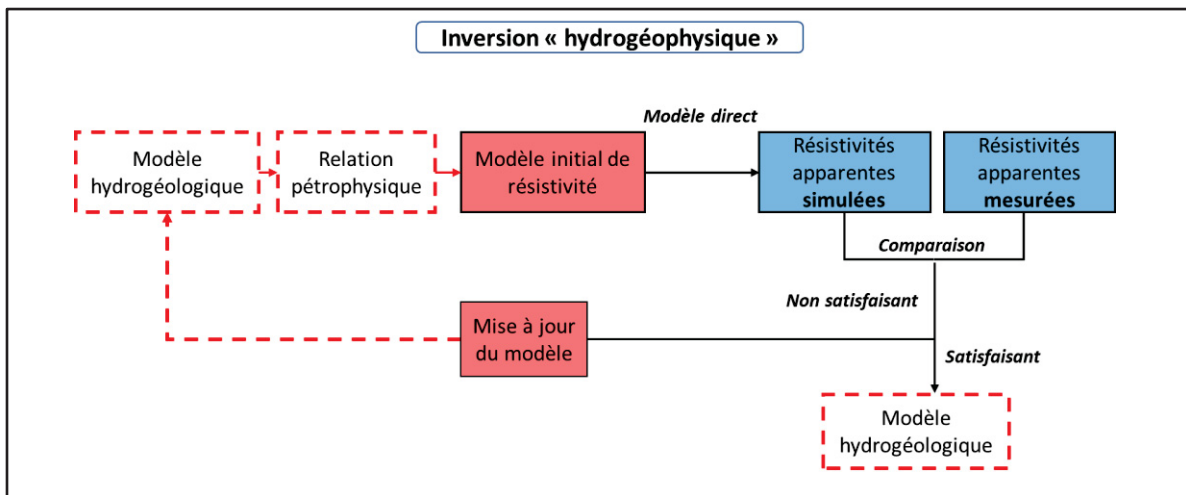


Figure 2.1 Description des étapes de l'inversion « hydrogéophysique ».

Les pointillés rouges représentent les éléments qui diffèrent de l'inversion conventionnelle.

Dans l'inversion conventionnelle, le modèle hydrogéologique final est remplacé par un modèle de résistivité de la subsurface, traduit par la suite en teneur en eau par l'intermédiaire d'une relation pétrophysique

## 2.2 Méthodologie du travail

L'objectif principal de ce projet est d'établir une méthodologie pour interpréter les résultats d'imageries TL-ERT de l'écoulement de l'eau au sein d'un recouvrement minier. Pour répondre à cet objectif principal, trois objectifs spécifiques (OS1, OS2 et OS3) ont été formulés. La présente section vise à présenter un aperçu général de la méthodologie qui a été suivie.

Ce travail de recherche a été structuré selon une méthodologie séquentielle (Figure 2.2). Chaque OS a été divisé en plusieurs tâches, réparties sur des périodes définies. À la fin de chaque OS, des jalons, correspondant à la soumission d'articles et à la participation à des conférences (surlignés en rouge; Figure 2.2), ont permis de synthétiser et de présenter les résultats obtenus.

Objectif principal : Suivi par la méthode TL-ERT de l'écoulement de l'eau au sein d'un recouvrement minier agissant comme barrière à infiltration de l'eau dans des résidus miniers sous-jacents		Année 1 : 2023/2024			Année 2 : 2024/2025		
		A	H	E	A	H	E
OS1 : Réalisation d'une étude de faisabilité préalable à l'instrumentation sur le terrain	Modélisation géophysique avec le logiciel Pygimli		X				
	Modélisation hydrogéologique avec le logiciel SEEP/w			X			
	Synthèse des modélisations pour déterminer les valeurs optimales des paramètres d'acquisition				X		
<b>Compte rendu</b>	<b>Rédaction d'un article et présentation orale des résultats pour la conférence GeoMontreal</b>		X	X	X		
OS2 : Inversion des données de terrain pour suivre la dynamique de l'écoulement de l'eau dans le recouvrement	Préparation en amont du matériel nécessaire et acquisition sur site de mesures de résistivité de manière continue pendant 8 jours (avant, pendant et après l'essai d'infiltration)				X		
	Traitement des données de terrain ERT					X	
<b>Compte rendu</b>	<b>Présentation des travaux sous forme d'un poster à la conférence EGU à Vienne</b>					X	
OS3 : Calibration des modèles de l'OS1 pour une interprétation conjointe des mesures de terrain obtenues à l'OS2	Élaboration d'un modèle hydrogéologique calibré avec les données de terrain et conversion teneur en eau ↔ résistivité électrique à partir de relations pétrophysiques					X	X
	Adaptation du modèle géophysique pour la génération de résistivités synthétiques apparentes à partir du profil de résistivité issu du modèle hydrogéologique						X
	Interprétation finale basée sur la comparaison entre les données apparentes de terrain et les données synthétiques apparentes du modèle géophysique; estimation de l'écart entre les deux						X
<b>Compte rendu final</b>	<b>Préparation d'un article de revue et poursuite de la rédaction du mémoire</b>					X	X

Figure 2.2 Planification du projet : répartition du travail selon les objectifs spécifiques (OS)

L'OS1 consistait à dimensionner le dispositif géophysique selon les caractéristiques du recouvrement. Pour ce faire, deux modèles numériques distincts (géophysique et hydrogéologique) du recouvrement ont été réalisés, chacun visant à définir les paramètres optimaux de dimensionnement (Figure 2.3). D'une part, des données synthétiques ont été générées suivant la démarche proposée par J. Robinson et al. (2020) à partir du modèle géophysique incluant la simulation d'un traceur d'eau. Cette approche a permis de vérifier que la méthode ERT était capable de distinguer différents types d'écoulement d'eau, et de sélectionner l'espacement optimal entre les électrodes pour avoir une résolution suffisante. D'autre part, le modèle hydrogéologique a servi à estimer la quantité d'eau à injecter lors de l'essai d'infiltration, ainsi que la vitesse d'écoulement correspondante. La vitesse d'écoulement d'eau a permis indirectement de déterminer la fréquence d'acquisition du résistivimètre.

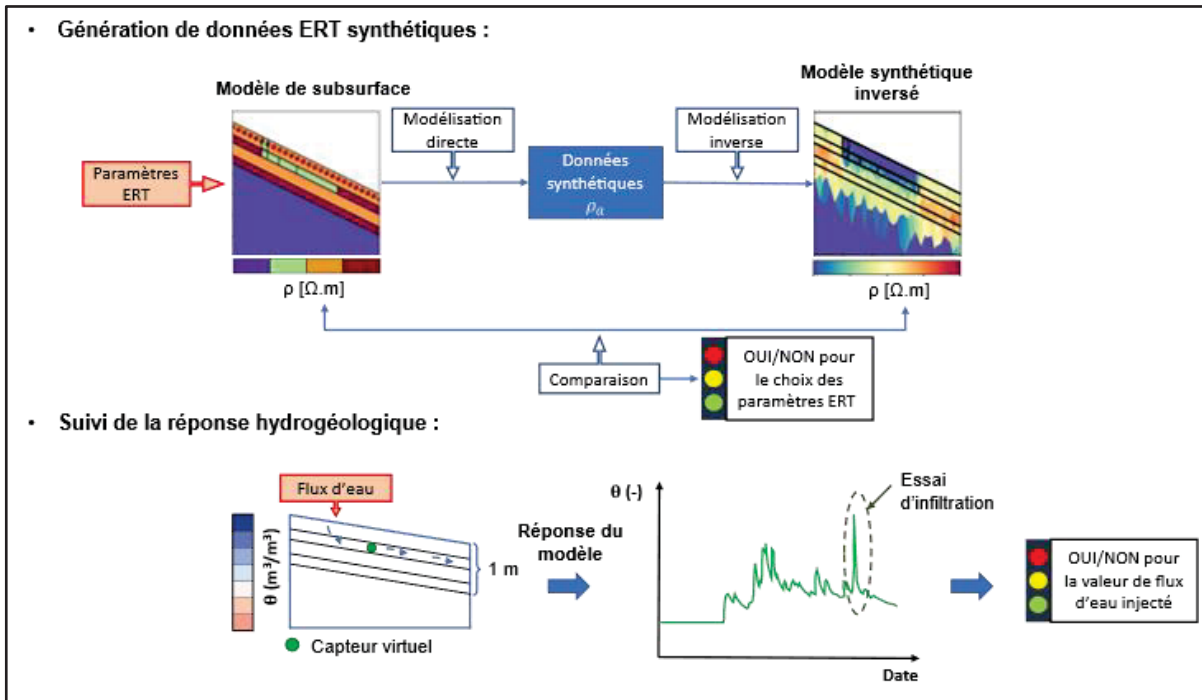


Figure 2.3 Méthodologie suivie pour réaliser l'OS1

Le but de l'OS2 était de réaliser le traitement conventionnel des données électriques acquises sur le terrain, à savoir l'inversion des données brutes pour retrouver la distribution de la conductivité électrique en tout point du recouvrement et la correction de l'effet de température sur les données inversées (Figure 2.4). Ce traitement a permis d'obtenir une imagerie de la dynamique de l'écoulement de l'eau avant, pendant et après l'injection du traceur.

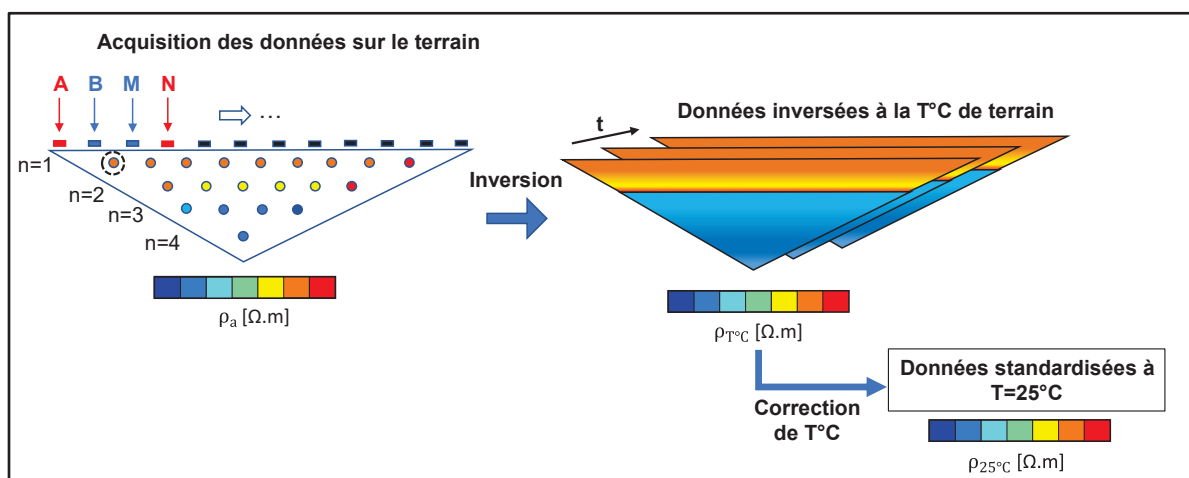


Figure 2.4 Méthodologie suivie pour réaliser l'OS2

Enfin, l'OS3 visait à effectuer une analyse conjointe des résultats des modèles numériques et des données de terrain pour estimer plus précisément le chemin d'écoulement d'eau dans la CEBC en évitant les incertitudes engendrées par l'inversion. Cette analyse incluait la calibration du modèle hydrogéologique avec les données de terrain (station météo, taux d'infiltration, sondes TEROS) et la conversion du profil de teneur en eau obtenu en profil de résistivité électrique par application de la loi d'Archie. Le profil de résistivité électrique était ensuite utilisé comme modèle de départ pour générer des données synthétiques apparentes directement comparables avec les données de terrain. La comparaison entre les jeux de données simulés et observés a été effectuée en trois positions du recouvrement (haut, milieu et bas de pente) et à différentes profondeurs, à partir du calcul de la RMSE appliqué à chaque profondeur. La Figure 2.5 ci-dessous récapitule les différentes étapes :

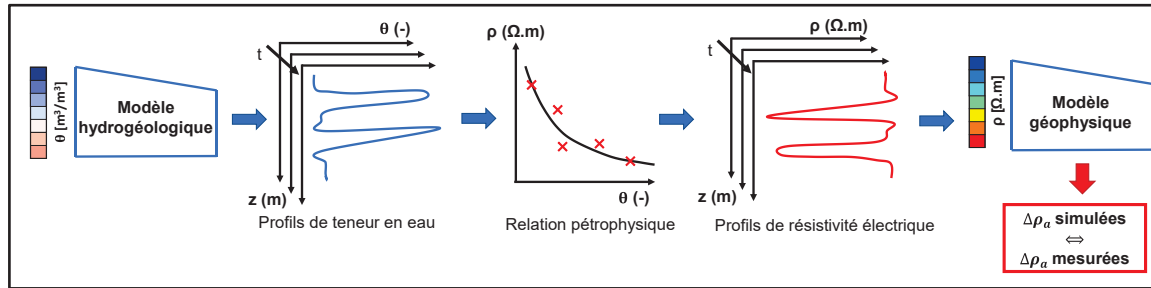


Figure 2.5 Méthodologie suivie pour réaliser l'OS3

## 2.3 Présentation des articles

Le mémoire est structuré autour de deux articles (conférence et revue) publiés ou soumis pour publication à une revue avec comité de lecture. Chacun de ces articles répond à un ou plusieurs OS, couvrant ainsi l'ensemble des objectifs définis dans la méthodologie.

### 2.3.1 Article 1: Étude de faisabilité géophysique préalable à la campagne de terrain

Le premier article est un article de conférence publié pour GeoMontreal 2024 (77th Annual Canadian Geotechnical Conference on the theme *Resilient geosciences for future generations*) à Montréal (Québec, Canada) en septembre 2024 (Bedoui et al., 2024):

*Bedoui, L., Dimech, A., Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Plante, B. (2024). Numerical feasibility study on the application of geophysics as an autonomous monitoring method for mine cover systems reducing water infiltration. In GeoMontreal 2024. The Canadian Geotechnical Society.*

Ce premier article de conférence a été intégré dans le corps du mémoire car il répond directement à une partie de l'OS1, à savoir le choix des paramètres d'acquisition géophysique optimaux (espacement entre électrodes, protocole de mesure) en vue de la préparation de la campagne de terrain.

La réalisation d'une étude de faisabilité numérique en amont s'avère particulièrement pertinente dans ce contexte, dans la mesure où les propriétés du recouvrement sont déjà connues. Il est donc possible de concevoir un modèle numérique simplifié du recouvrement, à partir duquel des données géophysiques synthétiques peuvent être générées. Cette approche contribue à une meilleure planification de la campagne, tout en augmentant les chances d'obtenir des résultats fiables et exploitables.

L'article présente ainsi une preuve de concept basée sur un modèle simplifié de la CEBC inclinée à quatre couches. La propagation du panache d'eau induit par l'essai d'infiltration est représentée de manière schématique par quelques cellules du modèle qui deviennent successivement plus conductrices électriquement au cours du temps. Cet article vise également à démontrer que la méthode TL-ERT est capable de distinguer différents types d'écoulement d'eau au sein du recouvrement et donc peut être utilisée comme méthode de suivi.

### **2.3.2 Article 2: Intégration de la modélisation hydrogéologique dans l'interprétation des données ERT**

Ce deuxième article, soumis à la revue *Vadose Zone Journal*, synthétise l'ensemble des travaux de maîtrise réalisés à la suite de la campagne de terrain. Il répond aux **OS2** et **OS3**, en traitant de l'analyse et de l'interprétation des données selon deux approches : l'approche conventionnelle, reposant sur l'inversion géophysique des données corrigées de la température et une approche novatrice de l'article, présentée comme une preuve de concept, basée sur une interprétation conjointe des résultats à partir d'un modèle hydrogéologique de SEEP/w calibré à l'aide de sondes de teneur en eau. Cette seconde approche présente un intérêt particulier dans le contexte de cette étude, en raison de la faible épaisseur du recouvrement et des forts contrastes de résistivité entre les couches, qui nécessiterait l'introduction de nombreuses contraintes dans une inversion classique pour obtenir une solution réaliste.



## CHAPITRE 3

### NUMERICAL FEASIBILITY STUDY ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS AS AN AUTONOMOUS MONITORING METHOD FOR MINE COVER SYSTEMS REDUCING WATER INFILTRATION

Leila Bedoui<sup>1</sup>, Adrien Dimech<sup>1</sup>, Vincent Boulanger-Martel<sup>2</sup>, Bruno Bussière<sup>2</sup> and Benoît Plante<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

<sup>2</sup>Institut de recherche en mines et environnement, UQAT,  
Rouyn-Noranda, Québec, Canada, J9X 5E4

Paper published in *GeoMontreal Proceedings*, September 2024.

Ce chapitre vise à répondre à l'OS1, qui concerne la réalisation d'un modèle numérique géophysique simplifié du recouvrement, intégrant une représentation schématique de l'écoulement de l'eau. À partir de ce modèle, des données synthétiques sont générées avec Pygimli en faisant varier différents paramètres (espacement des électrodes, protocole de mesure, type d'inversion), afin de déterminer la configuration la mieux adaptée pour suivre l'écoulement. Le chapitre illustre également que la méthode TL-ERT est capable de distinguer différents types d'écoulement d'eau, latéral et vertical, et peut ainsi être utilisée comme méthode de suivi pour analyser la performance d'un recouvrement.

**Résumé:** La génération de contaminants provenant de la circulation de l'eau dans les résidus miniers constitue un défi environnemental critique pour l'industrie minière. Une approche pour contrôler la problématique environnementale consiste à installer un système de recouvrement visant à limiter l'infiltration de l'eau vers les résidus et ainsi d'éviter la lixiviation de ces derniers. Dans ce contexte, la tomographie de résistivité électrique est un outil pertinent pour caractériser la performance des systèmes de recouvrements à grande échelle. Cet article

présente une étude de faisabilité préalable à la construction et l'instrumentation de cellules de terrain à l'échelle pilote dans laquelle des jeux de données géophysiques synthétiques ont été générés afin d'identifier les paramètres d'acquisition les plus appropriés. Les résultats préliminaires suggèrent qu'un espacement de 1 m entre les électrodes serait le plus adéquat dans ce contexte.

**Abstract:** The generation of large quantities of mine tailings following the production of certain metals, represents an environmental issue, due to the presence of contaminants in the tailings, whose concentrations can occasionally exceed environmental standards in drainage waters. One approach to controlling environmental problems of a tailings storage facility is to install covers designed to limit the infiltration of water into the tailings, thereby avoiding the risk of groundwater contamination. In this context, electrical resistivity tomography is a relevant tool for characterizing the performance of large-scale cover systems. This article presents a feasibility study prior to the construction and instrumentation of pilot-scale field cells in which synthetic geophysical datasets were generated in order to select the most appropriate data acquisition parameters. Preliminary results suggest that an electrode spacing of 1 m would be adequate in this context.

### 3.1 Introduction

#### 3.1.1 Context

The tailings generated by mining and metallurgical activities are usually stored in tailings storage facilities (TSFs), which can have pore-water that contains contaminant concentrations exceeding environmental regulations. To avoid the potential contamination of the receiving environment, several mine waste management and reclamation practices have been developed over the years (Bussière & Guittonny, 2021a). Previous studies have demonstrated the effectiveness of multilayer cover systems to control water infiltration into TSFs. These mine reclamation structures are acting as a barrier to water infiltration and are designed to ensure

the geochemical stability of mine tailings, thus avoiding the production of contaminated mine drainage (Aubertin, 1995; Aubertin et al., 2015; Bussière, 1999; Bussière et al., 2021). Inclined covers with capillary barrier effects (CCBE) (Aubertin, Bussière, & Chapuis, 1998; Aubertin et al., 2009) and low saturated hydraulic conductivity covers (LSHCC) (Maqsoud et al., 2021) are among the options to control water infiltration. The inclined CCBE principle involves interposing a layer of fine-grained (high air-entry value and low saturated hydraulic conductivity) material (silt, sandy-silt or silty-sand), between two coarse-grained (low air entry-value and high saturated hydraulic conductivity) layers made of coarser materials (coarse sand or gravel). Due to capillary barrier effects, the water flows laterally downslope reducing the infiltration into the mine waste (Bussière, 1999). The LSHCC is a multilayered cover system where layers of coarse-grained materials are used as support and drainage layers and a low saturated hydraulic conductivity material is used to control water infiltration. The latter can be made of fine-grained natural materials (e.g. compacted clay) or with geosynthetics such as geomembranes or geocomposite clay liners (GCLs) (Maqsoud et al., 2021).

### **3.1.2 Cover monitoring techniques**

To ensure that these structures behave properly, and to detect any anomalies in their design, it is necessary to monitor water movement in these cover systems. The main parameters to be taken into account for monitoring purposes usually include volumetric water content and matric suction. These are conventionally measured using instruments such as volumetric water content sensors, tensiometers and lysimeters permanently installed in the covers (Bussière et al., 2021). More recently, Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (TL-ERT) is being used to complement local sensor measurements in the monitoring of the hydrogeological behavior of engineered cover systems (Dimech, 2018; Dimech et al., 2022; Dimech et al., 2023; Maqsoud et al., 2011). The advantage of such method lies in its ability to provide imagery of water distribution and movement in the medium with greater spatial resolution and investigation volume than in the case of conventional measurements.

More specifically, the ability of the TL-ERT method to autonomously and continuously image the spatio-temporal distribution of water in unsaturated medium depends on several parameters

such as the spatio-temporal resolution, which is partly controlled by the number and spacing of electrodes, the resistivity contrasts between water and cover layers, and the cover geometry (Bussière et al., 2021; Dimech et al., 2022). Consequently, the quality and reliability of the results obtained during field campaigns depends on the choice and optimization of these parameters. It may therefore be important, prior to any field instrumentation, to properly configure TL-ERT monitoring according to the specific objective. One way of maximizing the success of a measurement campaign is to carry out a numerical feasibility study beforehand. J. Robinson et al. (2020) successfully performed such feasibility study for the monitoring of a nitrate plume at a contaminated site. However, to the knowledge of the authors, no feasibility study has been carried out for monitoring water movement in engineered mine cover systems. Thus, this article presents the preliminary results of geophysical simulations performed to highlight the importance of a feasibility study, from both a geophysical and hydrogeological perspective. This study investigates a localized, drop-by-drop tracer injection water infiltration scenario to be considered in the field. This scenario is inspired by the work of researchers who used TL-ERT method in different contexts. On one hand, Hübner et al. (2017) and Dimech et al. (2019) performed controlled irrigation episodes to study water propagation on a layered hillslope and in a mining cover, respectively. On the other hand, J. Robinson et al. (2020) and Lamb et al. (2019) monitored, following a tracer injection, the propagation of a nitrate plume caused by a nuclear waste facility and intensive farming, respectively. In this study, the aim of the simulation is to determine the combination of geophysical parameters that best reproduce the progression of water flow within the cover layers. This case study is inspired from a real field application where an inclined CCBE is used to control water infiltration into a filtered TSF.

## 3.2 Materials and methods

### 3.2.1 Tested cover configuration

The tested cover configuration is made of four successive layers, consisting, from top-to-bottom, of a 30 cm thick plant substrate, a 20 cm thick layer of gravel, a 30 cm thick moisture-retaining layer made of silt, and a 20 cm thick capillary break layer made of gravel (Figure 3.1). The cover system is installed on a 7% slope.

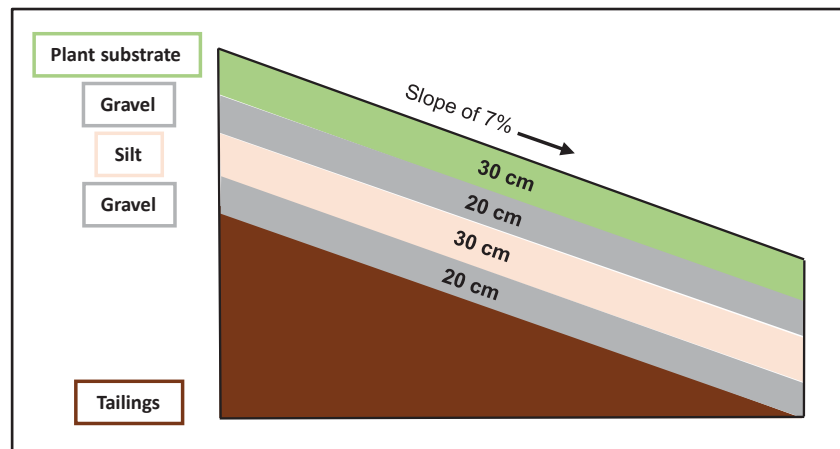


Figure 3.1 Schematic representation of the inclined CCBE selected for one of the field experimental tests

The hydrogeological performance of such cover system is essentially based on the contrast in hydrogeological properties between each cover layers. The specific role of each layer, from the surface to the tailings, is as follows (Aubertin et al., 2015; Demers & Pabst, 2021b):

- The plant substrate is a growth medium for vegetation that also acts as a protective layer against water and wind erosion.
- The first layer of gravel is a drainage layer that has a high saturated hydraulic conductivity and a low air-entry value. This layer is used to favour lateral water flow and protect the silt layer from vertical water flow by capillary rise.
- The silty moisture-retaining layer is a high air-entry value and low-permeability layer that acts as the main barrier to water infiltration towards the tailings. The capillary barrier effects

created at the interfaces with the two coarse-grained gravel layers reinforces its capacity to divert water laterally.

- The gravel capillary break layer provides capillary barrier effects with the overlying silt layer. This layer also prevents potential migration of the contaminants from the tailings to the surface.

### 3.2.2 Feasibility study for geophysical imaging

This feasibility study uses an upstream approach (i.e. prior to field investigation) to assess the optimum TL-ERT parameters for monitoring water flow within the tested CCBE configuration. This is achieved using numerical simulation performed with the pyGIMLI/BERT numerical code, an open-source software package for geophysical modelling and inversion (Rücker et al., 2017). The approach that was followed is summarized in Figures 3.2 and 3.3, which show the main experimental steps that were followed:

- i. Creation of a simplified geometry representing the inclined CCBE and a schematic representation of water flow (Figure 4.3). The resistivity values assigned to each of the elements of this geometry are as follow:
  - Silt/Plant substrate: 50  $\Omega$ .m
  - Gravel: 300  $\Omega$ .m
  - Highly conductive tailings: 3  $\Omega$ .m
  - Highly conductive water: 10  $\Omega$ .m

The choice of initial resistivity values for the different layers is based on the table taken from Samouëlian et al. (2005) which correlates each type of porous medium with a range of corresponding resistivity values. The work of Dimech et al. (2024); Dimech et al. (2019); Dimech et al. (2023) also provides an order of magnitude of resistivity values specific to the mining environment. For the tracer used to simulate a point precipitation event, a value of 10  $\Omega$ .m, characteristic of saline water, was selected. The advantage of injecting a highly conductive tracer in a localized manner is to increase the contrast of resistivities with the surrounding medium, and thus to detect the flow path more easily within the material layers.

The simulations assume that all layers in contact with the tracer take on a resistivity value of 25  $\Omega$ .m. This is a simplification of Archie's law, which states that for water-saturated porous media, the resistivity of the medium differs from that of the interstitial fluid, due to the type of particle size, porosity, mineralogy and specific surface area among other factors.

It should be noted that, in the context of this modeling work, steady-state monitoring of rainwater at around

100  $\Omega$ .m would have produced a much weaker contrast that would have been difficult to detect.

ii. Creation of the TL-ERT 2D model to simulate synthetic data:

- Arrangement of electrodes along the slope at a depth of 0.12 m in the plant substrate, with different electrode spacing.

This depth corresponds to 60% of the buried part of the electrodes, i.e. around 20 cm.

This correction is applied when the ratio between electrode depression and electrode spacing is greater than 20%. Indeed, according to Rucker et Günther (2011), the approximation of electrodes by points during modeling (Point Electrode Model) can, in some cases, lead to a biased interpretation, as the finite size of the electrodes affects the electrical measurement.

- Measurement protocol.

The measurement protocol corresponds to the way in which four electrodes - two injection electrodes and two potential measurement electrodes - are arranged to obtain a resistance value in a given location, which is then converted into an apparent resistivity value. For a 2D acquisition, the same process is repeated for each quadrupole of the profile. The different arrangements between injection and potential measurement electrodes lead to a multitude of protocols such as Dipole-Dipole, Wenner, Schlumberger etc., each with their own advantages and limitations. The Dipole-Dipole protocol is chosen for this study because of its sensitivity to lateral variations (Stummer, Maurer, & Green, 2004).

iii. Synthetic TL-ERT data generation

- Calculation of apparent resistivity values, which mimic the data that could have been obtained by measuring directly in the field with a resistivity meter device. A noise is added to the synthetic data to better represent field condition. This noise added can be of two types, absolute or relative, meaning respectively that its value

is independent of the original signal amplitude, or that it is relative to the signal amplitude.

- iv. Synthetic TL-ERT data inversion
  - Use of the inversion algorithm, an iterative optimization process that recovers a distribution of resistivities in a discretized medium by minimizing the error between calculated apparent resistivities and simulated synthetic data.

### 3.2.3 Tested scenarios

Two infiltration scenarios are tested for the different simulations. A first for which water flow occurs laterally in the first gravel drainage layer (which would be representative of an efficient cover diverting laterally most of precipitation water toward the bottom of the slope), and second, for which water flow occurs mostly vertically until it reaches the tailings (which would represent a lower performance). Table 3.1 and Table 3.2 summarize the main parameters considered in the pyGIMLI/BERT numerical code and their associated values for each of the two scenarios. The noise parameter is based on a model of the form “ $a+bR$ ” according to Koestel et al. (2008), where “ $a$ ” is the absolute error corresponding to the uncertainty of the measuring device and “ $b$ ” is the relative error. More details on the significance of the other parameters can be found in the work of Johnson et al. (2012).

## 3.3 Numerical results

### 3.3.1 Ability of geophysics to detect different hydrogeological behaviors within the cover

Figure 3.2 below summarizes the geophysical modeling approach for the two infiltration scenarios mentioned above. The inversion results at the end of the tracer flow obtained for an electrode spacing of 1 m show that geophysical monitoring enables the two flow paths to be distinguished. The ratio, corresponding to the division between the calculated resistivity model at an instant  $t$  following tracer injection and the initial calculated resistivity model before tracer

injection, visualizes the change in resistivities as the tracer passes through the first two layers for lateral flow and each of the four layers for vertical infiltration. A ratio below 1.0 indicates a decrease of resistivity and above 1.0 an increase of resistivity. In this way, the ratio provides clearer information on the dynamics of water flow over time since the initial resistivity of the layers are less taken into account.

Figure 3.3 illustrates the importance of geophysics for monitoring the hydrogeological behaviour of cover systems, as it enables to obtain large-scale images of water flow and thus assess the effectiveness of the cover.

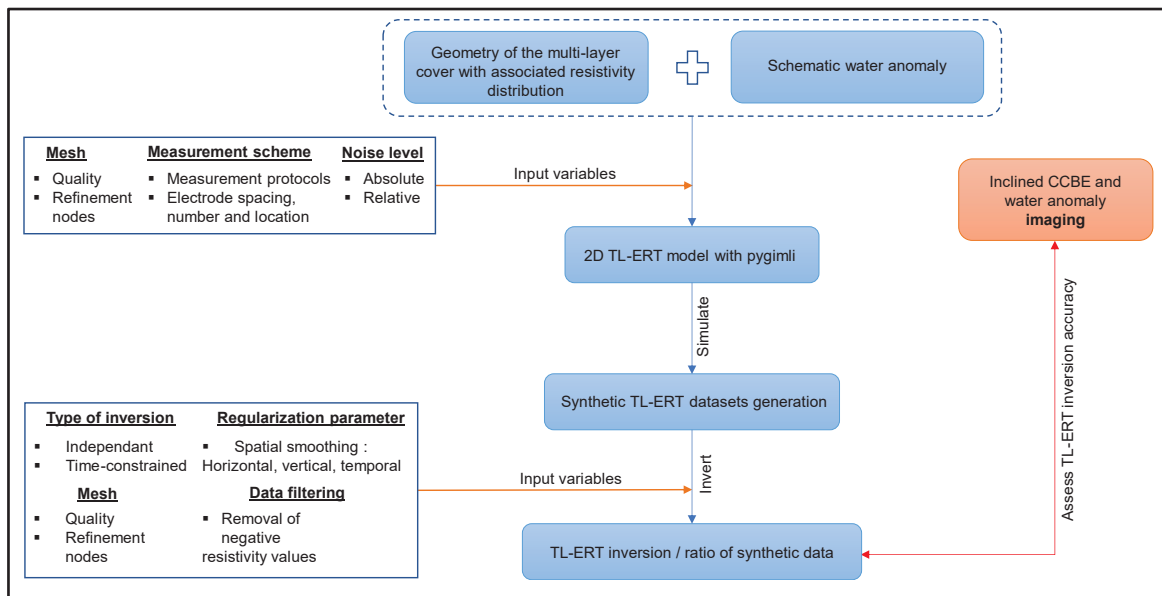


Figure 3.2 Feasibility study approach inspired by Robinson et al. (2020)

Table 3.1 Geophysical parameters and their associated values

Profile length (m)	Number of electrodes	Electrode spacing (m)	Measurement protocol
64	128	0.5	Dipole-Dipole
	64	1	
	16	4	

Table 3.2 Modelling parameters and their associated values

Noise level		Mesh quality		Refinement nodes		Regularization	
a (absolute)	b (relative)	Model	Inversion	Model	Inversion	$\lambda^1$	z-weight <sup>2</sup>
( $\Omega.m$ )	(%)	28	33	14 897 <sup>3</sup>	11 265 <sup>3</sup>	100	0.1
1 <sup>e</sup> -6	1						

<sup>1</sup> Horizontal regularization

<sup>2</sup> Vertical regularization

<sup>3</sup> Values obtained for a spacing of 0.5 m, i.e 128 electrodes

### 3.3.2 Importance of electrode spacing for flow monitoring

Figure 3.4 below indicates that changing electrode spacing along the profile has the effect of modifying spatial resolution and depth of investigation. Electrode spacings of 0.5 and 1 m enable tracer propagation to be observed, whereas the 4 m spacing does not give adequate vertical resolution during the injection of the saline water tracer. Thus, Figure 3.4 highlights the importance of the choice of electrode spacing. Depending on the chosen electrode spacing, the tracer's propagation in space and time will be followed more or less precisely. More generally, it underlines the importance of a feasibility study before installing instrumentation, as only certain cases will allow us to follow the flow of water in the covers.

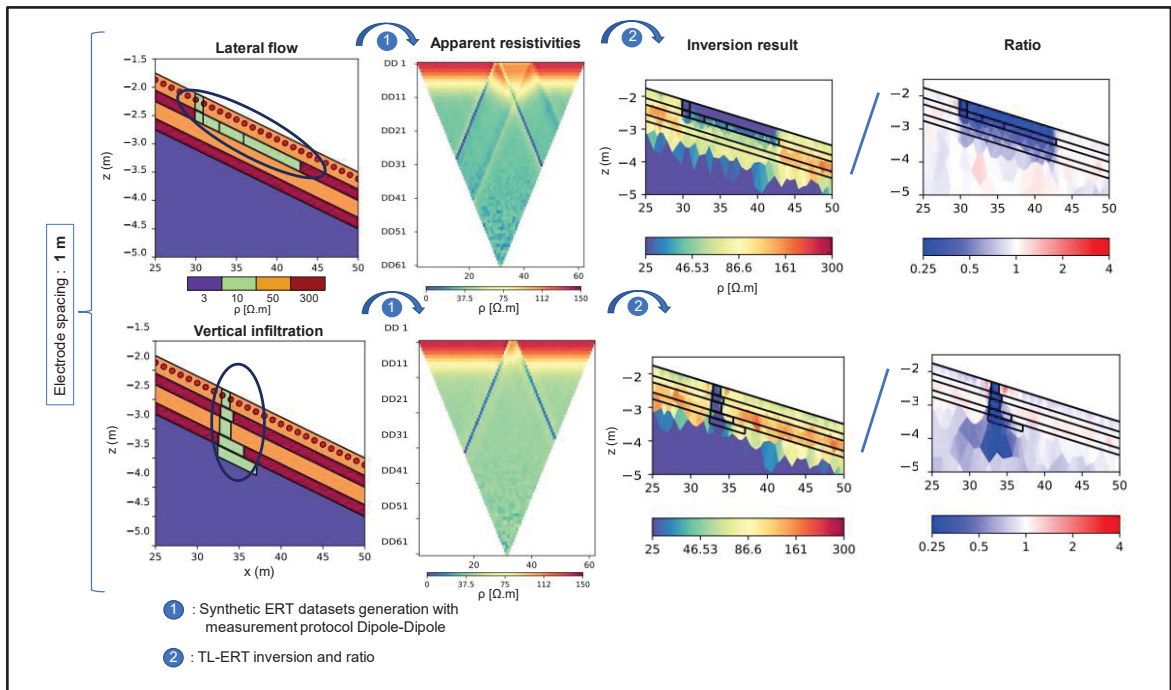


Figure 3.3 Simulation of synthetic data sets for two flow cases and inversion/ratio results

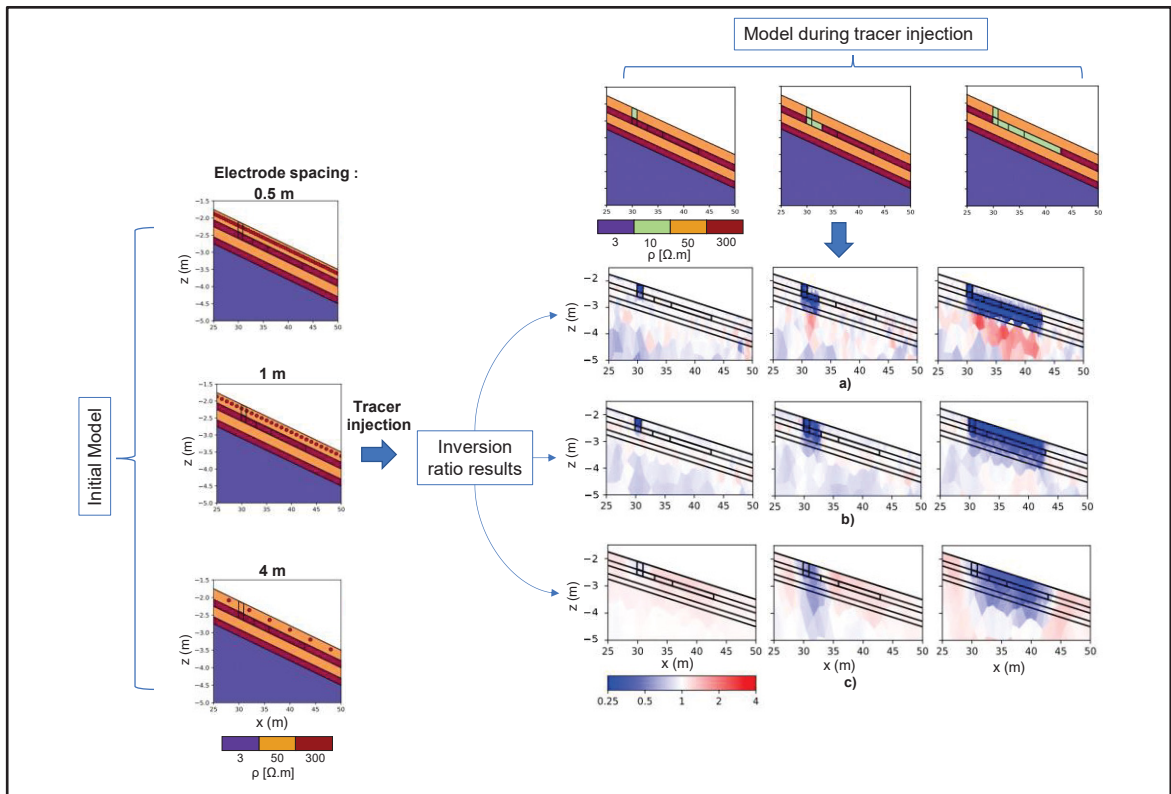


Figure 3.4 Inversion ratio results over time for different electrode spacings  
**a): 0.5 m; (b): 1 m and (c): 4 m**

### 3.3.3 Impact of mesh quality

The results in Figure 3.5 show the impact of mesh quality on inversion results. Indeed, the number of cells in the mesh influences both the calculation time during the inversion process and the accuracy of the final inversion model. A low number of cells, and consequently a low-quality mesh, will give fast but less accurate results, and vice versa. A compromise must be found between calculation time and accuracy of results. In this case, the coarser mesh provides information that are globally similar to that of the finer mesh, and in much less time. The inversion results corresponding to the two infiltration scenarios were calculated in 3h02 on a 13<sup>th</sup>-generation Intel Core i7-1370P processor for a mesh of 21,560 cells, compared with 10h09 for a mesh of 158,032 cells. Thus, at the feasibility study stage, selecting a coarse mesh is sufficient to reach modelling objectives and minimize computing time.

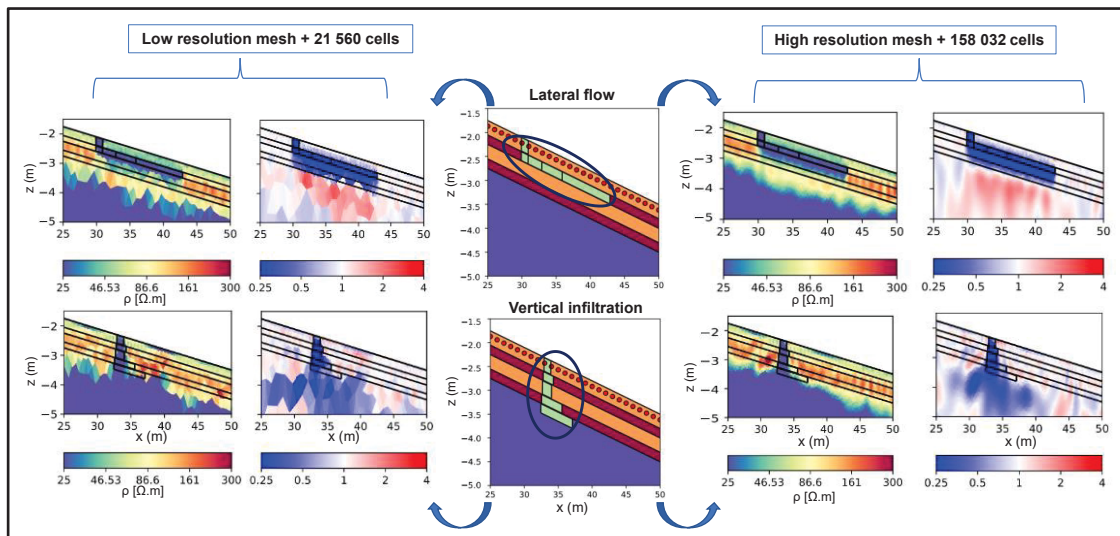


Figure 3.5 Inversion results for two mesh refinements with 0.5 m electrode spacing

## **3.4 Discussion**

### **3.4.1 Choice of instrumentation**

A spacing of 1 m should be used to set up the device in the field, even if the resolution and reconstruction of resistivity values of the cover layers is slightly better with a spacing of 0.5 m. This choice is made to obtain the right balance between the quality of the results obtained and the length of the profiles investigated. In our study, the emphasis is on the surface area covered by the measurements, which is why a wider spacing was chosen.

However, the results obtained underline the fact that it is not possible to completely reproduce the initial resistivity of each of the layers and therefore to know the water content at every point of the cover, regardless of the resolution chosen. This can be explained, on the one hand, by the very thin thickness of the layers and, on the other, by the significant resistivity contrast between them. Thus, the values of the parameters chosen for the simulations are only intended to identify the path of the tracer.

### **3.4.2 Limitations of the study**

The feasibility study presented in this article has its own limitations. Firstly, the scenarios considered for the simulations and the cover geometry are highly simplified.

The fact that the degree of saturation is the same for all layers when the tracer is injected (i.e. they all have the same Archie's law formation factor of 2.5) is also a simplification. Besides, another limitation of the model is that the resistivity value of 10  $\Omega$ .m associated with the tracer region does not take into account the resistivity value of this same region before the passage of the tracer.

In addition to that, the inversion results contain “inversion artifacts”, i.e., variations in resistivity at locations where no change is expected from the models (Clément, Descloitres, Günther, Ribolzi, & Legchenko, 2009; Descloitres et al., 2008). These artefacts are mostly reflected by an increase in the resistivity ratio with an electrode spacing of 0.5 m. The use of sequential TL inversion, which realizes an independent inversion at each timestep, can sometimes increase the proportion of artefacts. This is partly due to the fact that the inversion

result of the first dataset is taken as a reference model. As considered by Hayley et al. (2011), the type of TL inversion method chosen can impact the quality of the results (i.e. the proportion of artefacts). Indeed, by contrasting “sequential” with “simultaneous” inversion, he shows that sometimes the latter, which consists in inverting all timesteps together with constraints along the spatial and temporal dimensions is more efficient.

Another limitation that emerges from the simulations is that the tailings layer ratio result is less than 1, whereas tailings become more resistive after salt water injection (from 3  $\Omega$ .m to 25  $\Omega$ .m). This shows that the analysis of cover efficiency cannot be based on the values of inverted resistivity in the tailings, but rather on the dynamics of resistivity variations.

Finally, in order to assess the accuracy of the TL-ERT monitoring method, it would then be necessary to compare the final inversion model resulting from the simulations with synthetic ERT data obtained from hydrogeological modelling (J. Robinson et al., 2020).

### **3.4.3 Future work**

In fall 2024, a TL-ERT monitoring system similar to that of Figure 3.6 will be used to assess the performance of a field experimental cover system. The TL-ERT monitoring system will be tested and installed with the electrode configuration optimized in this study. Continuous and autonomous data acquisition in the field will require the conception of conductive tracer drip irrigation systems and the automation of TL-ERT measurements using the methodology proposed by Dimech et al. (2024) and Chambers et al. (2022). Alongside the measurement campaign, petrophysical characterization of tailings and cover materials based on the methodology developed by Dimech et al. (2023) will be realized in order to convert electrical conductivity images into water content images during data processing. In addition, emphasis will also be placed on improving this feasibility study by taking account of hydrogeological processes in infiltration scenarios. This will be achieved by running simulations with SEEP/W, part of the GeoStudio integrated geo-engineering software.

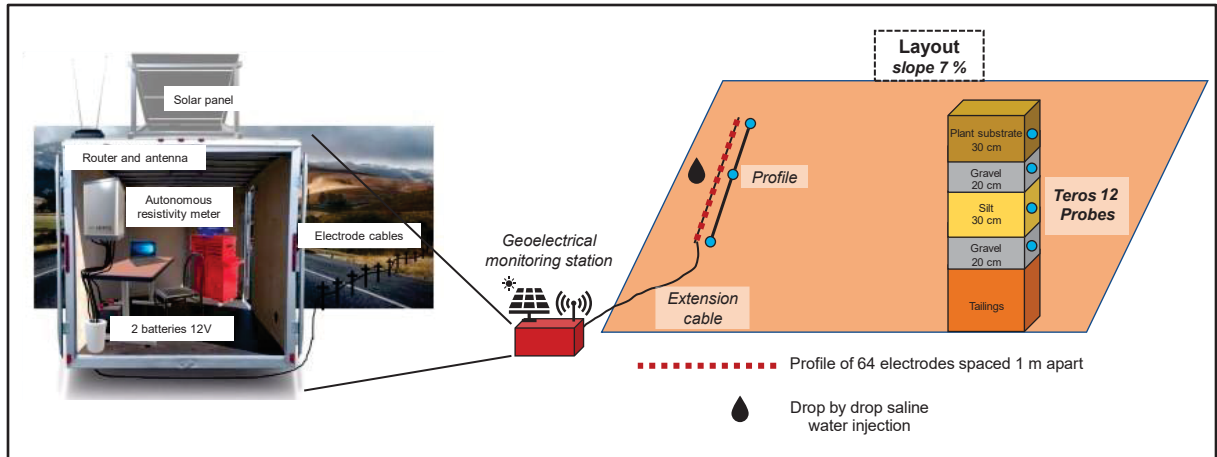


Figure 3.6 Schematic of the geophysical instrumentation and its location in the different cover configurations

### 3.5 CONCLUSION

The aim of this article was to study, prior to any field campaign, the feasibility of monitoring water in a cover system using the TL-ERT method.

Preliminary results suggest that, following injection of a conductive tracer, it is possible to detect different scenarios of water infiltration into the cover with a profile of 64 electrodes spaced 1 m apart.

The next steps will include the installation of field measurement devices and the establishment of petrophysical relationships specific to tailings and cover materials. Besides, hydrogeological simulations will also be carried out to improve the accuracy of the feasibility study.



## CHAPITRE 4

### INTEGRATING HYDROGEOLOGICAL MODELING AND TIME-LAPSE ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY TO MONITOR WATER INFILTRATION IN A MINE WASTE COVER SYSTEM

Leila Bedoui<sup>1</sup>, Adrien Dimech<sup>1</sup>, Karine Sylvain<sup>2,3</sup>, Vincent Boulanger-Martel<sup>2</sup>, Bruno Bussière<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,  
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

<sup>2</sup>Institut de recherche en mines et environnement, UQAT,  
Rouyn-Noranda, Québec, Canada, J9X 5E4

<sup>3</sup>Polytechnique Montréal,  
Montréal, Québec, Canada, H3T 1J4

Paper submitted for publication in *Vadose Zone Journal*, December 2025.

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité du précédent, puisqu'il s'appuie sur les résultats de l'étude de faisabilité numérique (**OS1**) pour guider les mesures réalisées lors de la campagne de terrain. À partir des données collectées sur le terrain, deux types de traitement sont présentés pour interpréter les résultats : l'inversion conventionnelle ERT réalisée avec le logiciel Pygimli, correspondant à l'**OS2**, et le développement d'un modèle hydrogéologique permettant de générer des résistivités apparentes synthétiques directement comparables aux données de terrain sans passer par l'inversion, répondant à l'**OS3**. Ce chapitre a donc objectif de traiter à la fois les **OS2** et **OS3**.

**Plain language summary:** Mine tailings can release contaminated water if rain infiltrates through the cover meant to protect them in the long term. To evaluate how well these covers limit infiltration, we combined computer simulations of water flow with time-lapse electrical resistivity tomography (a geophysical imaging method which is sensitive to soil moisture

variations). We applied this approach to a large pilot cover built on a mine site in Québec and monitored a controlled infiltration test. The geophysical data and simulations showed how water moved within the different cover layers and how effectively the system diverted water toward the downslope portion of the inclined cover instead of letting it infiltrate to the tailings. This noninvasive geophysical technique improves our ability to assess *in situ* cover performance without relying solely on local sensors.

**Abstract:** Tailings storage facilities can raise significant environmental concerns through the generation of contaminated drainage when tailings and contaminated interstitial water come into contact with rainwater and oxygen. Inclined multi-layer cover systems such as covers with capillary barrier effects (CCBEs) are widely used to limit infiltration, and monitoring their *in situ* performance is essential. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) has emerged as a promising, non-invasive technique to track water movement within these systems. However, interpreting TL-ERT data to derive water-content distributions relies on inversion algorithms and petrophysical relationships, both of which introduce uncertainty, especially in thin, multi-layered covers with strong electrical resistivity contrasts. This study presents an alternative approach for interpreting TL-ERT data without conventional inversion. A calibrated hydrogeological model of the multi-layer cover system is used to generate synthetic ERT datasets that are directly compared with ERT field measurements, which makes it possible to mimic the infiltration of water during a controlled infiltration test. The ERT dataset consists of 63 images acquired along a 32 m profile with 64 electrodes spaced 0.5 m apart, installed on a 1m-thick inclined CCBE, which was monitored for eight days. Comparison with conventional ERT inversions indicates that the hydrogeological model provides a more reliable representation of water movement within the cover system during the infiltration test, and a better understanding of the *in situ* behavior of the cover system. The results pave the way for the potential calibration of hydrogeological models designed to assess the efficiency of reclamation covers that aim to reduce water infiltration, using geophysical data as an additional constraint.

## 4.1 Introduction

Cover systems are used in the mining industry to control water contamination from mine wastes (Bussière & Guittonny, 2021a). Most of these covers aim to control water and/or oxygen transport from the surface to the mine waste, or to prevent the contamination of infiltrating rainwater by pore water contained in mine wastes (Plante et al., 2021). Among mine cover systems, covers with capillary barrier effects (CCBE) are recognized as one of the most robust types of cover in a humid climate. They are designed to control oxygen migration from the atmosphere to the tailings by the integration of a moisture-retaining layer (Bussière et al., 2003) with a high degree of saturation. They also limit water infiltration, particularly when they are inclined (Aubertin et al., 2009). Ensuring the long-term performance of such mine cover systems in tailings storage facilities (TSFs) is essential to prevent the subsequent generation of contaminated drainage (Nordstrom et al., 2015; Plante et al., 2021).

Conventional monitoring methods, such as hydrogeological sensors and piezometers, provide valuable point-scale measurements for assessing in situ CCBE performance but are often invasive, costly, and spatially limited (Bussière et al., 2021; Dimech et al., 2022; D. Robinson et al., 2008). These methods have been increasingly complemented by geophysical techniques, particularly time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT), for monitoring cover system performance at the pilot scale (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2019; Dimech et al., 2023; Maqsoud et al., 2011). TL-ERT enables imaging of the spatial distribution of bulk electrical resistivity, which is highly sensitive to changes in volumetric water content ( $\theta$ ), pore water conductivity ( $\sigma_w$ ) and temperature (Archie, 1942; Binley et al., 2015). TL-ERT has been widely applied to monitor transient hydrogeological processes such as water flow and solute transport in structured soils and the vadose zone (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2022; Hübner et al., 2017; Koestel et al., 2008; Lamb et al., 2019; J. Robinson et al., 2020; Singha et al., 2015).

Typically, the interpretation of TL-ERT data follows a two-step workflow. An inversion algorithm reconstructs subsurface electrical resistivity models that best reproduce the

measured ERT data (Loke, 2001). A petrophysical relationship based on Archie's law or derived petrophysical models then converts the inverted resistivity distributions into estimates of  $\theta$ , or other key physical parameter (Dimech et al., 2023; Lesmes & Friedman, 2005). These spatio-temporal distributions of  $\theta$  are then used to assess the hydrogeological behavior of the system (Garré et al., 2013; Hübner et al., 2017). However, this approach introduces three main sources of uncertainty. The inversion of ERT data is inherently non-unique and strongly dependent on regularization parameters and spatial resolution, meaning that multiple resistivity models can fit the same dataset equally well (Singha et al., 2022). Moreover, the petrophysical conversion relies on laboratory or field-derived relationships that may not accurately reflect in situ conditions (Tso et al., 2019). Finally, the spatio-temporal variations of pore water electrical conductivity and temperature are often neglected, or considered through simplistic models, which can increase the error in ERT-predicted  $\theta$  by up to one order of magnitude (Dimech et al., 2023).

Some studies have focused on improving the interpretation from ERT data by combining hydrogeological and geophysical information (Ferré et al., 2009; Hinnell et al., 2010). For instance, joint inversion methods use additional structural information to better constrain the inversion and produce more realistic subsurface models (Johnson et al., 2012; Wagner & Uhlemann, 2021). In addition, coupled hydrogeophysical modeling and data assimilation directly link hydrogeological simulations with geophysical data to improve model accuracy and support environmental monitoring (Bouzaglou, Crestani, Salandin, Gloaguen, & Camporese, 2018; Isabelle, 2022; Looms, Binley, Jensen, Nielsen, & Hansen, 2008; Looms, Jensen, Binley, & Nielsen, 2008; Tso et al., 2020). Finally, several studies have proposed fully coupled hydrogeophysical strategies which automatically optimize hydrogeological parameters of a model to minimize the difference between field and synthetic geophysical datasets (Hinnell et al., 2010; Pleasants et al., 2022). In this regard, laboratory and field experiments have also helped refine petrophysical relationships and improve the calibration of hydrogeophysical models (Dimech, 2023). In mining environments, incorporating these methods is particularly important - but challenging - because reclamation cover systems are made of several thin layers (typically from 20 cm to 1 m in thickness) and often exhibit sharp

resistivity contrasts (Bussière et al., 2021). In such cases, conventional inversion of ERT data acquired from surface electrodes can tend to over-smooth boundaries between materials, making it difficult to distinguish individual layers (Bedoui et al., 2024).

This study builds on previous research to propose an alternative framework for interpreting TL-ERT data for assessing the performance of a 1 m-thick inclined CCBE placed over tailings. The approach combines geoelectrical monitoring with numerical hydrogeological modeling of a controlled infiltration test followed for eight days with a high spatio-temporal resolution. A hydrogeological model of the inclined CCBE is calibrated using in situ hydrogeological sensors and meteorological data. The model is then used to mimic the controlled infiltration test and to predict spatio-temporal distributions of volumetric water content within the CCBE and the underlying tailings. Volumetric water content distributions are then converted into bulk electrical resistivity to generate synthetic ERT datasets which enable validation of the hydrogeological model by comparing the synthetic and the field ERT datasets, both temporally and spatially across the entire ERT profile. This study demonstrates how integrating TL-ERT monitoring to controlled infiltration test on multilayer cover systems helps assess their performance and can be used as a proxy for refining hydrogeological parameters in hydrogeological models.

## **4.2 Site description**

### **4.2.1 Study area**

The study site is a 200-hectare tailings storage facility (TSF) in operation since 1936 located in Jonquière, Quebec, Canada, as shown in Figure 4.1a. The tailings are fine particles generated during the transformation of bauxite into alumina via the Bayer process (G. Power et al., 2011). From the start of operations to 2020, tailings were deposited as conventional tailings. Then, to increase capacity and the service life of the TSF, the deposition method transitioned to filtered tailings. In preparation for the reclamation of the TSF, three pilot-scale cover systems designed to limit water infiltration were constructed in 2023-2024 on a 3.5 ha section of the TSF (Figure

4.1a). These experimental covers were constructed to gain valuable knowledge on the in situ behavior and performance of the tested cover systems to limit water infiltration from the atmosphere to the tailings under real meteorological conditions and at a large scale. Results of these experimental cells will guide the final full-scale reclamation of the TSF. At this site, long-term climate records from 1942-2022 indicate a mean annual precipitation of approximately 925 mm, with mean annual temperature near 6°C, and extremes ranging from -25°C to 34.5°C.

#### **4.2.2 Cover system description**

This study focuses on one of the experimental cover configurations constructed on the 3.5 ha section of the TSF; a 1m-thick inclined CCBE with a slope of 7% which covers approximately 0.6 ha (Figure 4.1b). The CCBE is composed of four successive layers, from the surface to the bottom: a 30cm-thick overburden layer which aims to promote vegetation development (green layer on Figure 4.1c), a 20cm-thick coarse material layer characterized by high hydraulic conductivity and a low air-entry value, which aims to divert the water laterally toward the bottom of the slope (grey layer on Figure 4.1c), a 30cm-thick fine material layer playing the role of a moisture-retaining layer with low hydraulic conductivity and a high air-entry value (yellow layer on Figure 4.1c), and a final coarse material layer of a minimum thickness of 20 cm, which is expected to act as a capillary break layer (grey layer on Figure 4.1c). The bottom coarse material layer also aims to prevent diffusion-driven upward migration of contaminants from the tailings to the upper cover layers. The cover is placed above at least 10 m of bauxite tailings in this area of the TSF (red layer in Figure 4.1c). The materials were selected for their contrasting hydrogeological properties, which enhance the performance of the capillary barrier by reducing downward water infiltration into the tailings (Aubertin, 1995; Morel-Seytoux, 1992).

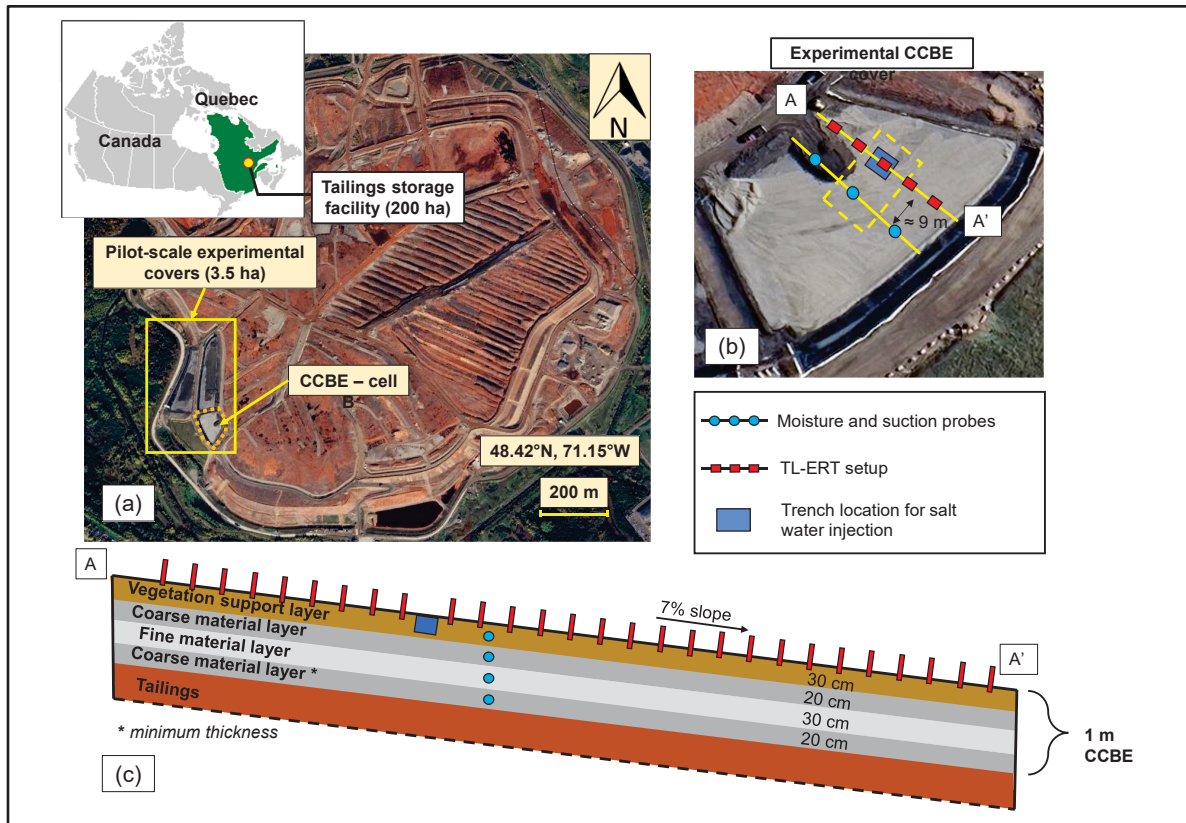


Figure 4.1 (a) Satellite imagery of the 200-ha tailings storage facility located in Jonquière, Quebec, Canada. (b) Schematic view of the experimental CCBE and location of the hydrogeological sensors, the geoelectrical monitoring system and the controlled infiltration test. (c) 2D cross section of the experimental CCBE inclined with a slope of 7%

## 4.3 Materials and methods

### 4.3.1 General workflow of the study

The overall workflow presented in Figure 4.2 combines field geoelectrical monitoring, numerical hydrogeological modeling, petrophysical conversion and synthetic ERT simulations to interpret water infiltration within the multi-layer CCBE during a controlled infiltration test. A controlled test was first carried out on the inclined cover system while high-resolution TL-ERT was acquired along a 32-m long profile, providing the field apparent resistivity dataset at field temperature (denoted as  $\rho_{app,F}T$ ), characterizing the electrical response of the cover under

field conditions. First, the TL-ERT dataset was inverted using a time-lapse inversion strategy to recover the spatio-temporal distribution of inverted resistivity at field temperature (denoted as  $\rho_{inv}T$ ). Temperature correction of inverted models was then applied to recover inverted resistivity at 25°C (denoted as  $\rho_{inv}25^{\circ}\text{C}$ ) and their relative changes over time. The corrected dataset was used as a reference for assessing the advantages and limitations of the hydrogeophysical data processing framework proposed in this study.

Next, a 2D hydrogeological model of the CCBE and underlying tailings was developed and calibrated using *in situ* hydrogeological sensors, laboratory soil properties and local meteorological data. The calibrated model was used to reproduce the infiltration test and compute the spatio-temporal evolution of volumetric water content (denoted as  $\theta$  in Figure 4.2) over the full domain. The simulated fields  $\theta$  were converted into bulk resistivity at 25°C using Archie's law for unsaturated conditions ( $\rho_{25}$ ), then corrected for field temperature  $T$  and interpolated onto a geophysical mesh compatible with ERT forward modeling ( $\rho_{sim}T$ ). Using the same acquisition protocol as in the field, synthetic apparent resistivity datasets (denoted as  $\rho_{app,sim}T$ ) were generated with pyGIMLi for each time step, representing the TL-ERT response that would be measured for the modeled infiltration. These synthetic pseudo-sections were compared to the corresponding field apparent resistivity data  $\rho_{app,F}T$  along the profile and over time by calculating the root mean square error (RMSE) in terms of relative variation from the average of the first 10 acquisitions, providing a direct assessment of the ability of the hydrogeological model to reproduce the observed electrical response while bypassing uncertainties associated with conventional ERT inversion.

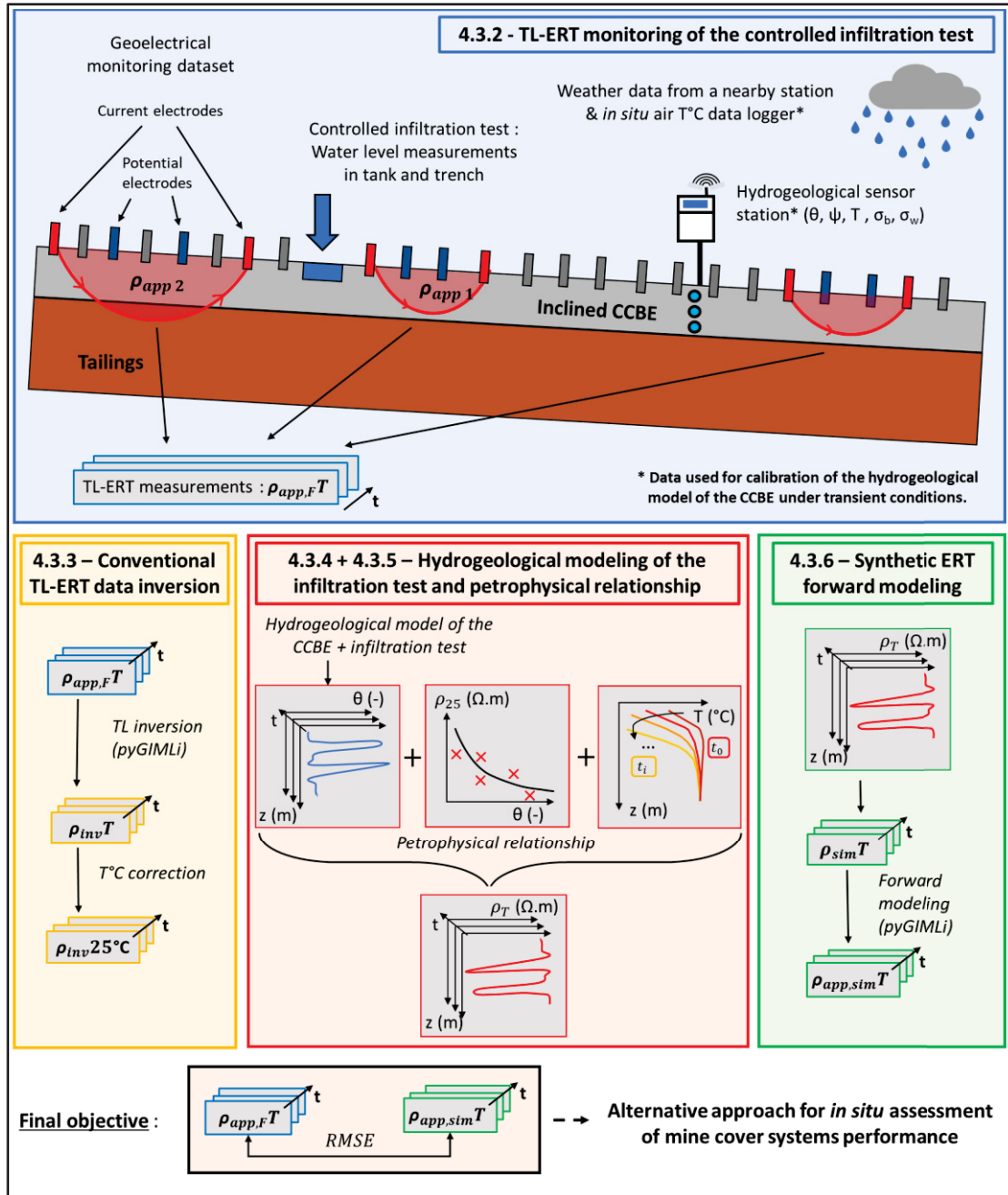


Figure 4.2 Overview of the methodology used to assess the *in situ* behavior of inclined cover system using geoelectrical monitoring. The different parts of this flowchart correspond to the following methodology sections (4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5 and 4.3.6)

### 4.3.2 TL-ERT monitoring of the controlled infiltration test

The geoelectrical monitoring campaign was conducted over a period of eight days, from October 22 to October 30, 2024. It consisted of a 32m-long profile with 64 stainless-steel rod electrodes spaced 0.5 m apart and inserted 15 cm into the CCBE along the slope. TL-ERT data were collected using a SAS4000 Terameter LS resistivity meter, coupled with an ES10-64C multiplexer, and powered by four 100Ah batteries connected in parallel to extend operational autonomy. A Wenner-type measurement configuration was chosen for its relatively short acquisition time of less than one hour for 650 configurations and its good signal-to-noise ratio. In addition, Roy et Apparao (1971) established that the Wenner configuration has the highest vertical resolution with an approximated depth of investigation (DOI) of about  $0.11 \cdot L$ , where  $L$  is the distance between two current electrodes of the Wenner configuration, which was used to design the TL-ERT acquisition strategy. As detailed by Bedoui et al. (2024), this survey design was identified as the most appropriate for tracking water flow during an infiltration event in the experimental CCBE using a numerical feasibility study.

A controlled infiltration test was carried out at the pilot site, one-third along the ERT profile length (Figure 4.3). A 30 cm  $\times$  2 m trench was excavated perpendicular to the electrode line, reaching a depth of 20 cm into the overburden layer. Two successive infiltration tests of approximately 2000 L in total were performed on 23 October, with an infiltration rate of  $2 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup>. The water injected into the cover had an electrical conductivity of 1 mS/cm (i.e., resistivity of 10  $\Omega \cdot$ m), which was similar to the pore water electrical conductivity in the cover system. During the infiltration test, water was stored in a 1 m<sup>3</sup> tote tank and the levels of water in the tank and trench were manually monitored at 1, 2, and 5-minute intervals, following the work of Bréard Lanoix, Pabst, et Aubertin (2020). A constant water head of approximately 6 cm was maintained in the trench by manually adjusting the flow of water injected into the trench from the tote tank. Electrical resistivity measurements were taken hourly from 22–24 October to ensure optimal temporal resolution during the infiltration test (23 October), then every six hours until 30 October. In total, 63 ERT datasets (650 measurements each) were collected, with each acquisition lasting approximately 58 minutes.

The experimental cover was also instrumented with Teros 12 and Teros 21 sensors, at three positions along the slope (top, middle, and bottom) approximately 10 meters away from the ERT profile. These sensors recorded  $\theta$  with an assumed accuracy of  $\pm 0.03$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> as specified by the manufacturer (METER Group Inc.), matric suction, temperature and bulk electrical conductivity at 15 min intervals but were not affected by the water infiltration test due to their distance from the trench and the ERT profile (see Figure 4.1 for details). Therefore, probes were used to investigate the behavior of the cover under normal hydrometeorological conditions and to constrain the hydrogeological model, rather than to track the flow of infiltrated water. Measurements were taken at several depths (i.e., 15 to 90 cm), corresponding to the middle of each cover layer. Finally, a GNSS system (base and rover antenna) was used to georeference the position of each electrode and hydrogeological sensor and material samples from each cover layer were collected in the field for further laboratory analysis.

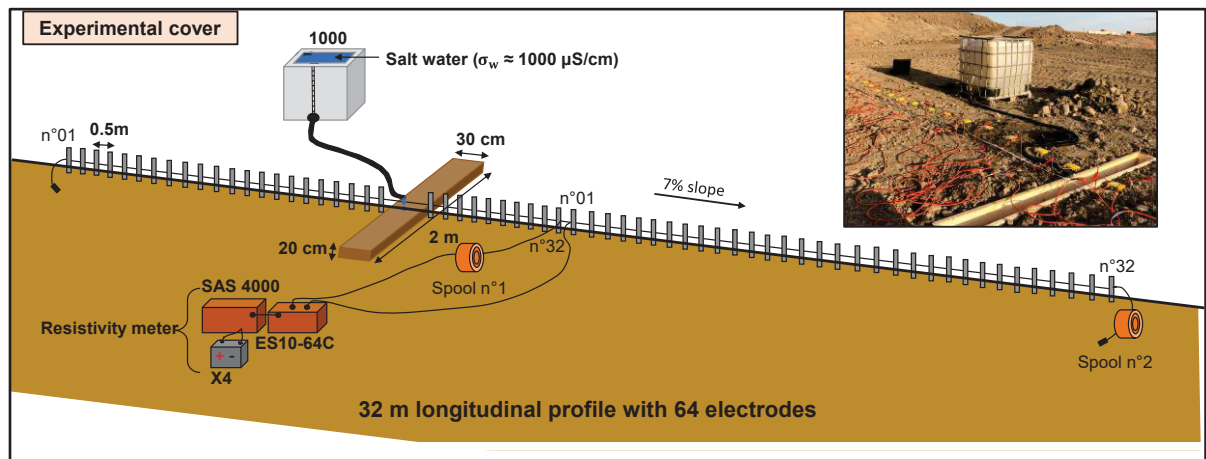


Figure 4.3 Schematic representation of ERT and infiltration tests setup, showing electrode layout, trench geometry and water delivery system used for the controlled infiltration test

### 4.3.3 Conventional ERT data inversion and temperature correction

The aim of geophysical inversion is to find a subsurface model of resistivity that adequately fits the apparent resistivity data. The 63 field apparent resistivity datasets were inverted independently using pyGIMLi, a smoothness-constrained least-squares inversion open-access

software (Rücker et al., 2017). A homogeneous starting model of 189  $\Omega\cdot\text{m}$ , the mean of apparent resistivities, was used for the initial time step and served as a starting point for each of the subsequent time-lapse models. Inversion regularization parameters were held constant for each dataset with a horizontal-to-vertical roughness factor of 0.75 (zweight) and a smoothness factor of 25 (lambda). The mesh consisted of approximately 2000 nodes and 3600 triangular elements. Nodes were added at the surface of the cover between the electrodes to refine the inversion mesh.

As shown in previous studies (Dimech et al., 2023; Hayley et al., 2007; Rein et al., 2004), shallow ERT monitoring experiments are influenced by diurnal and seasonal surface temperature fluctuations. Resistivity typically decreases linearly by approximately 2% per  $^{\circ}\text{C}$  increase in temperature. In our case, significant temperature variations in a short period of time were recorded by Teros 12 sensors, with soil temperature fluctuations reaching up to 15  $^{\circ}\text{C}$  at shallow depths (i.e., contributing to resistivity changes of up to 30%), which must be corrected for. The correction process was conducted in two steps using data from the upper sensor station. The first step aimed to build 63 complete temperature-depth models (i.e., one for each ERT acquisition) based on multilevel temperature measurements at four depths in the mine cover system (15 cm, 40 cm, 65 cm, 90 cm below ground level), assuming a constant temperature of 11 $^{\circ}\text{C}$  during the monitoring period of eight days at 2 m below the surface. Secondly, temperature-depth profiles were used to correct all inverted resistivity models to their equivalent at a reference soil temperature of 25 $^{\circ}\text{C}$ . The correction followed the model proposed by Ma et al. (2011), as shown in Eq. (4.1):

$$\rho_{25} = \rho_T \cdot (1 + t_c \cdot (T - 25)) \quad (4.1)$$

where  $\rho_{25}$  and  $\rho_T$  are the resistivity at a reference temperature set to 25 $^{\circ}\text{C}$  and the resistivity at the in situ soil temperature  $T$  respectively;  $t_c$  is an empirical correction factor equal to 0.02 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

#### 4.3.4 Numerical hydrogeological model

Numerical simulations of water flow within the cover system during an infiltration scenario were carried out using SEEP/W 2024, part of the GeoStudio software suite (Geostudio, 2022). The model represented a simplified 2D domain composed of a 1m-thick engineered inclined cover placed over tailings. The total model length corresponded to the ERT profile measured in the field (i.e., 32 m) and the maximal depth of the model was 15 m. The domain was discretized into 3,124 quadrilateral finite elements and 6,368 nodes. Mesh refinement was applied vertically in the cover layers, with element sizes as small as 0.035 m, while coarser elements (up to 1 m) were used in the deeper tailings layer. The water retention curves (WRCs) and permeability functions of the materials used in the hydrogeological model were initially based on laboratory testing performed on samples similar to the material used to build each layer of the cover system, which are presented in Table 4.1. The WRCs were estimated using the modified Kovacs method, which incorporated the material properties presented in Table 4.1 as input parameters (Mbonimpa, Aubertin, & Bussière, 2006), then fitted using the van Genuchten (1980) model. The permeability functions were obtained using the Mualem (1976) model. Subsequently, WRCs and permeability functions were optimized to achieve a better fit with *in situ* hydrogeological sensors under transient conditions.

Table 4.1 Basic material properties obtained from laboratory measurements.  $k_{sat}$  values were estimated using the modified Kozeny Carman equation for non plastic materials (Mbonimpa et al., 2006) and air entry values (AEV) were determined according to the method of tangents of Fredlund et Xing (1994)

Materials	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	Porosity (-)	Classification (USCS)	$k_{sat}$ (m/s)	AEV (kPa)
Vegetation support layer	0.0013	0.78	0.32	SC	$2 \times 10^{-8}$	30
Coarse material layer	3.2	21.5	0.33	GW	$2 \times 10^{-2}$	0.05
Fine material layer	0.0008	0.17	0.35	CL	$1 \times 10^{-8}$	150

Before simulating the controlled infiltration test conducted during the field campaign, several steps were undertaken to establish realistic initial conditions representative of the site at the time of measurement. The numerical model was initially run to steady state with a water table fixed at approximately 2.5 m below the surface within the tailings layer, which was constrained by field data from piezometers in the area of the experimental cell. Furthermore, a drainage boundary constraint was applied along the right boundary of the model domain within the first one meter from the surface (i.e. in the cover) to ensure that the water flowing within the inclined CCBE does not accumulate within the model domain. The model was subsequently run under transient analysis covering the period from March to December 2024, using climate boundary conditions (called Land Climate Interactions in the software), which included air temperature, precipitation, relative humidity, wind speed, solar radiation and albedo. Hourly weather data came from Environment and Climate Change Canada database from the Jonquière station (station ID: 7060400). Calibration of the hydrogeological model under transient condition was achieved through comparison with  $\theta$  *in situ* measurements from sensors buried within the cover layers, with iterative adjustments of the WRCs and the permeability function constrained by the predicted hydrogeological properties. The calibration period was extended until December 2024 in order to verify the agreement between the simulated and the measured  $\theta$ . From these initial conditions prior to the ERT field campaign, transient analysis simulations were performed adding a localized infiltration rate in the trench for a 4-hour period to mimic the controlled infiltration test which was conducted in the field and results were recorded at the same frequency as the TL-ERT measurements.

#### **4.3.5 Moisture content-resistivity relationship**

Moisture content values were extracted from all nodes across the entire calibrated 2D model domain and for the full duration of the field campaign, which were sub-sampled for the 63 dates corresponding to the 63 individual ERT datasets carried out on the field. The simulated

spatio-temporal  $\theta$  distributions were converted into electrical resistivity at 25°C using Archie's law (Eq. (4.2)), adapted for unsaturated condition and with parameter values described in Table 4.2:

$$\rho_{25} = \rho_w \cdot n^{-m_a} \cdot \left(\frac{\theta}{n}\right)^{-n_a} \quad (4.2)$$

where  $\rho_w$  is the pore water electrical resistivity, which is derived from in situ sensors,  $n$  is the porosity set in the hydrogeological model for each material,  $\theta$  is the moisture content predicted by the hydrogeological model, and  $m_a$  (-) and  $n_a$  (-) are two empirical parameters corresponding to the cementation exponent and the saturation exponent respectively (Samouëlian et al., 2005).

Table 4.2 Archie's parameters values at 25°C based on typical values reported in the literature for materials used in similar CCBE covers (Dimech et al., 2023). Pore water resistivity  $\rho_w$  was derived from *in situ* bulk electrical conductivity measurements recorded by Teros 12 sensors at various depths, following the methodology described by (Dimech et al., 2019).  $\theta$  was obtained from the water content values extracted from SEEP/W

Parameters	$m_a$	$n_a$	$n$	$\rho_w$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\sigma_w$ (mS/cm)
Overburden	2	2	0.35	10	1
Coarse material	2	2	0.33	10	1
Fine material	2	2	0.4	4	2.5
Tailings	1.22	3.45	0.58	2.5	4

#### 4.3.6 Synthetic apparent resistivity data generation

The spatio-temporal distributions of bulk electrical resistivity predicted from modeled  $\theta$  at 25°C were corrected to the field temperature  $T$  that was measured by hydrogeological sensors at different depths, following Equation (4.1). These resistivity distributions were then used as the basis for generating synthetic apparent resistivity data using the pyGIMLi library and

forward modeling. The mesh employed for ERT forward modeling was a hybrid structure, composed of a regular quadrilateral grid within the cover system and triangular elements elsewhere in the surrounding domain. In total, it consisted of approximately 20,000 elements. To replicate field acquisition conditions, the field ERT protocol was integrated into the pyGIMLi simulation to ensure that the synthetic data matched the field dataset in both number and configuration.

## 4.4 Results

### 4.4.1 Conventional inversion of the TL-ERT dataset

Time-lapse inversion results are first presented as a 2D inverted model showing the initial state of the multilayer cover system acquired prior to the controlled infiltration test (Figure 4.4a). This model presents, from top to bottom, a 50 cm-thick low-resistivity layer of approximately 50 to 100  $\Omega\cdot\text{m}$ , followed by a more resistive layer from 50 cm to approximately 2 m below ground level (from 200 to above 500  $\Omega\cdot\text{m}$ ), followed by a transition to a low resistivity layer ( $< 25 \Omega\cdot\text{m}$ ).

Figure 4.4b presents temporal variations of inverted resistivity corrected to 25 °C which were extracted at three different locations along the 2D profile, respectively above the trench ( $x = 3$  m), at the location of the trench ( $x = 11$  m) and below the trench ( $x = 25$  m), for different depths (respectively at 15 cm, 40 cm, 65 cm and 90 cm below the surface of the cover). Relative resistivity variations show the impact of the controlled infiltration test on the spatio-temporal distribution of inverted resistivity. No significant change in inverted resistivity is observed 8 m upstream of the trench ( $< 10\%$ ) at the virtual-sensor location. In contrast, a strong decrease of inverted resistivity (approximately 50% drop) occurs directly beneath the trench following the infiltration test. This sharp decrease follows each one of the two stages of the infiltration test separated by

2 hours (1 000 L each) before going back to its initial value after approximately 8 days. Interestingly, a less pronounced decrease of inverted resistivity is observed downstream of the

trench (between 15 % and 25 % decrease) suggesting that the geoelectrical monitoring is sensitive to the lateral deviation of the infiltrating water. TL-ERT reveals that the downslope decrease of resistivity occurs quickly after the beginning of the infiltration test as it can be observed on the 2D resistivity ratio model obtained eight hours after the beginning of the first infiltration test (Figure 4.4b). Although these results indicate that geoelectrical monitoring is sensitive to water infiltration and lateral diversion toward the bottom of the slope in the inclined cover system, it can be noted that the spatial resolution of the inversion is too low to image adequately the thin layers of the cover, which can limit the hydrogeological value of the conventional inversion procedure. This observation supports the need for a more sophisticated processing of the TL-ERT data.

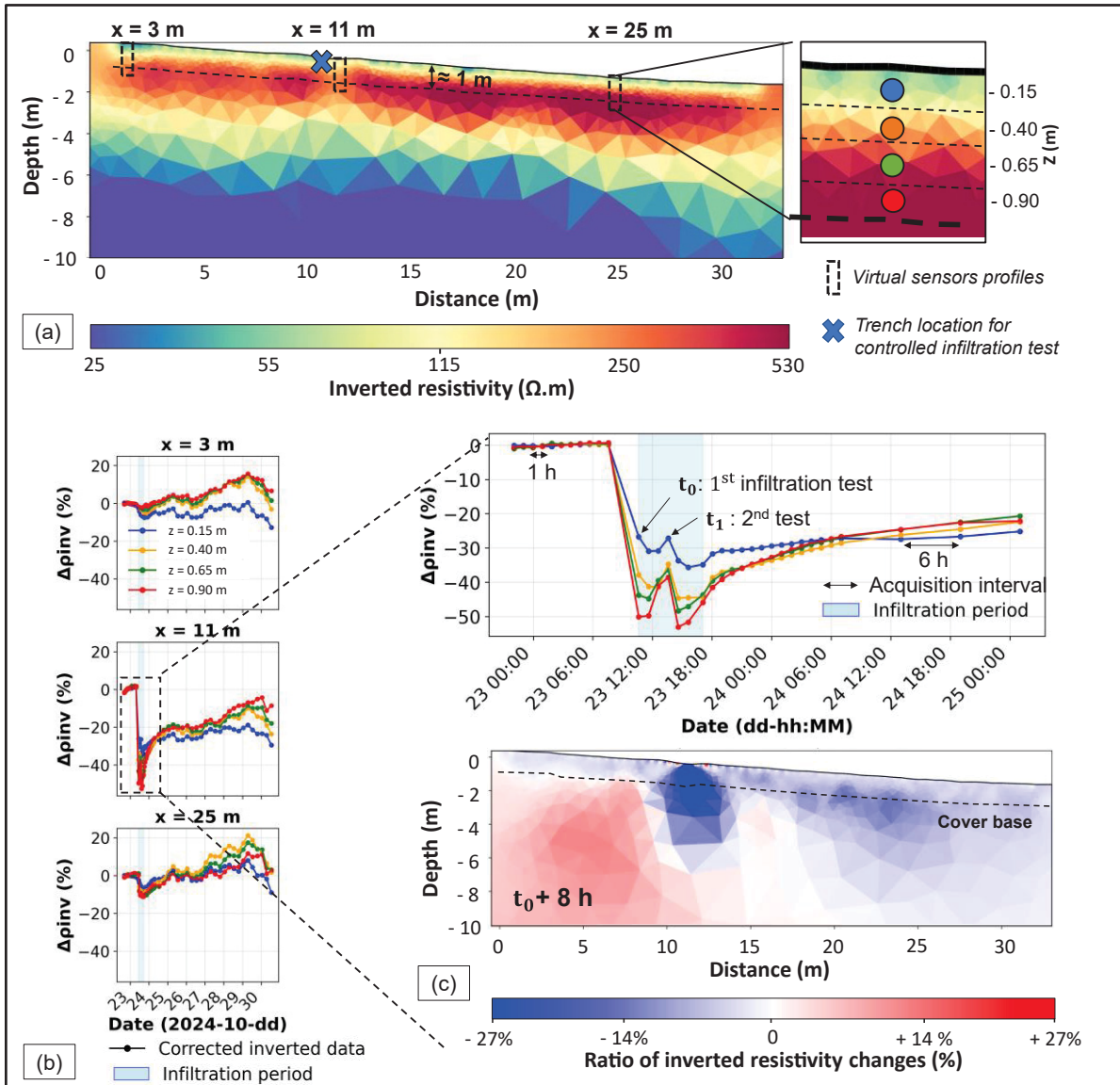


Figure 4.4 Inverted resistivity results from the monitoring campaign: (a) a 2D inverted resistivity distribution showing three vertical virtual sensor profiles located above the trench, close to the trench and downslope from the trench; (b) temporal evolution of inverted resistivity corrected at 25°C at the sensor positions for the three locations, and (c) close-up of infiltration test with the corresponding 2D resistivity ratio 8 hours after the first infiltration event

#### 4.4.2 Hydrogeological model calibration

Figures 4.5 and 4.6 respectively present the calibrated hydrogeological properties of the materials in the numerical model and the results of the uncalibrated and calibrated models in terms of simulated moisture content spatio-temporal distribution. Both the porosity, residual moisture content, air entry value (AEV) and water entry value of the materials were optimized to better fit measured moisture content in the cover, particularly in the coarse material. In this material, residual moisture content was higher in the calibrated model (from 0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> in the uncalibrated model to 0.09 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> in the calibrated model) as well as AEV, which was increased by a factor of 100 (from 0.05 kPa to approximately 5 kPa). For the other materials, the WRCs and permeability functions remained similar to the predicted properties (c.f. Table 4.1), although the porosity was optimized to better reproduce the measured moisture content from Teros 12 sensors.

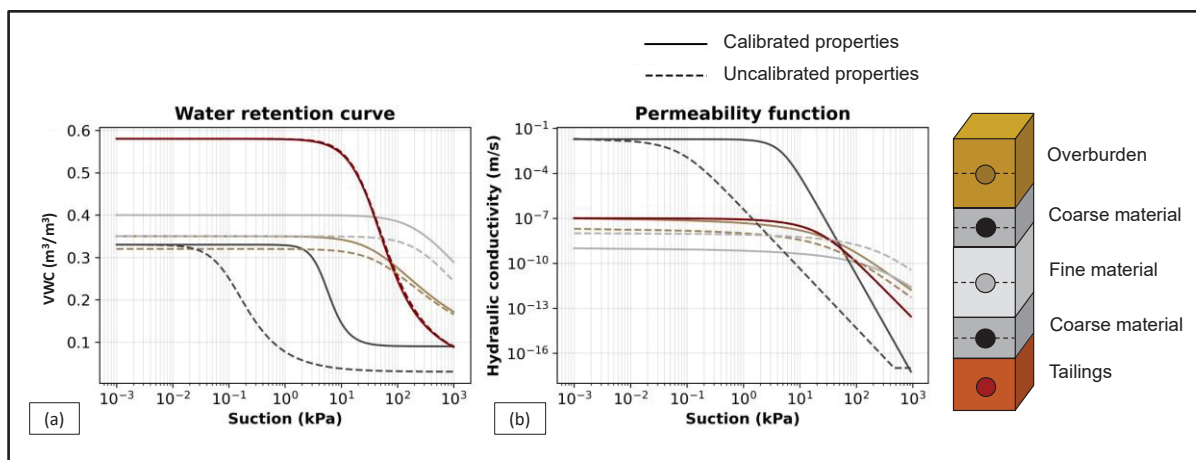


Figure 4.5 Uncalibrated and calibrated hydrogeological properties used in the model for (a) water retention curves and (b) permeability functions

Figure 4.6 presents the field meteorological data used for calibration of the SEEP/W model (Figure 4.6a) and some results obtained from the calibration of the SEEP/W hydrogeological model, for both uncalibrated and calibrated properties. Precipitation and air temperature which are used to simulate the true meteorological conditions under transient conditions from October

to December are also shown in Figure 4.6a. The temperature time-series profiles derived from the measurements of the Teros 12 sensors indicate a strong variation of temperature during the TL-ERT monitoring period, indicated by green triangles, which is particularly pronounced at the surface (from 15 °C to 2 °C). Notably, no significant precipitation likely to influence the ERT results was recorded during this period, which indicates that imaged resistivity changes can be solely explained by the controlled infiltration test and by temperature changes in the CCBE.

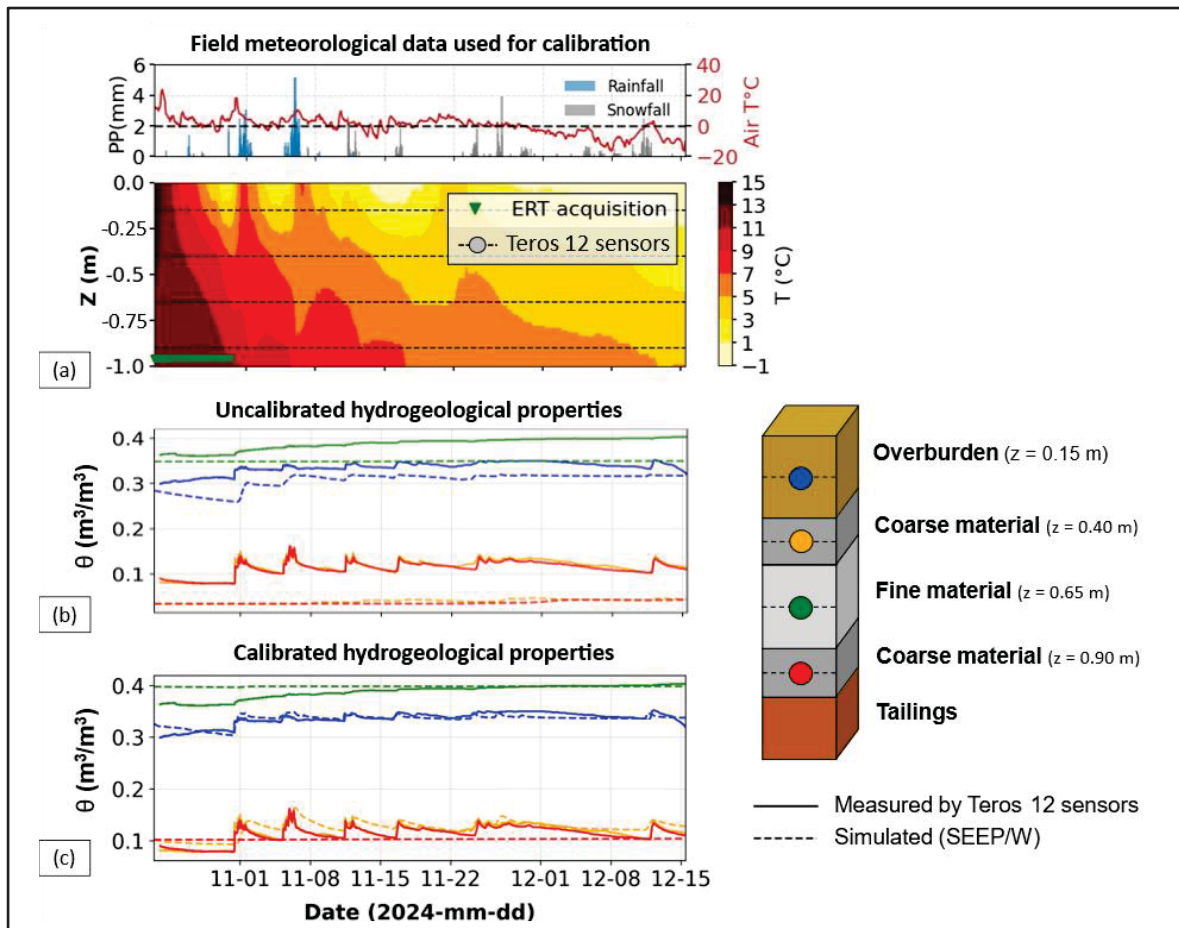


Figure 4.6 Experimental site data used for hydrogeological model calibration and TL-ERT monitoring campaign: (a) precipitation and air temperature recorded by a nearby weather station, interpolated soil temperatures derived from Teros 12 sensors, (b) simulated  $\theta$  using the uncalibrated hydrogeological properties from Table 4.1 and Figure 4.5 (dotted lines) and (c) simulated  $\theta$  using the calibrated hydrogeological properties derived from Figure 4.5 (solid lines)

Figure 4.6 also compares the temporal dynamics of  $\theta$  measured by the sensors and  $\theta$  which was respectively predicted by the uncalibrated (Figure 4.6b) and calibrated model (Figure 4.6c) at four depths within the cover under natural hydrogeological conditions. The uncalibrated model shows that the simulated  $\theta$  values at saturation (porosity) do not match the measured ones, particularly for the coarse materials, which was taken into account by modifying the porosity of the WRCs of the calibrated properties (Figure 4.5). Globally, the calibrated model reproduces well the measured  $\theta$  in the three upper layers of the cover, both in terms of absolute values and in terms of temporal dynamics as it can be observed in Figure 4.6c. For the lower coarse material layer (red line), the simulated  $\theta$  data show little variation, unlike the field measurements from the sensor, which suggests stronger water percolation or the presence of preferential flow from the fine material layer to the coarse material layer, which was poorly accounted for by the model. The calibrated model was used to predict the distribution of moisture content in the cover for this study.

#### 4.4.3 Comparison between hydrogeological modeling and field TL-ERT data

Figures 4.7 and 4.8 compare the electrical response derived from the calibrated hydrogeological model with the TL-ERT measurements following the workflow summarized in Figure 4.2. Simulated  $\theta$  fields produced with SEEP/W were first interpolated onto the pyGIMLi mesh and converted to bulk resistivity at field temperature using Archie's law and the temperature correction described in Section 4.3.5. Figure 4.7a illustrates the  $\theta$  distribution 2 h after the start of the infiltration test together with temporal profiles extracted at virtual sensor locations at  $x = 3$  m,  $x = 11$  m and  $x = 25$  m along the slope, respectively. The model reproduces the expected hydrogeological behavior of the inclined CCBE, both in terms of absolute and dynamic variations of moisture content. The greater increase of  $\theta$  occurs within the top coarse material layer (from  $< 0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$  to  $> 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) while the remaining layers remain largely unaffected by the water infiltration test. A slight increase of  $\theta$  is noticed in the top overburden layer, and no variation of  $\theta$  can be observed in the bottom coarse material layer,

which suggests that the capillary barrier effects simulated by the calibrated model effectively divert water laterally and prevent it from reaching the bauxite tailings.

The corresponding resistivity model (Figure 4.7b) reflects this hydrological structure, with a conductive anomaly forming beneath the trench during infiltration and extending slightly downslope. It can be noted that the 1m-thick cover is made of layers with extremely sharp resistivity contrasts, from approximately 30  $\Omega\cdot\text{m}$  for the fine material layer to above 1000  $\Omega\cdot\text{m}$  for the coarse material layers. Notably, the sharp increase of  $\theta$  modeled downslope of the trench in the top coarse material layer corresponds to a sharp decrease of resistivity in this layer, from above 1000  $\Omega\cdot\text{m}$  to approximately 300  $\Omega\cdot\text{m}$ , before slowly reaching its initial value in the next four days. These resistivity fields were used as input for forward modeling to generate synthetic Wenner apparent resistivity pseudo-sections (Figure 4.7c), using the same electrode configuration and data acquisition protocol as in the field survey. The synthetic sections reproduce the first-order features observed in the TL-ERT data: a conductive near-surface layer, an intermediate resistive zone associated with the upper coarse material and fine material layers, and a deeper conductive unit interpreted as tailings. The DOI values plotted on the right-axis of Figure 4.7c are calculated following Roy and Apparao (1971) guidelines for Wenner alpha configuration. Both synthetic and measured datasets show a decrease in apparent resistivity directly beneath and around the trench following the water infiltration test, although the geometric effect of the trench seems to be more pronounced for synthetic datasets.



A quantitative comparison is provided in Figure 4.8, which shows relative apparent resistivity variations extracted at increasing depths of investigation (i.e., increasing distance between current electrodes A and B) for  $x_A = 1$  m,  $x_A = 11.5$  m, and  $x_A = 19$  m. At the top of the slope ( $x_A = 1$  m), simulated and measured temporal evolutions are in close agreement at all depths, yielding low RMSE values (2.4 %), which confirms that the model reproduces well natural moisture content dynamics in an area minimally affected by the infiltration. Near the trench ( $x_A = 11.5$  m), the timing and magnitude of the two infiltration pulses are well captured, with sharp decrease of apparent resistivity quickly after the infiltration event (up to 35% decrease) and gradual recoveries appearing simultaneously in both datasets (RMSE of 5.5 %). This agreement indicates that the hydrogeologically-calibrated model accurately represents the short-term redistribution of water in the vicinity of the infiltration zone.

Further downslope (e.g.,  $x_A = 19$  m), the correspondence between simulated and measured apparent resistivity deteriorates slightly. The model still predicts a decrease in apparent resistivity after infiltration, but its amplitude is greater than the decrease observed in field data, leading to higher RMSE values (8.9 %). These discrepancies suggest that the hydrogeologically-calibrated model may slightly overestimate lateral diversion along the inclined CCBE or underestimate deeper percolation and preferential flow pathways. Overall, the comparison in Figures 4.7 and 4.8 demonstrates that the hydrogeological model reproduces the electrical response well upslope and near the trench but deviates downslope, pointing to specific zones where hydraulic parameters - optimized to fit only water content sensors under transient conditions - may require refinement. This demonstrates the potential benefits of integrating TL-ERT monitoring of *in situ* water infiltration tests to help calibrate hydrogeological models of inclined CCBEs.

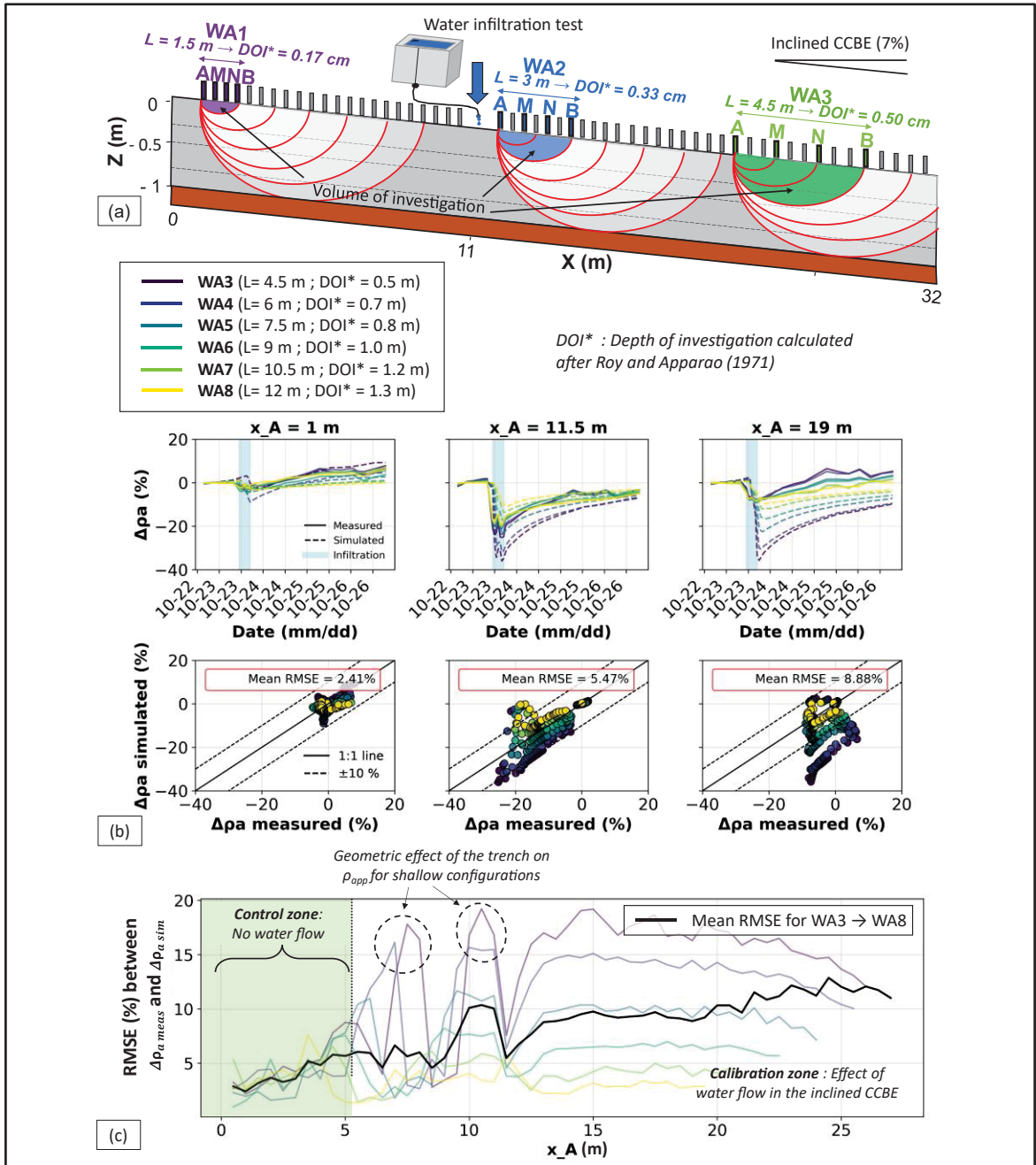


Figure 4.8 (a) Graphical illustration of the depth of investigation (DOI\*) calculated from Roy et Apparao (1971) of various Wenner configuration in the inclined CCBE. (b) Comparison of simulated and measured apparent resistivity variations at three slope positions (top, middle, and bottom) for different depths within the cover, with mean RMSE indicated for each position. (c) RMSE values for each Wenner configuration as a function of x<sub>A</sub>, the location of A electrode

## 4.5 Discussion

### 4.5.1 Applicability of TL-ERT monitoring for *in situ* cover performance assessment

Time-lapse electrical resistivity tomography has long been recognized as a sensitive and non-invasive technique for monitoring subsurface moisture dynamics in engineered and natural systems (Chambers et al., 2008; Dimech et al., 2022; Schwartz, Schreiber, & Yan, 2008), particularly to image lateral deviation of water within inclined and layered media (Dimech et al., 2019; Hübner et al., 2017). In the context of this study, the conventional TL-ERT inversion workflow yields a clear first-order depiction of how water moves through the inclined CCBE during the controlled infiltration test. The inverted models (Figure 4.4) show a pronounced sharp decrease in resistivity below the trench following the two infiltration events, followed by a progressive return toward pre-test conditions—patterns that are fully consistent with past infiltration and TL-ERT studies (Cassiani, Bruno, Villa, Fusi, & Binley, 2006; Monego et al., 2010). They also reveal a measurable resistivity decrease downslope that is not present upslope, which can only be explained by the lateral diversion processes within coarser layers in inclined capillary-barrier cover systems (Aubertin et al., 2009). These results confirm that TL-ERT is highly sensitive to changes in moisture content and that TL-ERT is particularly well-suited to qualitatively and non-invasively track the propagation of the infiltration front and the associated redistribution of water following controlled infiltration test (Monego et al., 2010; Scaini et al., 2017; Singha & Gorelick, 2005; Vanella et al., 2021).

However, despite capturing these qualitative trends, conventional 2D inversions remain limited in their ability to produce high-fidelity images of thin multi-layered systems such as the CCBE used for mining reclamation (Dimech, 2023). Numerous studies have shown that 2D ERT tends to smooth resistivity contrasts and blur internal interfaces, especially where strong vertical and lateral resistivity gradients occur (Auken, Pellerin, Christensen, & Sørensen, 2006; Samouëlian et al., 2005). In this case, this effect leads to the reconstruction of a simplified and erroneous three-layer structure rather than the four real layers of the CCBE, with smeared transitions between the upper coarse material, fine material, and lower coarse material layers. Similar

behavior has been reported in monitoring studies on landfills, earthen embankments, permafrost and slopes, for field case studies and numerical feasibility studies (Bedoui et al., 2024; Benisch, Köhn, Al Hagrey, Rabbel, & Bauer, 2015; Briggs et al., 2017; Budler, 2017; Chambers et al., 2014). In the meantime, the inversion of TL-ERT following water infiltration leads to strong artifacts just below the trench (sharp decrease of resistivity up to a depth of 4 m below ground level) and an erroneous increase of resistivity (+10%) in the upslope part of the CCBE, which is expected from literature (Carey, Paige, Carr, & Dogan, 2017; Clément et al., 2010; Clément et al., 2009). As a result, although TL-ERT reliably identifies whether infiltration affects the cover and whether lateral diversion occurs, it cannot by itself quantify layer-specific changes in  $\theta$  or discriminate vertical percolation from lateral flow within thin contrasting layers. This limitation mirrors observations from both experimental and field-scale infiltration studies (Jayawickreme, Van Dam, & Hyndman, 2010; Scaini et al., 2017) and highlights the need to interpret TL-ERT in conjunction with physically based flow modeling, which becomes essential for CCBE systems that are characterized by strong contrasts of moisture content and resistivity and thin horizons (Aubertin, Bussière, Pabst, James, & Mbonimpa, 2016).

#### **4.5.2 Using TL-ERT data as a technique for constraining hydrogeological models**

As demonstrated in several comprehensive studies, TL-ERT offers rich spatio-temporal information that is particularly valuable for characterizing the hydrogeological behavior of the subsurface (Binley et al., 2015; Dimech et al., 2022; Slater, 2021). Compared to point sensors, which require intrusive installation and sample only a limited volume, TL-ERT provides a minimally invasive, volumetric representation of subsurface resistivity changes over tens of meters. This provides access to multi-scale hydrogeological responses, capturing both the rapid saturation of shallow units and the slower evolution of deeper horizons (Auken et al., 2014; Chambers et al., 2014; Scaini et al., 2017). TL-ERT effectively integrates the hydrological behavior of the CCBE during the infiltration test as well as under natural climatic conditions because bulk resistivity responds strongly to variations in moisture content and porewater

conductivity (Dimech et al., 2024; Dimech et al., 2023). The sensitivity of resistivity to moisture content is well documented in petrophysical literature, including classical and modern formulations (Archie, 1942; Glover, 2010; Holmes et al., 2020; Revil, Coperey, et al., 2018). In our study, this sensitivity is reflected in the close agreement between simulated and measured resistivity variations near the trench, where the model reproduces both the timing and amplitude of changes associated with the water flow occurring within the upper coarse material of the CCBE.

At the top of the slope (in the area denoted as “control zone”) and near the trench, the agreement between simulated and measured apparent resistivity variations indicates that the calibrated hydrogeological model realistically represents the infiltration of water within the CCBE. However, downslope, where discrepancies are more pronounced, TL-ERT serves as an independent diagnostic technique revealing where the conceptual model or hydraulic parameters may need refinement. This behavior is expected since the numerical model was calibrated to reproduce field moisture content data, without prior information of the geoelectrical monitoring. Further work could be done by comparing the RMSE profiles (Figure 4.8c) for different hydrogeological parameters or by using data assimilation technique such as Kalman filters (Bouzaglou et al., 2018; Camporese, Cassiani, Deiana, Salandin, & Binley, 2015; Isabelle, 2022; Tso et al., 2020) or other fully coupled hydrogeophysical inversion strategies (Hinnell et al., 2010; Looms, Binley, et al., 2008; Looms, Jensen, et al., 2008; Pleasants et al., 2022). The mismatch observed downslope, for example, suggests that the model may slightly overestimate lateral diversion or underestimate deeper percolation, which could be explained by the hydrogeological properties of the materials used in the SEEP/W model (e.g., fine material with too high AEV and too low saturated hydraulic conductivity). Such insights are consistent with the role of ERT as a constraint in hydrogeophysical inversion frameworks, where resistivity data can help correct model structures, parameter distributions, or boundary conditions and can be used in combination with point hydrogeological sensors, which provide more accurate but local data for model calibration (Kuhl, Kendall, Van Dam, & Hyndman, 2018; Laloy, Javaux, Vanclooster, Roisin, & Bielders, 2011; Revil, Karaoulis, Johnson, & Kemna, 2012). Thus, TL-ERT can act as a spatially distributed calibration tool for

the hydrogeological model, and the areas of mismatch point directly to zones where the simulated behavior of the inclined cover system does not match the ERT data. We demonstrate here that both conventional ERT inversion and the proposed hydrogeophysical approach yield similar ERT apparent resistivity data, but that the resistivity model derived from the hydrogeological model is far more representative of the field condition than the conventional inverted model, which sets the path for broader integration of TL-ERT as a tool to better capture the in situ hydrogeological behavior of inclined CCBE installed on mine tailings, with conventional point-scale hydrogeological sensors.

#### **4.5.3 Limitations of the study and recommendations for broader application**

Several limitations must be acknowledged before generalizing the approach for assessing inclined CCBE performance. From a geophysical perspective, the Wenner array used in this study provides robust signal quality and rapid acquisition, attributes essential for capturing hourly changes, but is also known to have limited lateral resolution and reduced sensitivity to thin resistive or conductive layers at depth (Auken et al., 2006; Samouëlian et al., 2005). The reliance on a single 2D profile further constrains the imaging capability, preventing the characterization of 3D flow pathways around the trench or within the inclined cover. Although the trench was designed to minimize the lateral spreading of water outside of the 2D ERT imaging plane, the amount of water diverted laterally in the CCBE might have been diminished downslope, which is not taken into account by the 2D model. Indeed, numerous studies have demonstrated that 3D acquisitions or optimized electrode distributions substantially improve structural resolution in heterogeneous media (Hübner et al., 2017; Schmidt-Hattenberger, Bergmann, Labitzke, Wagner, & Rippe, 2016; Uhlemann et al., 2018; Wagner et al., 2015). Moreover, the use of surface electrodes alone can introduce geometric distortions when strong topographic or near-surface features (such as trenches and water plume) affect electrical current flow (Clément et al., 2009). Embedding electrodes at shallow depths, as done in levee and embankment monitoring systems (Arosio et al., 2017; Holmes et al., 2020) or semi-permanent monitoring of CCBEs for mine reclamation (Dimech et al., 2023, 2024), can

mitigate these effects and sharpen the vertical sensitivity of the measurements, although this is not convenient for localized (both in space and time) assessment of inclined CCBE performance.

A second limitation relates to the petrophysical conversion from modeled moisture content to resistivity. In this study, we employed a simplified unsaturated extension of Archie's law (Archie, 1942), with parameters drawn from the literature. While suitable for a first-order analysis, this approach introduces uncertainty due to material-specific textural contrasts, pore-water chemistry, and hysteresis effects (Friedman, 2005; Mollehuara-Canales et al. 2020). More physically based formulations and laboratory characterization, such as ER-Tempe cell measurements (Dimech et al., 2023) or pedo-electrical calibration (Laloy et al., 2011), would refine this conversion and reduce uncertainty in resistivity predictions. Finally, subsurface temperature variations up to 15 °C at shallow depths were handled for correction of resistivity through a separate reconstruction rather than a fully coupled thermo-hydraulic model, even though thermal effects can significantly influence resistivity, especially in Quebec (Dimech et al., 2023).

Based on these limitations, several recommendations can emerge, which could help maximize the information retrieved from future TL-ERT monitoring campaigns on inclined CCBEs. From a geophysical standpoint, combining rapid acquisition protocols (e.g., Wenner or Wenner–Schlumberger) with higher-resolution arrays (dipole–dipole) or full 3D surveys would improve the ability to resolve thin layers and lateral flow structures while maintaining high temporal resolution (e.g., Cassiani et al., 2009; Lamb et al., 2019). Embedding electrodes along shallow boreholes, as demonstrated in optimized monitoring systems (Perri et al., 2012; Clément et al., 2014; Wagner et al., 2015; Schmidt-Hattenberger et al., 2016; Luzy et al., 2024), would also reduce geometric artifacts and enhance depth sensitivity, while ensuring minimal impact on the integrity of the CCBEs. In addition, complementary geophysical and hydrogeological techniques could be combined with TL-ERT to increase the ability to track water flow, such as (a) conventional hydrogeological sensors (Sylvain, Pabst, & Dimech, 2019), (b) pore water sampling (used in combination with conservative tracer) as well as (c) TL-GPR in shallow layers, which could provide higher spatial resolution to constrain ERT

interpretations and help discriminate between moisture content, pore water EC and temperature variations (Bouchedda et al., 2012; Doetsch, Linde, Coscia, Greenhalgh, & Green, 2010; Giertzuch et al., 2020; Impinna et al., 2024; Looms, Binley, et al., 2008; Looms, Jensen, et al., 2008; Steelman et al., 2017).

From a hydrogeological perspective, future studies could incorporate site-specific petrophysical characterization and material-specific WRC assessment in the laboratory (e.g., Dimech et al., 2023), large-area infiltration experiments, and co-located hydrogeological sensors and ERT profiles to enhance calibration robustness with controlled infiltration test. Systematic hydrogeological response tests could be carried out for various inclined CCBEs designs (various materials, layers or inclination), which would allow the comparison between their respective efficiency to divert water laterally and prevent water infiltration to the tailings. Finally, the development of fully coupled hydrogeophysical inversion or data assimilation frameworks, as demonstrated in Kuhl et al. (2018) and Mary et al. (2021), represents a promising direction for quantitatively assessing CCBE performance at the scale of full tailings storage facilities.

#### **4.6 Conclusion**

This study shows that integrating hydrogeological modeling with time-lapse ERT is an effective way to evaluate water infiltration within inclined CCBEs. Conventional inversions captured the overall response to the controlled infiltration test but failed to resolve the thin, high-contrast layers typical of engineered covers used for tailings reclamation. In contrast, the calibrated hydrogeological model reproduced both the magnitude and timing of electrical changes, particularly upslope and near the trench. The comparison between synthetic and field datasets clearly identifies where lateral diversion is well represented and where model refinements are required, especially downslope, which can either be refined manually, through automated hydrogeophysical inversion or data assimilation techniques such as Kalman filters. These findings highlight the dual role of TL-ERT: it provides a qualitative view of flow processes while also serving as a spatially distributed constraint for improving hydrogeological

models. Practically, this enables operators to assess whether a cover design effectively redirects water and limits percolation, offering a non-invasive complement to point-scale sensors. Areas where simulated and measured responses diverge indicate zones where conceptual models, hydraulic parameters, or boundary conditions may need adjustment.

Overall, the proposed workflow offers a robust alternative for interpreting TL-ERT in complex multilayer covers and supports more reliable calibration and validation of reclamation designs. Future developments include the integration of site-specific petrophysical calibration, optimized electrode layout (e.g. shallow boreholes) and use of complementary monitoring techniques such as TL-GPR. The wider implementation of this workflow could strengthen the evaluation of CCBE performance and contribute to more resilient mine closure strategies.

## **CHAPITRE 5**

### **DISCUSSION GÉNÉRALE**

Ce chapitre de discussion est organisé en deux parties. La première partie revient plus en détail sur deux éléments clés du projet : la modélisation hydrogéologique et la correction de l'effet de température sur les données inversées. La section consacrée à la modélisation présente les étapes de construction du modèle sous SEEP/w et discute des principales incertitudes qui y sont associées. Ensuite, la section portant sur la correction de température décrit la démarche suivie, depuis l'élaboration d'un modèle 1D basé sur les données de sondes ponctuelles jusqu'à l'application de la correction aux 63 imageries ERT inversées.

La seconde partie revient sur chacun des objectifs spécifiques du projet (OS1, OS2 et OS3) (récapitulés à la Figure 2.2) afin de résumer les principaux résultats obtenus, les limites rencontrées et les pistes d'amélioration possibles.

#### **5.1 Retour sur des étapes clés du projet**

##### **5.1.1 Le modèle hydrogéologique**

Le modèle hydrogéologique a été réalisé avec SEEP/W, un logiciel couramment utilisé en restauration minière pour simuler le comportement des recouvrements en milieu non saturé. Six étapes, résumées à la Figure 5.1, ont été suivies pour obtenir les distributions de teneur en eau nécessaires à la réalisation de l'OS3.

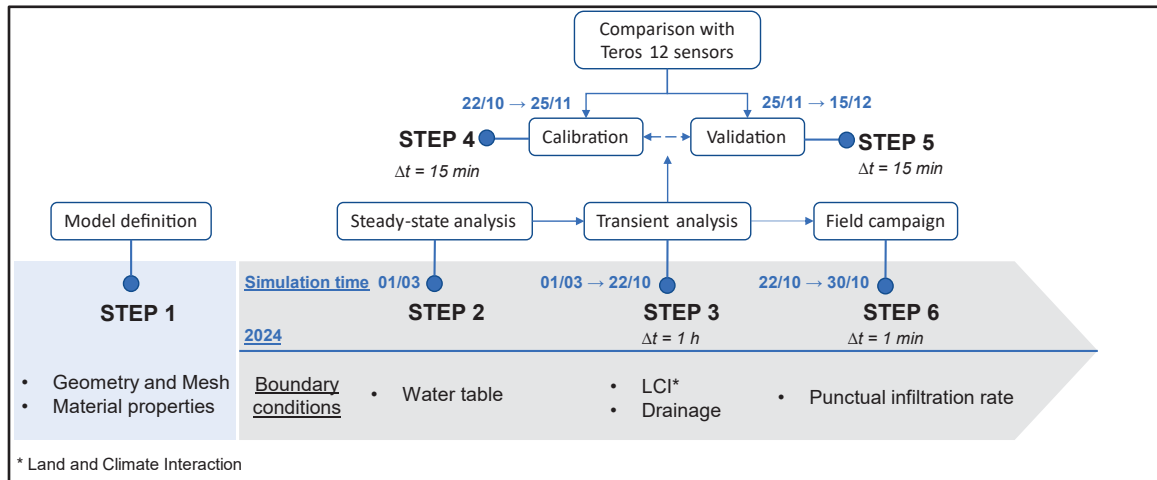


Figure 5.1 Démarche de la modélisation hydrogéologique, de la définition du modèle à la simulation de l'infiltration du traceur

La première étape a consisté à définir la géométrie du modèle, le maillage, ainsi que les propriétés des matériaux en milieu non saturé, trois éléments indispensables à la résolution par méthode des éléments finis. Les propriétés des matériaux (CRE et fonction de perméabilité) ont d'abord été obtenues par des modèles prédictifs. La CRE reposait sur l'utilisation du modèle MK, construit à partir des propriétés géotechniques de matériaux (prélevés avant la construction des recouvrements) mesurées en laboratoire. Cependant, les pentes trop abruptes de la CRE ont entraîné des problèmes de convergence. Pour cette raison, le modèle descriptif de van Genuchten a remplacé le modèle MK pour les simulations suivantes.

La géométrie du modèle, ainsi que le maillage et les conditions limites pour les différentes étapes, sont représentés à la Figure 5.2.

Les étapes 2, 3, 4 et 5 ont permis de préparer le modèle pour qu'il soit représentatif des conditions hydrogéologiques du site d'étude au moment de l'acquisition des données TL-ERT. Enfin, l'étape 6 correspondait à la période de la campagne de terrain, soit du 22 au 30 octobre 2024, avec l'injection d'un traceur d'eau saline le 23 octobre.

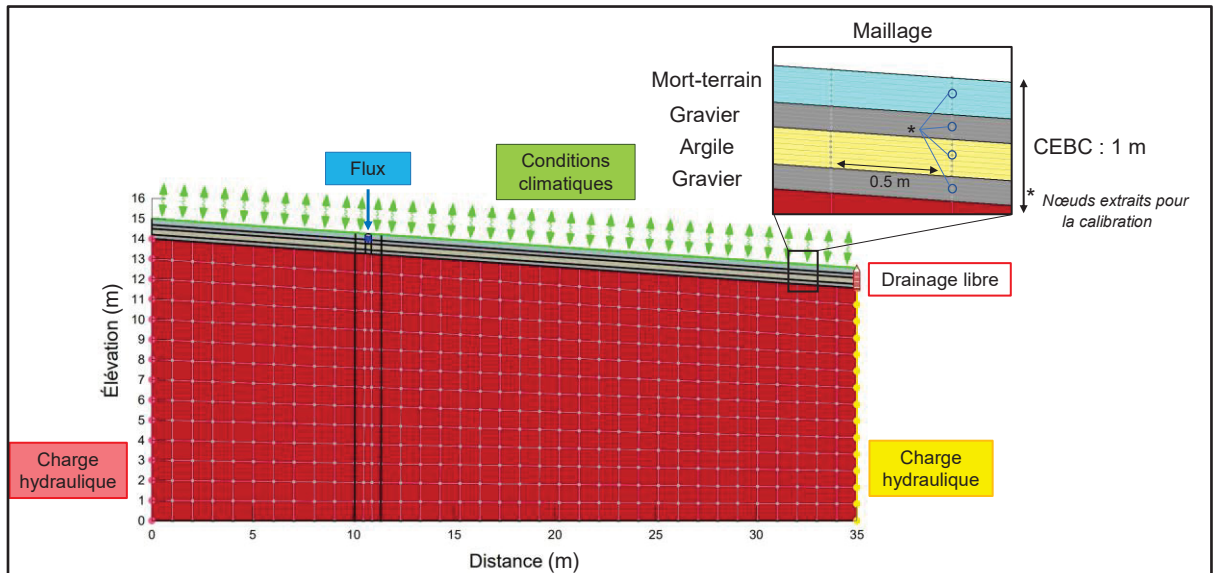


Figure 5.2 Modèle SEEP/w avec les conditions limites et le maillage

Une étape essentielle de cette démarche a été l'étape de calibration du modèle à l'aide des sondes de teneur en eau TEROS 12. Plusieurs limites ont été rencontrées à cette étape. Les profils de teneur en eau mesurés par les sondes aux trois stations le long de la pente (haut, milieu, bas) ont montré des variations non négligeables, en particulier pour la station située en milieu de pente comparativement aux deux autres (Figure 5.3). Pour simplifier la calibration, il a été décidé de ne retenir qu'une seule station (celle du bas). La Figure 5.3 montre également la présence d'écoulements préférentiels entre la couche d'argile et la couche de gravier inférieure. Ces écoulements n'ont pas pu être représentés dans les simulations, notamment parce que dans le cas d'une CEBC, l'effet de barrière capillaire empêche l'infiltration dans la couche sous-jacente.

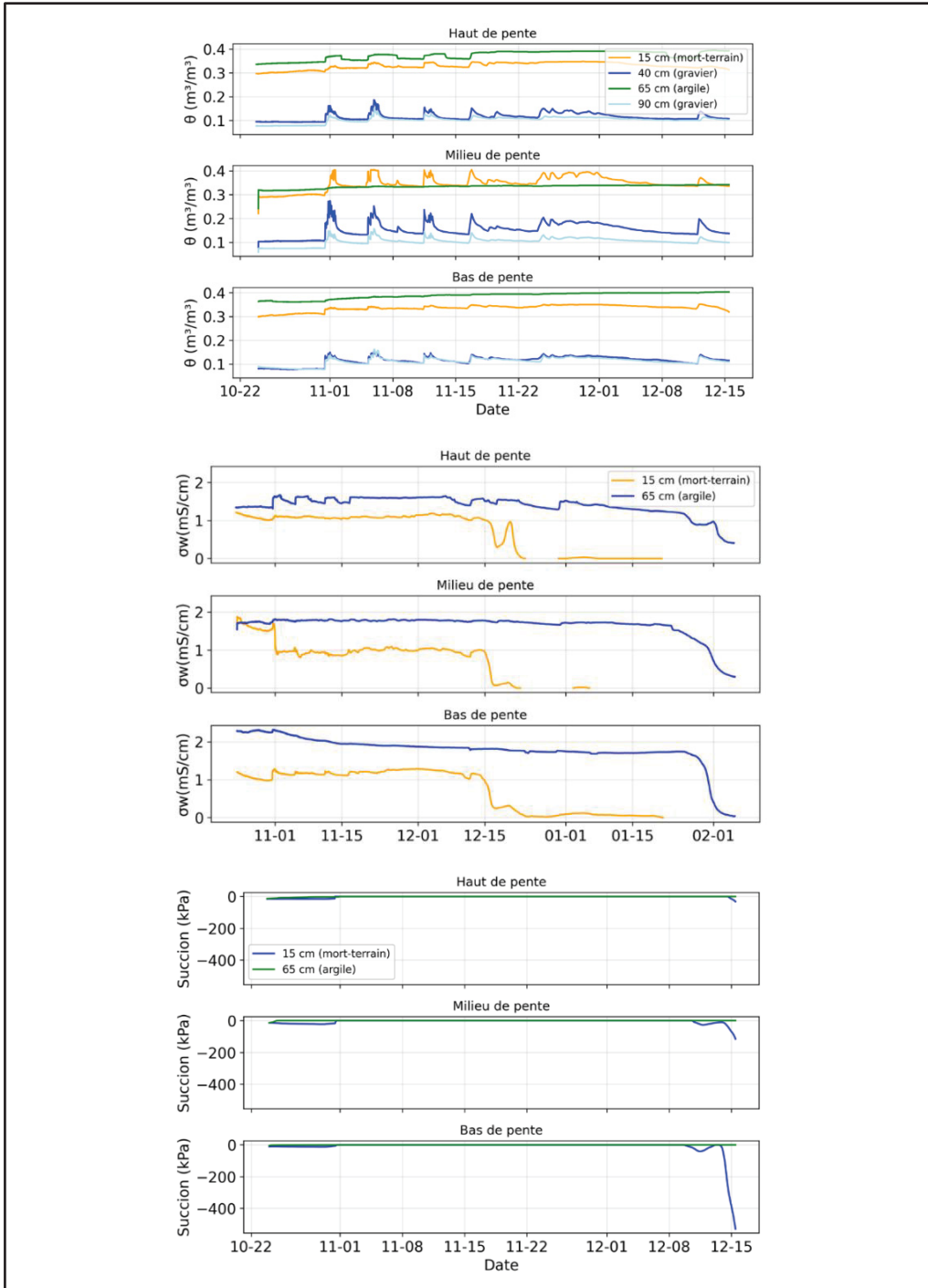


Figure 5.3 Séries temporelles de teneur en eau, conductivité interstitielle et succion pour les trois stations de sonde (haut, milieu et bas de pente) correspondant à la période de calibration du modèle. Chaque station comprend quatre capteurs TEROS 12 disposés verticalement (un capteur au milieu de chaque couche)

Un autre facteur d'incertitude a concerné la courte période de mesures de teneur en eau disponible, liée à l'installation des sondes en même temps que les relevés géophysiques. Cette limitation a empêché la validation du modèle sur différentes périodes et a rendu l'exploitation des CRE de terrain difficile en raison d'une phase initiale d'« ajustement des sondes » (Figure 5.3 (série temporelle de succions) et 5.4).

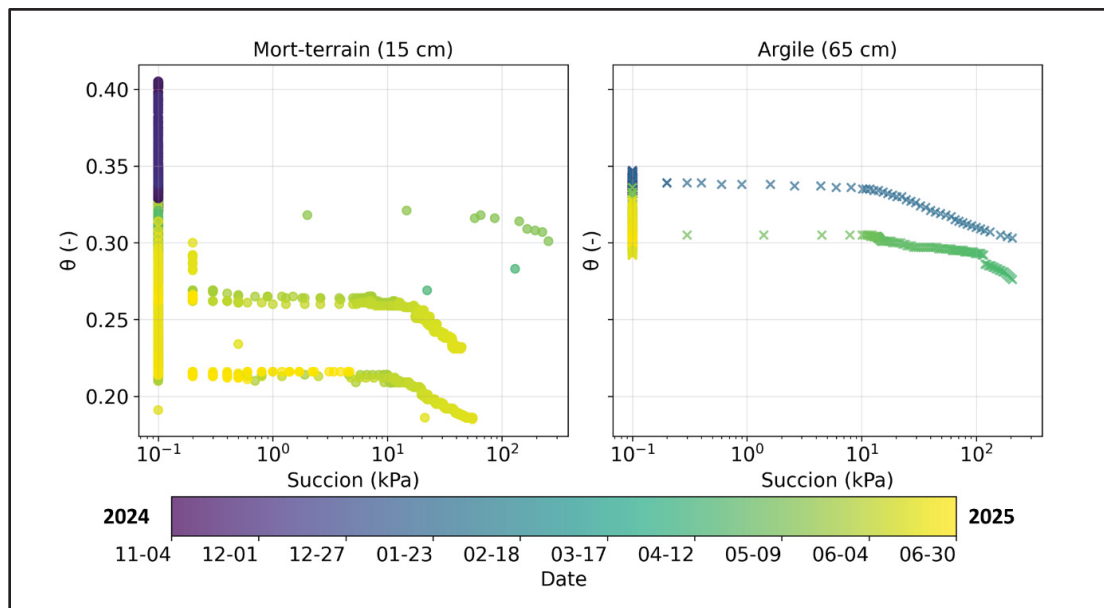


Figure 5.4 CRE de terrain mesurées par les sondes TEROS 12 et TEROS 21 sur une période allant de novembre 2024 à juin 2025

### 5.1.2 Correction de l'effet de la température sur les données inversées

Les conditions météorologiques du site pendant la campagne de terrain ont été marquées par une absence de pluie. Les légères pluies observées, comme le montre la Figure 5.5, ont eu lieu à 1,4 km du site, à l'endroit où était installée la station météorologique. La variation de la température de l'air a été particulièrement importante, avec un pic autour de 23°C le 23 octobre et une température minimale de -2°C le 29 octobre. Les sondes de température ont également enregistré une baisse significative de la température dans le sous-sol, avec une variation de 15°C sur les premiers centimètres du recouvrement (Figure 5.6, haut). Étant donné qu'en

moyenne, une diminution de 1°C entraîne une réduction de 2% de la conductivité, il a été possible de créer une pseudo-section 2D de la variation relative de la conductivité électrique pour avoir une idée de l'impact de la température sur les données électriques. Cette variation a été calculée par rapport au premier profil de température, interpolé en fonction de la profondeur (Figure 5.6, bas).

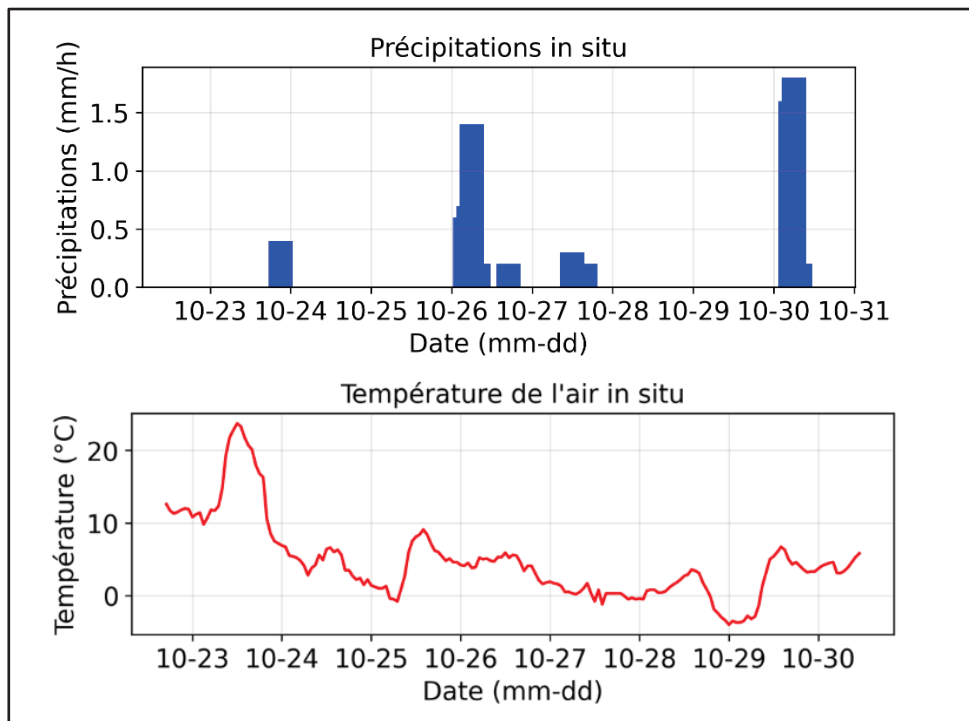


Figure 5.5 Conditions de précipitation et de température sur le terrain pendant la période de monitoring TL-ERT

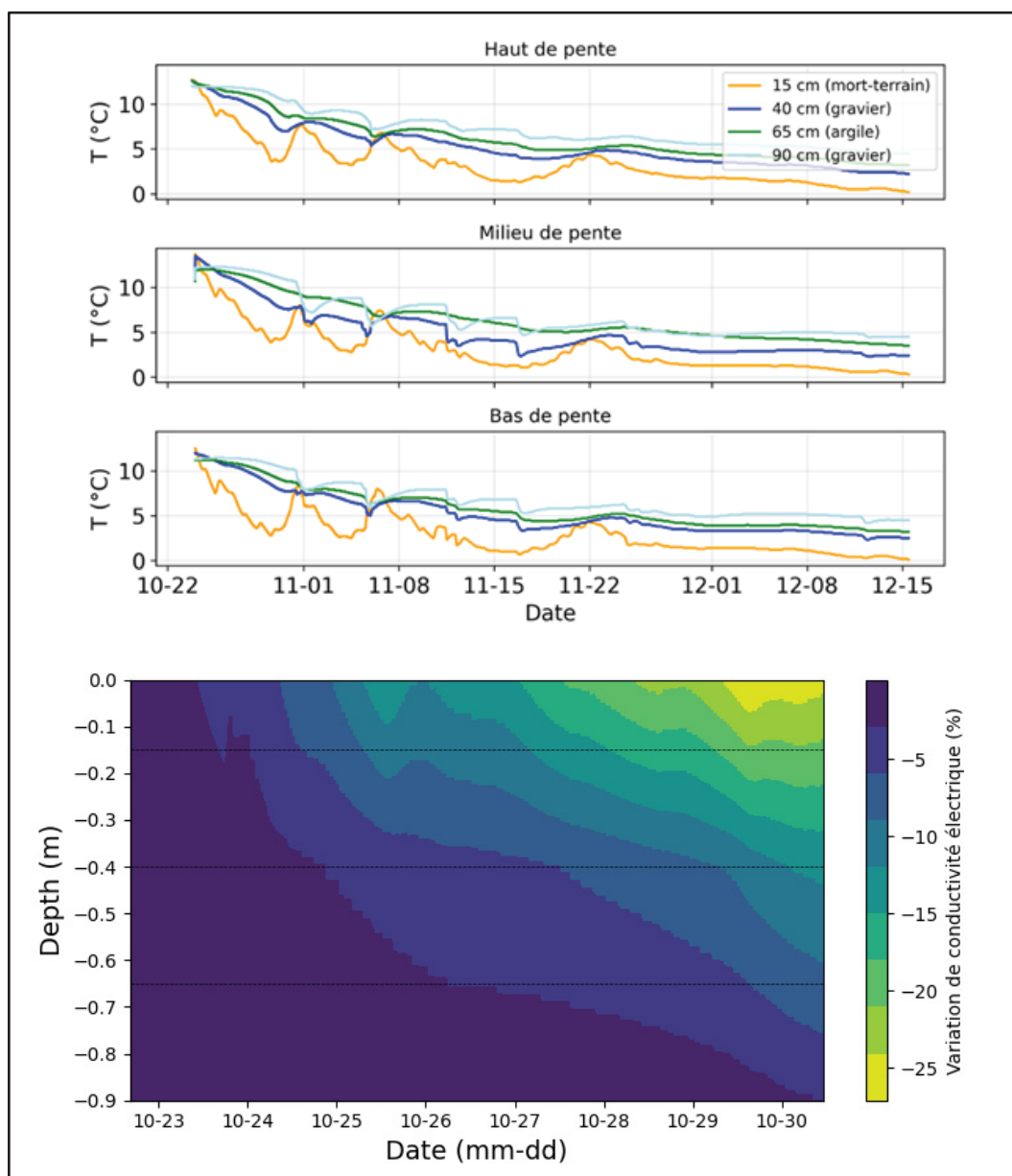


Figure 5.6 Haut : séries temporelles de température mesurées par les sondes TEROS 12 au milieu de chaque couche du recouvrement.  
 Bas : aperçu de la variation relative de la conductivité électrique au cours du temps en fonction de la température

La correction de l'effet de la température sur les résistivités inversées a été réalisée en deux étapes: la reproduction d'un modèle 1D continu de la température en fonction de la profondeur,

puis l'application de la formule de correction aux données inversées. Les deux étapes sont récapitulées à la Figure 5.7.

Étant donné la présence de trois stations de mesure de la température (haut, milieu et bas de pente) sur le terrain, le profil thermique en haut de pente a été retenu en supposant une variation latérale de température homogène. Les données issues des sondes TERSOS 12 installées au milieu de chaque couche du recouvrement, soit à 15 cm, 40 cm, 65 cm et 90 cm de profondeur, ont été utilisées (Figure 5.6).

Dans un premier temps, une extrapolation temporelle pour la période comprise entre le 22 octobre 2024 à 16h22 et le 23 octobre 2024 à 18h03 a été nécessaire, car les capteurs ont commencé à enregistrer après le début de la campagne de terrain. Ensuite, pour chaque acquisition ERT, soit 63 intervalles de temps, une interpolation linéaire a été appliquée entre les quatre profondeurs mesurées (15 cm à 90 cm) avec un pas de 1 cm, et une extrapolation linéaire a également été effectuée pour les profondeurs inférieures à 15 cm et supérieures à 90 cm. Afin d'obtenir un profil de température réaliste au-delà de 90 cm, un capteur virtuel a été introduit à 2 m de profondeur dans les résidus miniers, avec une température fixée à 11.6 °C, correspondant à la moyenne des 63 valeurs mesurées à 90 cm. En dessous de 2 m, la température a été supposée constante.

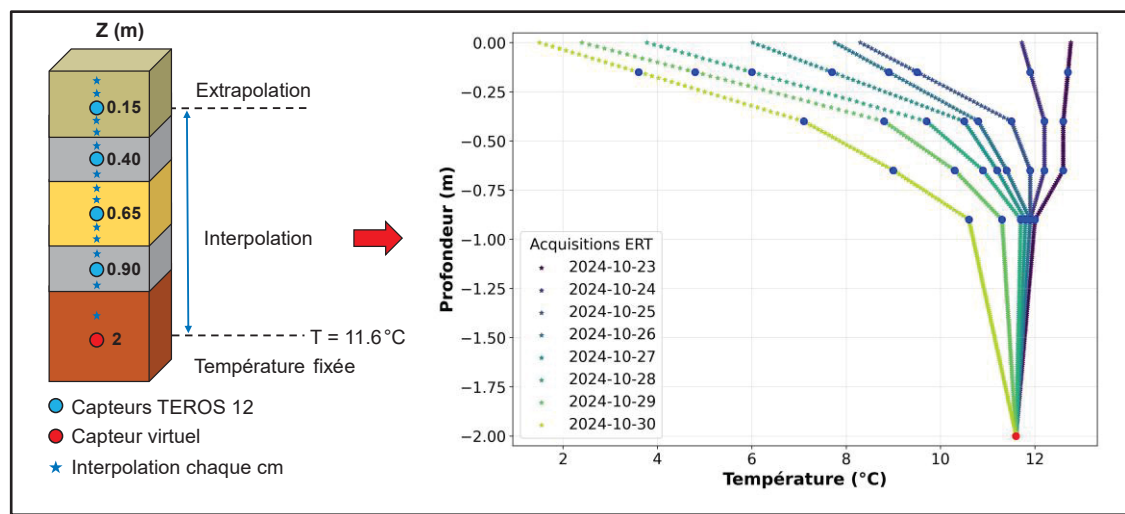


Figure 5.7 Profils de Température vs. Profondeur pour quelques pas de temps ERT

Les profils de température obtenus ont ensuite été utilisés pour corriger chaque modèle de résistivité inversé à une température de référence de 25 °C. La correction a été appliquée selon le modèle proposé par Ma et al. (2011).

Cette correction permet d'évaluer les variations de résistivité au fil du temps indépendantes des fluctuations verticales de température. Cependant, ce modèle de correction présente certaines limites. Tout d'abord, le modèle est 1D vertical, ce qui implique de considérer que la variation de température est homogène dans l'espace horizontalement. Or, cela peut ne pas refléter la réalité dans des milieux hétérogènes comme ceux des recouvrements miniers. De plus, l'application de la correction a été réalisée directement sur les données inversées qui contiennent des artefacts dus à la nature des mesures et au processus d'inversion. Il serait peut-être plus approprié d'appliquer la correction sur les données apparentes avant l'inversion, afin de réduire l'impact de ces artefacts et d'améliorer la précision de la correction thermique.

## **5.2 Retour sur les OS**

### **5.2.1 Étude de faisabilité numérique (OS1)**

L'OS1 a été réalisé en deux étapes distinctes récapitulées à la Figure 5.8. La première étape consistait à simuler des données TL-ERT synthétiques à partir d'un modèle géophysique simplifié du recouvrement, puis à inverser ces données. La seconde étape visait à analyser la réponse hydrogéologique du recouvrement lors de l'injection d'un flux d'eau, à partir d'un modèle hydrogéologique indépendant.

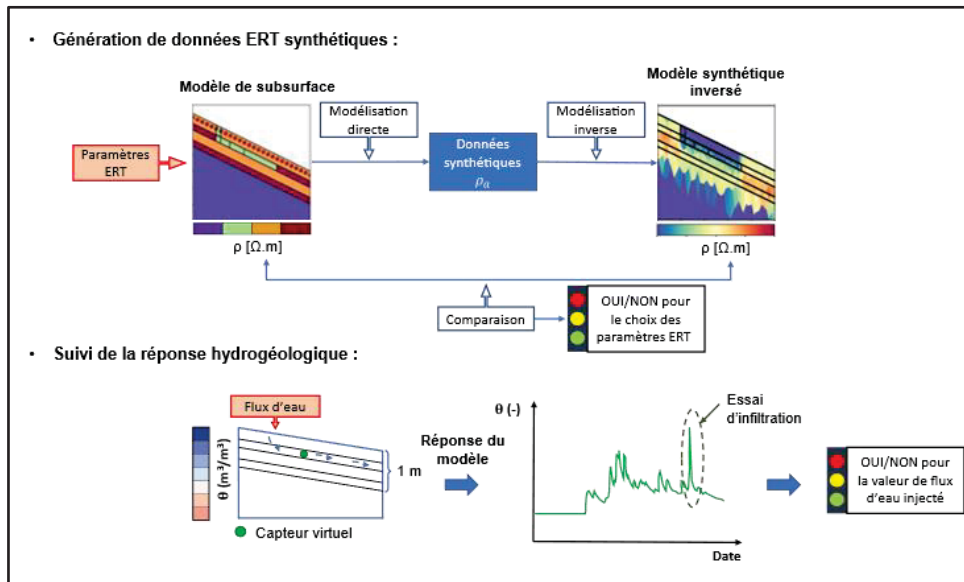


Figure 5.8 Représentation schématique des modèles géophysique et hydrogéologique servant à sélectionner les paramètres d'intérêt pour la campagne de terrain

Ces deux modèles étaient entièrement découplés : le modèle géophysique a permis d'évaluer la sensibilité du suivi TL-ERT à l'écoulement, tandis que le modèle hydrogéologique a servi à calibrer l'essai d'infiltration. Même si les modèles étaient séparés, leurs données se complétaient : disposer d'une estimation de la vitesse d'écoulement permettait d'avoir un ordre de grandeur du temps d'acquisition des mesures ERT. De plus, localiser la zone où la variation de teneur en eau est importante (à la base de la première couche drainante de gravier en l'occurrence) confirmait l'intérêt d'utiliser un traceur conducteur pour espérer détecter une réponse par TL-ERT à l'interface des deux couches.

Dans le modèle géophysique, l'écoulement n'était représenté que de manière schématique, sous la forme d'une succession de rectangles dont la conductivité augmentait au cours des itérations. Dans le modèle hydrogéologique, l'écoulement était simulé par une condition limite de type flux, dont la valeur était ajustée itérativement jusqu'à obtenir un pic de teneur en eau suffisamment marqué dans la couche de gravier supérieur pour dépasser l'effet provoqué par une précipitation annuelle maximale. À ce stade, le manque d'informations précises sur le site

a conduit à utiliser des valeurs standards issues de la littérature pour les propriétés des matériaux, et ce pour les deux modèles.

Les résultats de l'inversion des données synthétiques ont montré que le ratio de résistivité, comparé à un modèle initial avant l'essai d'infiltration, permettait de distinguer une infiltration verticale d'un écoulement latéral pour un espacement d'électrodes de 0.5 m avec 64 électrodes. Cependant, plusieurs artefacts liés au processus d'inversion limitaient la possibilité de localiser précisément les zones de diminution de résistivité ou d'en quantifier l'ampleur. Par exemple, dans les imageries d'inversion, le ratio devenait inférieur à 1 au cours du temps dans la couche de résidus alors que la résistivité des résidus était censée augmenter après l'injection d'eau salée (de 3 à 25  $\Omega \cdot m$ ). L'hypothèse émise était que l'augmentation dans les résidus n'était pas suffisante pour compenser la diminution dans d'autres couches. Un autre artefact était la présence d'une zone de transition moyennement conductrice entre la dernière couche du recouvrement et les résidus.

Malgré ces limites, cette approche préliminaire a fourni de premières indications sur les paramètres d'acquisition à utiliser. Cette étude de faisabilité serait néanmoins plus robuste en couplant les modèles géophysique et hydrogéologique, comme le suggère l'étude de Robinson et al., 2020. Concrètement, cela signifierait que les valeurs de résistivité du modèle géophysique proviendraient non pas de la littérature, mais de données synthétiques générées par le modèle hydrogéologique. Ce serait, en quelque sorte, reproduire l'approche de l'OS3, mais dès la phase de faisabilité, en générant des données synthétiques jusqu'à l'inversion dans un cadre entièrement couplé. L'objectif serait ainsi d'intégrer le couplage dès le début, et pas seulement lors de l'interprétation des résultats.

### **5.2.2 Traitement conventionnel des données de terrain (OS2)**

L'OS2 constituait la suite logique de l'étude de faisabilité et correspondait à l'acquisition des données ERT sur le recouvrement, soumis à un essai d'infiltration pour mieux détecter l'écoulement. Les données collectées ont ensuite été traitées par inversion (Figure 5.9).

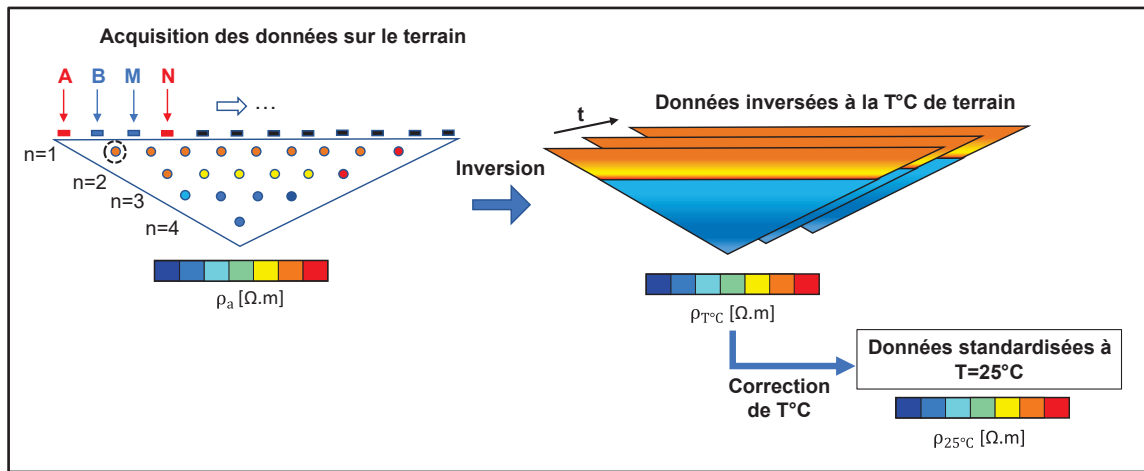


Figure 5.9 Processus d'acquisition des données avec un protocole Wenner et inversion de ces données avec prise en compte de la température

La diminution de résistivité liée à l'infiltration a été clairement détectée dans les résultats d'inversion, et une déviation latérale de l'écoulement a été observée à la fois dans les données apparentes et dans les modèles inversés.

La présence d'une tranchée 2D sur le site a généré de nombreuses anomalies en surface. En effet, comme cette tranchée coupait transversalement le profil longitudinal d'acquisition, les électrodes situées de part et d'autre ont mesuré des résistivités apparentes artificiellement plus élevées. Cette géométrie locale pouvait donner l'impression que l'essai d'infiltration avait un effet plus marqué qu'en réalité, alors qu'il s'agissait d'un artefact. Pour limiter ces biais, il serait pertinent de déplacer la tranchée par rapport au profil ou d'enterrer les électrodes. Il reste toutefois important de noter qu'une tranchée 2D peut être utile pour contraindre l'écoulement dans la direction de la pente. Compte tenu des nombreux artefacts observés sur les imageries d'inversion, il serait intéressant de contraindre les inversions pour aider à améliorer la précision de l'interprétation des processus hydrogéologiques.

### 5.2.3 Mise en œuvre de l'approche combinée (OS3)

L'OS3 avait pour objectif de contourner les limitations de l'inversion classique réalisée lors de l'OS2, qui produisait de nombreux artefacts empêchant une interprétation quantitative fiable

de l'écoulement de l'eau. Pour ce faire, le logiciel SEEP/W a été utilisé afin de générer, pour chacun des 63 pas de temps correspondant aux 63 acquisitions ERT, des distributions 2D de teneur en eau. Ces distributions ont ensuite été converties en résistivité via la loi d'Archie adaptée aux milieux non saturés. La résistivité interstitielle de chaque couche a été définie à partir de mesures ponctuelles de conductivité électrique, tandis que les paramètres  $n_a$  et  $m_a$  ont été estimés à partir de valeurs issues de la littérature pour des matériaux comparables (Dimech et al., 2023). Une correction de température a également été appliquée pour ajuster les résistivités à 25 °C aux conditions réelles du terrain.

Ces résistivités ont servi à construire un modèle géophysique à partir duquel des résistivités apparentes synthétiques ont été calculées par modélisation directe, en utilisant la même configuration d'électrodes que sur le terrain (64 électrodes espacées de 0,5 m avec un protocole Wenner). La comparaison entre les données synthétiques et les mesures sur le terrain a été réalisée non pas en valeurs absolues, trop divergentes en raison de l'absence de calibration pétrophysique précise des matériaux du recouvrement, mais en termes de variation relative par rapport à la moyenne des dix premières acquisitions effectuées avant l'essai d'infiltration. Les différentes étapes sont récapitulées de manière simplifiée à la figure 5.10 ci-dessous :

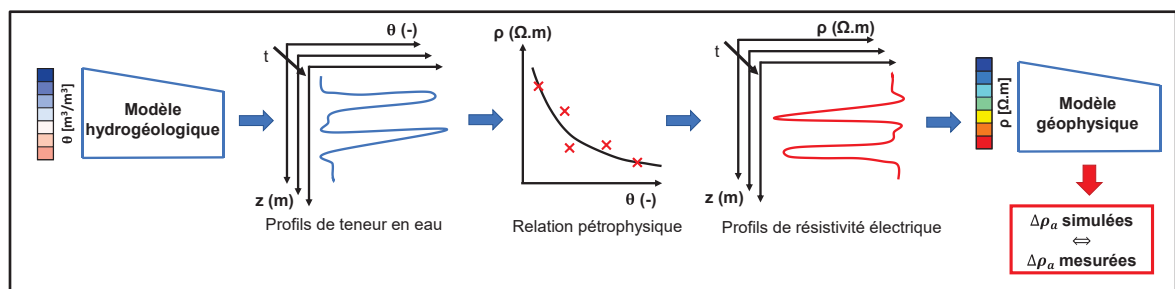


Figure 5.10 Différentes étapes pour générer des résistivités apparentes simulées depuis un modèle hydrogéologique, comparées ensuite aux données mesurées

Les résultats ont montré que le modèle hydrogéologique 2D, calibré à partir des sondes de teneur en eau, reproduisait correctement la dynamique des variations de résistivité apparente en conditions naturelles et pendant l'essai d'infiltration contrôlé, pour la partie amont du site au niveau de la tranchée. En revanche, en aval, la diminution de résistivité prédite par le modèle

synthétique était plus marquée que celle observée sur le terrain. Cet écart s'explique par plusieurs simplifications, parmi lesquelles la représentation 2D du milieu par le modèle et l'absence de prise en compte de l'hétérogénéité réelle des matériaux in situ.

Pour réduire ces écarts, il serait pertinent d'automatiser les étapes présentées à la Figure 5.10, correspondant en pratique à une première itération d'une inversion hydrogéophysique couplée. Une telle automatisation permettrait d'optimiser l'ajustement entre les variations de résistivités apparentes synthétiques et mesurées, de manière analogue à une inversion ERT classique. Dans le contexte de cette étude, l'optimisation porterait principalement sur la valeur de l'AEV des différents matériaux, qui contrôle directement la quantité d'eau présente dans chaque couche du recouvrement.

Cette approche automatisée offrirait la possibilité d'effectuer une analyse de sensibilité de l'AEV, et d'évaluer l'erreur à chaque itération à partir d'un critère basé sur la comparaison des pseudo-sections 2D. L'objectif final étant d'améliorer la représentation hydrogéophysique du recouvrement et d'obtenir un modèle capable de reproduire fidèlement la dynamique observée sur le terrain en tout point.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### *Synthèse des travaux*

L'objectif principal de cette étude était de développer une démarche méthodologique globale pour le suivi de l'écoulement de l'eau dans un recouvrement minier à l'aide de la méthode TL-ERT. L'approche comprenait une étude de faisabilité numérique, suivie d'une campagne de mesure sur le terrain et d'une analyse des données avec un modèle hydrogéologique. Cette méthodologie a permis de valider l'intérêt de l'utilisation combinée de la géophysique et de l'hydrogéologie pour mieux surveiller les flux d'eau dans les recouvrements miniers.

Les résultats de l'étude de faisabilité numérique (OS1) ont permis de définir les paramètres nécessaires pour le dimensionnement du dispositif d'acquisition sur le terrain. Un espacement de 0.5 m entre les électrodes a été retenu, et le protocole Wenner a été choisi pour sa bonne résolution verticale et son temps d'acquisition court, indispensable pour suivre la dynamique rapide de l'écoulement de l'eau. Les simulations hydrogéologiques ont permis d'estimer le flux d'eau à injecter dans la tranchée. Le volume d'eau retenu, environ 2000 L sur une période de 4 h, a été suffisant pour engendrer une diminution d'environ de 25% de la résistivité apparente sous la tranchée. Cela a confirmé la pertinence des modèles conceptuels utilisés pour préparer la campagne de terrain.

Sur le terrain, 63 imageries ERT ont été acquises en continu sur une période de huit jours. Les données ont d'abord été traitées par inversion et analysées sous forme de profils 1D, 2D, dans l'espace et le temps. Après correction de la température à 25 °C (compte tenu d'une variation de près de 15 °C dans les 15 premiers centimètres du recouvrement), l'absence de précipitations pendant cette période a permis d'attribuer les variations de résistivité uniquement à l'eau injectée pendant l'essai d'infiltration.

Les imageries inversées ont été cohérentes avec celles prévues par l'étude de faisabilité en mettant en évidence trois principales zones de résistivité : une couche conductrice entre 50 et 100  $\Omega \cdot m$ , une couche résistive entre environ 200 et 500  $\Omega \cdot m$  et, en profondeur, une zone très conductrice inférieure à 25  $\Omega \cdot m$  correspondant aux résidus. Cette stratigraphie et les épaisseurs

correspondantes n'étaient pas en accord avec la stratigraphie réelle du recouvrement (quatre couches dans la CEBC). La faible épaisseur des couches et les contrastes de résistivité ont entraîné plusieurs artefacts visibles dans les résultats d'inversion : profondeur d'infiltration d'eau trop importante (jusqu'à -4 m), augmentation artificielle de résistivité en amont ( $\sim +10\%$ ), diminution excessive de la résistivité près de la tranchée ( $\sim -50\%$ ). Bien que les ratios de résistivité aient mis en évidence une déviation latérale de l'écoulement avec une diminution de 15 à 25 % en bas de pente, ils ne permettaient pas d'obtenir une distribution fiable de la teneur en eau. Ces limites ont confirmé qu'une approche complémentaire basée sur la modélisation hydrogéologique était nécessaire pour mieux interpréter l'écoulement.

La seconde approche consistait donc à élaborer et calibrer un modèle hydrogéologique à partir des données de teneur en eau mesurées par les sondes Teros 12 entre la fin octobre et la mi-décembre. La calibration a été réalisée en ajustant les courbes de rétention d'eau et les fonctions de perméabilité de manière itérative, puis en comparant les profils simulés aux données mesurées des stations situées en haut, milieu et bas de pente dans le recouvrement. À partir du modèle calibré, des résistivités apparentes synthétiques amenées à la température du terrain ont été générées, en utilisant la relation d'Archie. Les valeurs des paramètres d'Archie ( $m_a$ ,  $n_a$  et  $\rho_w$ ) provenaient à la fois des mesures in situ (pour  $\rho_w$ ) et de la littérature sur des matériaux de recouvrement similaires (Dimech et al., 2019). Les comparaisons entre les variations relatives des données simulées et réelles ont montré un bon ajustement en amont (RMSE  $\sim 2\%$ ) et sous la tranchée ( $\sim 5\%$ ). En aval, l'écart était plus important ( $\sim 9\%$ ). Sur l'ensemble de la pente, la RMSE variait entre 2 et 12 % pour des profondeurs allant de 0,5 à 1,3 m. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces différences en bas de pente, notamment l'aspect 2D du modèle hydrogéologique qui ne prend pas en compte les écoulements d'eau latéraux, et la non représentativité de l'hétérogénéité des matériaux à l'échelle du terrain. Cela montre que les résultats TL-ERT apportent une information spatiale essentielle pour « diagnostiquer » la précision d'un modèle hydrogéologique. Finalement, l'approche d'interprétation mise en place, consistant à comparer directement les résistivités apparentes mesurées et simulées, sans passer par l'étape d'inversion, permet d'obtenir une meilleure visualisation de l'écoulement. Cette approche constitue une preuve de concept encourageante et ouvre la voie à des méthodes

de couplage hydrogéophysique plus avancées et automatisées dans le contexte de la restauration minière.

### Recommandations pour le futur

Plusieurs recommandations peuvent être formulées dans le cadre d'une poursuite de ces travaux de maîtrise, tant au niveau du dispositif expérimental qu'au niveau de la modélisation numérique. Ces recommandations permettront d'améliorer à la fois la qualité des données ERT acquises sur le terrain et la calibration du modèle hydrogéologique pour obtenir une interprétation plus robuste des écoulements d'eau dans la CEBC inclinée.

Sur le plan expérimental, la configuration Wenner s'est révélée efficace pour suivre l'évolution de la résistivité, grâce à une bonne résolution verticale et à un temps d'acquisition globalement bien adapté à l'essai d'infiltration contrôlé. Il serait toutefois pertinent d'optimiser davantage le protocole d'acquisition en fonction des conditions spécifiques du site. L'automatisation des mesures constituerait également un atout important, puisqu'elle permettrait de suivre l'évolution des résistivités lors d'événements de précipitations « naturels », offrant ainsi une meilleure compréhension hydrogéologique du recouvrement dans son ensemble.

Il serait aussi intéressant de compléter les acquisitions 2D actuelles par des acquisitions 3D, ce qui permettrait d'identifier plus clairement les écoulements tridimensionnels susceptibles de se développer autour de la tranchée ou au sein du recouvrement. L'installation d'électrodes dans des forages ou au sein du recouvrement constituerait également une amélioration notable en affinant la résolution verticale de la mesure. Par conséquent, il serait possible de réduire les artefacts causés par des structures locales, comme la tranchée, qui modifient le trajet des lignes de courant électrique et de mieux estimer l'épaisseur réelle des couches.

L'ajout de sondes hydrogéologiques vis-à-vis du profil permettrait d'obtenir des mesures ponctuelles de teneur en eau durant l'essai d'infiltration, ce qui représente une information importante pour la calibration des modèles. De plus, l'utilisation de méthodes géophysiques additionnelles, telles que le TL-GPR, pourrait aider à distinguer plus précisément les variations de teneur en eau au cours du temps, en particulier dans les couches superficielles.

L'installation d'une station météorologique sur le site représenterait également un avantage important, puisqu'elle permettrait d'intégrer localement les précipitations dans les simulations hydrogéologiques.

Enfin, une caractérisation plus précise des matériaux en laboratoire, notamment par la détermination de relations pétrophysiques et de CRE spécifiques obtenues à l'aide d'essais de type ER-Tempe Cell, réduirait les incertitudes des paramètres utilisés dans le modèle.

Sur le plan de la modélisation numérique, il serait judicieux d'intégrer la température et la géochimie de l'eau dans un modèle couplé thermo-hydro-géophysique en 3D. Cela permettrait de mieux représenter le comportement du recouvrement et d'obtenir des simulations plus fiables à l'échelle du site.

Concernant la calibration du modèle, l'inclusion des données de succion pourrait rendre le modèle plus robuste. En effet, pour la couche de rétention d'eau (matériau fin), qui est toujours proche de la saturation, les données de teneur en eau varient peu, tandis que la succion peut fournir des informations supplémentaires. De plus, il serait préférable de sélectionner une zone plutôt qu'un nœud spécifique, car les écoulements se concentrent aux interfaces de couches, ce qui peut entraîner des variations significatives des valeurs locales de teneur en eau selon le nœud choisi.

Enfin, automatiser la comparaison entre les données de résistivités apparentes simulées par le modèle hydrogéologique et mesurées sur le terrain serait la dernière étape. En ajustant automatiquement les paramètres du modèle hydrogéologique, il serait possible de réduire systématiquement les écarts entre le modèle et les observations de manière itérative et ainsi effectuer une sorte « d'inversion hydrogéophysique ».

# ANNEXE I

## POSTER PRÉSENTÉ À EGU (AVR.2025)





### Combining hydrogeological modelling and geoelectrical monitoring to assess the performance of a multi-layer mine waste reclamation cover system

Leila Bedoui<sup>(1)</sup>, Adrien Dimech<sup>(1)</sup>, Karine Sylvain<sup>(2,3)</sup>, Vincent Boulanger-Martel<sup>(2)</sup>, Bruno Bussière<sup>(2)</sup>, Thierry Impimma<sup>(1)</sup>, Benoît Plante<sup>(2)</sup>

(1) Département de génie de la construction, École de technologie supérieure, Montréal, Canada; (2) Research Institute on Mines and Environment, Rouyn-Noranda, QC, Canada; (3) Polytechnique Montréal, Canada

### 1. Introduction

**a) Mine waste reclamation cover to reduce water infiltration**

**What is its purpose?**  
Prevent various types of contaminated drainage due to infiltration of H<sub>2</sub>O in tailings piles used by mining activities [1]

**How?**  
Divert water laterally down the slope and create a moisture-escaping layer that remains permanently saturated

**What are the challenges to assess its performance?**

- Partially hydrogeological sensors to measure volumetric water content and suction
- Geoelectrical monitoring for water quality monitoring and trigger investigations [2]

**b) Infiltration test setup**

**Infiltration test parameters**

- 2000 L of water in a 2000 µm filter with a 2-hour pause in the middle to refill the tank and trench at regular intervals of 1 min, 2 min and 5 min
- Simultaneous measurement of water levels in the trench and in the cover system

**Field ERT set up**

**TLERT parameters**

- 0.5 m apart in Wernery's 4-draw configuration every 5 hours from 22:00 to 24:00 and 24:00 to 02:00
- 63 ERT images in total

**Key findings:**

- More than 50% reduction in infiltration in the trench
- Subsequent increase of temperature the size of the trench
- The integration of hydrogeological modelling in the TLERT data processing phase is necessary to better assess water flow paths within the mine cover.
- In the long term, this joint approach could be used to refine the accuracy of hydrogeological models and thus better predict the behavior of multi-layer mine waste reclamation cover systems.

### 2. Methodology for field work

**a) Numerical feasibility study**

**Hydrogeological model inputs in STEP (w/ B)**

- Microgeological data [4] for the 2022 cover system
- Infiltration rate of 2.10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day
- Infiltration test: sufficient for ERT measurements without affecting cover efficiency

**b) Field ERT set up**

**TLERT parameters**

- 0.5 m apart in Wernery's 4-draw configuration every 5 hours from 22:00 to 24:00 and 24:00 to 02:00
- 63 ERT images in total

**Key findings:**

- More than 50% reduction in infiltration in the trench
- Subsequent increase of temperature the size of the trench
- The integration of hydrogeological modelling in the TLERT data processing phase is necessary to better assess water flow paths within the mine cover.
- In the long term, this joint approach could be used to refine the accuracy of hydrogeological models and thus better predict the behavior of multi-layer mine waste reclamation cover systems.

### 3. Geoelectrical monitoring results

**a) Inversion results**

**Parameters inverting TLERT results**

**Temperature**

**b) Discussion**

- Geoelectrical monitoring provides an overview of water propagation in the mine cover, complementing the information provided by point sensors.
- The integration of hydrogeological modelling in the TLERT data processing phase is necessary to better assess water flow paths within the mine cover.
- In the long term, this joint approach could be used to refine the accuracy of hydrogeological models and thus better predict the behavior of multi-layer mine waste reclamation cover systems.

### 4. Conclusion

**Key points:**

- A numerical feasibility study is useful prior to the field campaign to optimize the quality of the data obtained.
- Geoelectrical monitoring provides an overview of water propagation in the mine cover, complementing the information provided by point sensors.
- The integration of hydrogeological modelling in the TLERT data processing phase is necessary to better assess water flow paths within the mine cover.
- In the long term, this joint approach could be used to refine the accuracy of hydrogeological models and thus better predict the behavior of multi-layer mine waste reclamation cover systems.

### 5. References

[1] Bedoui, L., Dimech, A., Sylvain, K., Martel, V., Bussière, B., Impimma, T., Plante, B. (2024) "Performance of a multi-layer mine waste reclamation cover system: A numerical and field study." *Journal of Environmental and Earth Engineering Science*, vol. 18, no. 1, pp. 1-15.

[2] Bedoui, L., Dimech, A., Sylvain, K., Martel, V., Bussière, B., Impimma, T., Plante, B. (2024) "Geoelectrical monitoring of a multi-layer mine waste reclamation cover system: A numerical and field study." *Journal of Environmental and Earth Engineering Science*, vol. 18, no. 1, pp. 1-15.

Figure A I-1 Poster réalisé dans le cadre de la conférence EGU à Vienne en avril 2025



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amidu, S. A., & Dunbar, J. A. (2007). Geoelectric studies of seasonal wetting and drying of a Texas Vertisol. *Vadose Zone Journal*, 6(3), 511-523.
- Archie, G. E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62. doi: 10.2118/942054-g
- Arosio, D., Munda, S., Tresoldi, G., Papini, M., Longoni, L., & Zanzi, L. (2017). A customized resistivity system for monitoring saturation and seepage in earthen levees: installation and validation. *Open Geosciences*, 9(1), 457-467.
- ASTM. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils*. ASTM standard D2434.
- ASTM. (2016a). *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. ASTM standard D5084-16a
- ASTM. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM standard D2216-19
- ASTM. (2025). *Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge*. ASTM standard D6836-16.
- Attia, A., Fratta, D., & Bassiouni, Z. (2008). Irreducible water saturation from capillary pressure and electrical resistivity measurements. *Oil & Gas Science and Technology- Revue de l'IFP*, 63(2), 203-217.
- Aubertin, M. (1995). *Évaluation en laboratoire des barrières sèches construites à partir de résidus miniers : rapport final* (Rapport technique). Polytechnique Montréal.
- Aubertin, M., Bussiere, B., & Chapuis, R. P. (1996). Hydraulic conductivity of homogenized tailings from hard rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 470-482.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (1998). *Field investigation of covers with capillary effect to control acid mine drainage* présentée à CIM/CMMI/MIGA98, Montréal, Québec.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., & Mbonimpa, M. (2016). *Review of the Reclamation Techniques for Acid-Generating Mine Wastes upon Closure of Disposal Sites*. doi: 10.1061/9780784480137.034

- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S. A., Bussière, B., Molson, J., & Chapuis, R. P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, *46*(10), 1146-1164. doi: 10.1139/t09-050
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, *40*(6), 1104-1122. doi: 10.1139/t03-054
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., & Maqsoud, A. (2015). *Revue technique des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA*.
- Auken, E., Doetsch, J., Fiandaca, G., Christiansen, A. V., Gazoty, A., Cahill, A. G., & Jakobsen, R. (2014). Imaging subsurface migration of dissolved CO<sub>2</sub> in a shallow aquifer using 3-D time-lapse electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, *101*, 31-41.
- Auken, E., Pellerin, L., Christensen, N. B., & Sørensen, K. (2006). A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics*, *71*(5), G249-G260.
- Awoh, S., Mbonimpa, M., & Bussière, B. (2021). Water Covers. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 6, CRC Press, Boca Raton. 135-162.
- Bathe, K.-J. (2006). *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe.
- Bedoui, L., Dimech, A., Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Plante, B. (2024). *Numerical feasibility study on the application of geophysics as an autonomous monitoring method for mine cover systems reducing water infiltration*.
- Benisch, K., Köhn, D., Al Hagrey, S., Rabbel, W., & Bauer, S. (2015). A combined seismic and geoelectrical monitoring approach for CO<sub>2</sub> storage using a synthetic field site. *Environmental Earth Sciences*, *73*(7), 3077-3094.
- Binley, A., Cassiani, G., Middleton, R., & Winship, P. (2002). Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, *267*(3-4), 147-159.
- Binley, A., Hubbard, S., Huisman, J., Revil, A., Robinson, D., Singha, K., & Slater, L. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface

- processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51(6), 3837-3866. doi: <https://doi.org/10.1002/2015WR017016>
- Binley, A., & Kemna, A. (2005). DC resistivity and induced polarization methods. Dans *Hydrogeophysics* (pp. 129-156). Springer.
- Blight, G. E. (2009). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities* ((1st ed.) éd.). doi: <https://doi.org/10.1201/9780203859407>
- Botula, Y.-D., Bussière, B., Guittonny, M., & Hotton, G. (2024). Modeling the influence of forest vegetation and climate change on the long-term performance of a cover with capillary barrier effects used to control acid mine drainage: the Lorraine case study. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(9), 722-744. doi: 10.1080/17480930.2024.2345033
- Bouchedda, A., Chouteau, M., Binley, A., & Giroux, B. (2012). 2-D joint structural inversion of cross-hole electrical resistance and ground penetrating radar data. *Journal of Applied Geophysics*, 78, 52-67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.10.009>
- Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Côté, J. (2021). Insulation Covers. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 9, CRC Press, Boca Raton. 203-221.
- Bouzaglou, V., Crestani, E., Salandin, P., Gloaguen, E., & Camporese, M. (2018). Ensemble Kalman Filter Assimilation of ERT Data for Numerical Modeling of Seawater Intrusion in a Laboratory Experiment. *Water*, 10(4), 397.
- Bréard Lanoix, M. L., Pabst, T., & Aubertin, M. (2020). Field determination of the hydraulic conductivity of a compacted sand layer controlling water flow on an experimental mine waste rock pile. *Hydrogeology Journal*, 28(4), 1503-1515.
- Briggs, M. A., Campbell, S., Nolan, J., Walvoord, M. A., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F. D., & Lane, J. W. (2017). Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), 52-65.
- Brooks, R., & Corey, A. (1964). Hydraulic properties of porous medium. Hydrology paper 3, Colorado State University (Fort Collins), Colorado.
- Brunet, P., Clément, R., & Bouvier, C. (2010). Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)—A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 146-153.

- Brunner, P., & Simmons, C. (2011). HydroGeoSphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model. *Ground water*, 50, 170-176. doi: 10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x
- Brunner, P., Simmons, C. T., Cook, P. G., & Therrien, R. (2010). Modeling surface water-groundwater interaction with MODFLOW: Some considerations. *Groundwater*, 48(2), 174-180.
- Budler, J. (2017). Improved geoelectrical imaging of water content dynamics applied to landslide monitoring *Doctoral dissertation, PhD thesis*.
- Bussière, B. (1999). *Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques*
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052. doi: 10.1139/T07-040
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2021a). *Hard rock mine reclamation: from prediction to management of acid mine drainage*. CRC press.
- Bussière, B., & Guittonny, M. (2021b). Long-Term Evolution of Reclamation Performance. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 14, CRC Press, Boca Raton. 351-371.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., & Julien, M. (2003). Results from the monitoring program at the LTA site: hydraulic behavior of the cover.
- Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., & Julien, M. R. (2006). Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Québec. *CIM Magazine*, 1(6), 1-11.
- Bussière, B., Pabst, T., Boulanger-Martel, V., Guittonny, M., Plante, B., Neculita, C. M., . . . Labonté-Raymond, P.-L. (2021). Monitoring the Performance of Mine Site Reclamation. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 10, CRC Press, Boca Raton. 225-269.
- Bussière, B., Potvin, R., Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Maqsoud, A., & Cyr, J. (2015). Restauration du site minier Lorraine, Latulipe, Québec : Résultats de 10 ans de suivi. *Déchets, sciences et techniques*, N°54 - Avril-Mai-Juin 2009. doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.1254

- Bussière, B., & Wilson, G. (2021). Store-and-Release Covers. In: Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 5, CRC Press, Boca Raton. 351-371.
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A., & Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*, 5(4), 36.
- Camporese, M., Cassiani, G., Deiana, R., Salandin, P., & Binley, A. (2015). Coupled and uncoupled hydrogeophysical inversions using ensemble Kalman filter assimilation of ERT-monitored tracer test data. *Water Resources Research*, 51(5), 3277-3291.
- Carey, A. M., Paige, G. B., Carr, B. J., & Dogan, M. (2017). Forward modeling to investigate inversion artifacts resulting from time-lapse electrical resistivity tomography during rainfall simulations. *Journal of Applied Geophysics*, 145, 39-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.08.002>
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., & Binley, A. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 59(3), 244-259.
- Castonguay, V., Ozeir, E., Medina, M., & Lessard, F. Lessons learned from designing a soil cover system for a tailings storage facility exposed to an arid climate.
- Chambers, J., Gunn, D., Wilkinson, P., Meldrum, P., Haslam, E., Holyoake, S., . . . Wragg, J. (2014). 4D electrical resistivity tomography monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. *Near Surface Geophysics*, 12(1), 61-72. doi: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013002>
- Chambers, J., Gunn, D., Wilkinson, P., Ogilvy, R., Ghataora, G., Burrow, M., & Smith, R. (2008). Non-invasive time-lapse imaging of moisture content changes in earth embankments using electrical resistivity tomography (ERT). *Advances in transportation geotechnics*, 489-494.
- Chambers, J., Holmes, J., Whiteley, J., Boyd, J., Meldrum, P., Wilkinson, P., . . . Glendinning, S. (2022). Long-term geoelectrical monitoring of landslides in natural and engineered slopes. *The Leading Edge*, 41(11), 768-776.
- Chapuis, R. P. (2009). Numerical modeling of reservoirs or pipes in groundwater seepage. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 895-901.

- Chapuis, R. P., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M., & Crespo, R. (2001). A user's approach to assess numerical codes for saturated and unsaturated seepage conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1113-1126. doi: 10.1139/t01-055
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L., Morra, C., Laurent, J. P., & Gourc, J. P. (2010). Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring. *Waste Management*, 30(3), 452-464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.002>
- Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Ribolzi, O., & Legchenko, A. (2009). Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(10), 886-898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.005>
- Cockett, R., Kang, S., Heagy, L. J., Pidlisecky, A., & Oldenburg, D. W. (2015). SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers & Geosciences*, 85, 142-154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.015>
- Cominelli, S., Rivera, L. D., Brown, W. G., Ochsner, T. E., & Patrignani, A. (2024). Calibration of TEROS 10 and TEROS 12 electromagnetic soil moisture sensors. *Soil science society of America journal*, 88(6), 2104-2122.
- Costa Silva, S. (2024). *Comportement hydrogéologique de systèmes de recouvrement installés dans des cellules expérimentales de la mine Éléonore* (Mémoire de maîtrise, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Montréal).
- Dagenais, A. M., Aubertin, M., Bussière, B., & Cyr, J. (2005). Performance of the Lorraine mine site cover to limit oxygen migration. *2005 SME Annual Meeting: Got Mining - Preprints*, 318, 843-857.
- Dagenais, A. M., Aubertin, M., Bussière, B., & Martin, V. (2005). Large scale applications of covers with capillary barrier effects to control the production of acid mine drainage.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 52(5), 379-398.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application*. Victor Dalmont.
- Dean, T., Bell, J., & Baty, A. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 93(1-2), 67-78.

- Delage, P., & Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur Mécanique des sols et géotechnique, base documentaire : TIP541WEB*(ref. article : c301). doi: <https://doi.org/10.51257/a-v1-c301>
- Demers, I., & Pabst, T. (2021a). Alternative and Innovative Integrated Mine Waste Management Approaches. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 13, CRC Press, Boca Raton. 321-342.
- Demers, I., & Pabst, T. (2021b). Covers with Capillary Barrier Effects. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 7, CRC Press, Boca Raton. 167-184.
- Descloitres, M., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J.-J., Mohan Kumar, M., & Subramanian, S. (2008). Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrological Processes*, 22, 384-394. doi: 10.1002/hyp.6608
- Dey, A., & Morrison, H. (1979). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical prospecting*, 27(1), 106-136.
- Dimech, A. (2018). *Imagerie de l'Écoulement de l'Eau dans une Halde à Stériles Expérimentale par Tomographie 3D de Résistivité Électrique* (M.A.Sc., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Canada -- Quebec, CA). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global; ProQuest Dissertations & Theses Global Closed Collection. (13839173).
- Dimech, A. (2020). *Literature review (2020) - Partial exigence for PhD*.
- Dimech, A. (2023). *Application de la tomographie de résistivité électrique pour la surveillance de la teneur en eau volumique dans les ouvrages de restauration minière* (Polytechnique Montréal).
- Dimech, A., Bussière, B., Cheng, L., Chouteau, M., Fabien-Ouellet, G., Chev , N., . . . Chambers, J. (2024). Monitoring moisture dynamics in multi-layer cover systems for mine tailings reclamation using autonomous and remote time-lapse electrical resistivity tomography. *Canadian Geotechnical Journal*. doi: 10.1139/cgj-2023-0112
- Dimech, A., Cheng, L., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., . . . Isabelle, A. (2022). A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years : Perspectives for Mining Waste Monitoring.

*Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699-1759. doi: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>

Dimech, A., Chouteau, M., Aubertin, M., Bussière, B., Martin, V., & Plante, B. (2019). Three-Dimensional Time-Lapse Geoelectrical Monitoring of Water Infiltration in an Experimental Mine Waste Rock Pile. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 180098. doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2018.05.0098>

Dimech, A., Isabelle, A., Sylvain, K., Liu, C., Cheng, L., Bussière, B., . . . Chambers, J. (2023). A multiscale accuracy assessment of moisture content predictions using time-lapse electrical resistivity tomography in mine tailings. *Scientific Reports*, 13(1), 20922. doi: 10.1038/s41598-023-48100-w

Doetsch, J., Linde, N., Coscia, I., Greenhalgh, S. A., & Green, A. G. (2010). Zonation for 3D aquifer characterization based on joint inversions of multimethod crosshole geophysical data. *Geophysics*, 75(6), G53-G64.

Dubuc, J. (2018). *Étude du comportement hydrogéologique d'une couche de contrôle des écoulements placée à la surface d'une halde à stériles expérimentale* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).

Ferré, T., Bentley, L., Binley, A., Linde, N., Kemna, A., Singha, K., . . . Minsley, B. (2009). Critical steps for the continuing advancement of hydrogeophysics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(23), 200-200.

Forbes, B., Ouellet, S., Suszek, N., Lato, M., & Russell, B. (2021). Application of distributed acoustic sensing within a tailings dam warning system. Dans *Proc. of Tailings and Mine Waste Conference* (Vol. 1, pp. 65-68).

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice.

Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521-532.

Freeze, & Cherry. (1979). *Groundwater*.

Friedman, S. P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 45-70.

Gallardo, L. A., & Meju, M. A. (2004). Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3).

- Gardner, W. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85, 228-232.
- Garré, S., Coteur, I., Wongleecharoen, C., Kongkaew, T., Diels, J., & Vanderborght, J. (2013). Noninvasive monitoring of soil water dynamics in mixed cropping systems: A case study in Ratchaburi Province, Thailand. *Vadose Zone Journal*, 12(2), vzj2012-0129.
- Geostudio. (2022). Heat and Mass Transfer with GeoStudio.
- Ghorbani, Y., Nwaila, G. T., Zhang, S. E., Bourdeau, J. E., Cánovas, M., Arzua, J., & Nikadat, N. (2023). Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. *Resources Policy*, 80,103222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103222>
- Gibson, B., Frijhoff, J., & Fedosenko, K. (2024). The energy transition will need critical minerals and metals. Here's how to mine responsibly.
- Giertzuch, P. L., Doetsch, J., Jalali, M., Shakas, A., Schmelzbach, C., & Maurer, H. (2020). Time-lapse ground penetrating radar difference reflection imaging of saline tracer flow in fractured rock. *Geophysics*, 85(3), H25-H37.
- Glover, P. W. (2010). A generalized Archie's law for n phases. *Geophysics*, 75(6), E247-E265.
- Greer, B. M., Burbey, T. J., Zipper, C. E., & Hester, E. T. (2017). Electrical resistivity imaging of hydrologic flow through surface coal mine valley fills with comparison to other landforms. *Hydrological Processes*, 31(12), 2244-2260.
- Günther, T. (2004). *Inversion Methods and Resolution Analysis for the 2D/3D Reconstruction of Resistivity Structures from DC Measurements*.
- Hammond, G. E., Lichtner, P. C., & Mills, R. (2014). Evaluating the performance of parallel subsurface simulators: An illustrative example with PFLOTRAN. *Water Resources Research*, 50(1), 208-228.
- Hayley, K., Bentley, L. R., Gharibi, M., & Nightingale, M. (2007). Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring. *Geophysical Research Letters*, 34(18). doi: <https://doi.org/10.1029/2007GL031124>

- Hayley, K., Pidlisecky, A., & Bentley, L. R. (2011). Simultaneous time-lapse electrical resistivity inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 75(2), 401-411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.035>
- Hester, E. T., Little, K. L., Buckwalter, J. D., Zipper, C. E., & Burbey, T. J. (2019). Variability of subsurface structure and infiltration hydrology among surface coal mine valley fills. *Science of the total environment*, 651, 2648-2661.
- Hillel, D. (2003a). 6. - Water Content and Potential. Dans B. A. Press (Éd.), *Introduction to Environmental Soil Physics* (pp. 93-125). doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012348655-4/50007-1>
- Hillel, D. (2003b). 8 - Water Flow in Unsaturated Soil. Dans B. A. Press (Éd.), *Introduction to Environmental Soil Physics* (pp. 149-166). doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012348655-4/50009-5>
- Hinnell, A., Ferré, T., Vrugt, J., Huisman, J., Moysey, S., Rings, J., . . . Hinnell, C. (2010). Improved extraction of hydrologic information from geophysical data through coupled hydrogeophysical inversion. *Water Resources Research*, 46. doi: 10.1029/2008WR007060
- Holmes, J., Chambers, J., Meldrum, P., Wilkinson, P., Boyd, J., Williamson, P., . . . Donohue, S. (2020). 4-Dimensional Electrical Resistivity Tomography for continuous, near-real time monitoring of a landslide affecting transport infrastructure in British Columbia, Canada. *Near Surface Geophysics*, 18, 337-351. doi: 10.1002/nsg.12102
- Hotton, G. (2019). *Influence des changements climatiques sur la performance de couverture à effet de barrière capillaire : étude du cas Lorraine* (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/3851/>
- Hubbert, M. K. (1940). The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, 48(8), 785-944.
- Hubbert, M. K. (1957). DARCY'S LAW AND THE FIELD EQUATIONS OF THE FLOW OF UNDERGROUND FLUIDS. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 2(1), 23-59. doi: 10.1080/02626665709493062
- Hübner, R., Günther, T., Heller, K., Noell, U., & Kleber, A. (2017). Impacts of a capillary barrier on infiltration and subsurface stormflow in layered slope deposits monitored with 3-D ERT and hydrometric measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(10), 5181-5199. doi: 10.5194/hess-21-5181-2017

- Impinna, T., Dimech, A., Luzy, A., Baraer, M., Szabo Som, C., Fabien-Ouellet, G., & Bussière, B. (2024). *Geophysical characterization of a cover with capillary barrier effect installed on a tailing storage facility using electrical, ground- penetrating radar and seismic methods.*
- INAP. (2009). Global acid rock drainage guide (GARD Guide). Repéré à <http://www.gardguide.com>
- Inaudi, D., Walder, R., Blin, R., & Dinh, O. (2023). Fiber Optic Distributed Sensing System for Monitoring of Tailings Storage Facilities. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12(3), 345-357.
- Isabelle, A. (2022). *Assimilation de données hydrogéophysiques par filtre de Kalman d'ensemble pour l'estimation de la teneur en eau en restauration minière* [Assimilation of hydrogeophysical data by ensemble Kalman filter for the estimation of water content in mining restoration] (M.A.Sc., Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), Canada -- Quebec, CA). Repéré à ProQuest Dissertations & Theses Global. (31059462).
- Jacobsen, O. H., & Schjønning, P. (1993). Field evaluation of time domain reflectometry for soil water measurements. *Journal of Hydrology*, 151(2), 159-172. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90234-Z](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90234-Z)
- Jalabert, J. (2024). *Modélisation du Bilan Hydrique De Cellules Expérimentales De Roches Stériles Avec Ou Sans Recouvrement Végétalisé* Ecole Polytechnique: Montreal Canada.
- Jayawickreme, D., Van Dam, R., & Hyndman, D. (2008). Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions. *Geophysical Research Letters*, 35(18).
- Jayawickreme, D., Van Dam, R., & Hyndman, D. (2010). Hydrological consequences of land-cover change: Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics*, 75(4), WA43-WA50.
- Johansson, S., Sjö Dahl, P., Mondanos, M., & Stork, A. (2023). Distributed fibre optic sensing in Swedish dams and tailing storage facilities. *Hydropower Dams*, 2, 45-49.
- Johnson, T., Versteeg, R., Rockhold, M., Slater, L., Ntarlagiannis, D., Greenwood, J., & Zachara, J. (2012). Characterization of a contaminated wellfield using 3D electrical resistivity tomography implemented with geostatistical, discontinuous boundary, and known conductivity constraints. *Geophysics*, 77, EN85-EN96. doi: 10.1190/geo2012-0121.1

- Johnson, T., Versteeg, R., Ward, A., Day-Lewis, F., & Revil, A. (2010). Improved hydrogeophysical characterization and monitoring through parallel modeling and inversion of time-domain resistivity and induced-polarization data. *Geophysics*, 75(4), WA27-WA41.
- Kalonji Kabambi, A., Bussière, B., & Demers, I. (2017). Hydrogeological Behaviour of Covers with Capillary Barrier Effects Made of Mining Materials. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(3), 1199-1220. doi: 10.1007/s10706-017-0174-3
- Karandish, F., & Šimůnek, J. (2018). An application of the water footprint assessment to optimize production of crops irrigated with saline water: A scenario assessment with HYDRUS. *Agricultural Water Management*, 208, 67-82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.010>
- Koestel, J., Kemna, A., Javaux, M., Binley, A., & Vereecken, H. (2008). Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR. *Water Resources Research*, 44(12). doi: <https://doi.org/10.1029/2007WR006755>
- Kovács, C. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kuhl, A. S., Kendall, A. D., Van Dam, R. L., & Hyndman, D. W. (2018). Quantifying soil water and root dynamics using a coupled hydrogeophysical inversion. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-13.
- LaBrecque, D. J., & Yang, X. (2001). Difference inversion of ERT data: A fast inversion method for 3-D in situ monitoring. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 6(2), 83-89.
- Laloy, E., Javaux, M., Vanclooster, M., Roisin, C., & Biielders, C. L. (2011). Electrical resistivity in a loamy soil: Identification of the appropriate pedo-electrical model. *Vadose Zone Journal*, 10(3), 1023-1033.
- Lamb, K. J., MacQuarrie, K. T. B., Butler, K. E., Danielescu, S., Mott, E., Grimmet, M., & Zebarth, B. J. (2019). Hydrogeophysical monitoring reveals primarily vertical movement of an applied tracer across a shallow, sloping low-permeability till interface: Implications for agricultural nitrate transport. *Journal of Hydrology*, 573, 616-630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.075>
- Lanoix, M.-L., Pabst, T., & Aubertin, M. (2020). Field determination of the hydraulic conductivity of a compacted sand layer controlling water flow on an experimental mine waste rock pile. *Hydrogeology Journal*, 1-13. doi: 10.1007/s10040-020-02129-7

- Lesmes, D. P., & Friedman, S. P. (2005). Relationships between the Electrical and Hydrogeological Properties of Rocks and Soils. Dans Y. Rubin & S. S. Hubbard (Éds.), *Hydrogeophysics* (pp. 87-128). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/1-4020-3102-5\_4
- Lichtner, P. C., Hammond, G. E., Lu, C., Karra, S., Bisht, G., Andre, B., . . . Kumar, J. (2015). *PFLOTRAN user manual: A massively parallel reactive flow and transport model for describing surface and subsurface processes*. Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States . . . .
- Loke, M. (2001). *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.
- Loke, M., & Barker, R. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. *Geophysical prospecting*, 44(1), 131-152.
- Looms, M. C., Binley, A., Jensen, K. H., Nielsen, L., & Hansen, T. M. (2008). Identifying unsaturated hydraulic parameters using an integrated data fusion approach on cross-borehole geophysical data. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 238-248.
- Looms, M. C., Jensen, K. H., Binley, A., & Nielsen, L. (2008). Monitoring unsaturated flow and transport using cross-borehole geophysical methods. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 227-237.
- Lottermoser, B. (2010a). Mine Water. Dans *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (pp. 119-203). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-12419-8\_3
- Lottermoser, B. (2010b). Tailings. Dans *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (pp. 205-241). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-12419-8\_4
- Ma, R., McBratney, A., Whelan, B., Minasny, B., & Short, M. (2011). Comparing temperature correction models for soil electrical conductivity measurement. *Precision Agriculture*, 12, 55-66. doi: 10.1007/s11119-009-9156-7
- Mainali, G., Nordlund, E., Knutsson, S., & Thunehed, H. (2015). Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(13), 5859-5875.
- Maqsood, A., Bussiere, B., Aubertin, M., Chouteau, M., & Mbonimpa, M. (2011). Field investigation of a suction break designed to control slope-induced desaturation in an oxygen barrier *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), 53-71. doi: <https://doi.org/10.1139/T10-045>

- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., & Mbonimpa, M. (2012). Predicting Hysteresis of the Water Retention Curve from Basic Properties of Granular Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(5), 1147-1159. doi: 10.1007/s10706-012-9529-y
- Maqsoud, A., Bussière, B., & Mbonimpa, M. (2021). Low Saturated Hydraulic Conductivity Covers. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 4, CRC Press, Boca Raton. 93-113.
- Maqsoud, A., Gervais, P., Bussière, B., & Le Borgne, V. (2017). Performance evaluation of equipment used for volumetric water content measurements. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 13, 27-32.
- Maqsoud, A., Mbonimpa, M., Bussière, B., Benzaazoua, M., & Dionne, J. (2015). The hydrochemical behaviour of the Aldermac abandoned mine site after its rehabilitation. Dans *Proceeding of the Canadian Geotechnical Conference, GeoQuébec*.
- Marinho, F., Take, W., & Tarantino, A. (2008). Measurement of Matric Suction Using Tensiometric and Axis Translation Techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26, 615-631. doi: 10.1007/s10706-008-9201-8
- Martin, V., Plante, B., Bussière, B., Aubertin, M., Pabst, T., Chen, D., . . . Dimech, A. (2017). *Controlling water infiltration in waste rock piles: Design, construction, and monitoring of a large-scale in-situ pilot test pile*.
- Mary, B., Peruzzo, L., Iván, V., Facca, E., Manoli, G., & Putti, M., ... & Cassiani, G. (2021). Combining models of root-zone hydrology and geoelectrical measurements: recent advances and future prospects. *Frontiers in Water*, 3, 767910.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovacs (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8), 773-787.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R., & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical & Geological Engineering*, 20(3), 235-259. doi: 10.1023/A:1016046214724
- Mbonimpa, M., Boulanger-Martel, V., Bussière, B., & Maqsoud, A. (2021). Water, Gas, and Heat Movement in Cover Materials. In: *Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage*. Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 3, CRC Press, Boca Raton. 47-84.

- Mbonimpa, M., Cissokho, F., Bussière, B., Maqsoud, A., & Aubertin, M. (2008). A numerical study of oxygen flux through inclined covers with capillary barrier effects. *Proceedings of GeoEdmonton*, 8, 21-24.
- McLachlan, P., Chambers, J., Uhlemann, S., Sorensen, J., & Binley, A. (2020). Electrical resistivity monitoring of river-groundwater interactions in a Chalk river and neighbouring riparian zone. *Near Surface Geophysics*, 18. doi: 10.1002/nsg.12114
- METERGroup. *TEROS 12 Manual*. Repéré à [https://publications.metergroup.com/Manuals/20587\\_TEROS11-12\\_Manual\\_Web.pdf](https://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf)
- METERGroup. *TEROS 21 Manual*. Repéré à [https://publications.metergroup.com/Manuals/20428\\_TEROS21\\_Gen1\\_Manual\\_Web.pdf](https://publications.metergroup.com/Manuals/20428_TEROS21_Gen1_Manual_Web.pdf)
- Mollehuara-Canales, R., Kozlovskaya, E., Lunkka, J. P., Moio, K., & Pedretti, D. (2021). Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings. *Journal of Applied Geophysics*, 192, 104402. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104402>
- Mollehuara Canales, R., Kozlovskaya, E., Lunkka, J. P., Guan, H., Banks, E., & Moio, K. (2020). Geoelectric interpretation of petrophysical and hydrogeological parameters in reclaimed mine tailings areas. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104139>
- Monego, M., Cassiani, G., Deiana, R., Putti, M., Passadore, G., & Altissimo, L. (2010). A tracer test in a shallow heterogeneous aquifer monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Geophysics*, 75(4), WA61-WA73.
- Monteiro Santos, F. A., Afonso, A. R. A., & Dupis, A. (2007). 2D joint inversion of dc and scalar audio-magnetotelluric data in the evaluation of low enthalpy geothermal fields. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(1), 53-62.
- Morel-Seytoux, H. J. (1992). The capillary barrier effect at the interface of two soil layers with some contrast in properties. HYDROWAR Report 92.4, Hydrology Days Publications, 57 Shelby Lane, Atherton, CA 94027-3926.
- MRNF. (2024a). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec. Repéré à [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/ressources-naturelles/mines/Documents/restauration/GM\\_Restauration-sites-miniers.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/ressources-naturelles/mines/Documents/restauration/GM_Restauration-sites-miniers.pdf)

- MRNF. (2024b). Modernisation du régime minier – Adoption du projet de loi modifiant la Loi sur les mines et d'autres dispositions. Repéré à <https://mrnf.gouv.qc.ca/mines/restauration-miniére/>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Lausanne: Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Zagury, G. J., & Bussière, B. (2005). *An evaluation of the elevated water table concept using laboratory columns with sulphidic tailings* présentée à 58th Canadian Geotechnical Conference, Saskatchewan, Canada.
- Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Zagury, G. J. (2009). Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation. *Applied Geochemistry*, 24(7), 1312-1323. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.005>
- Pabst, T. (2021). Elevated Water Table with Monolayer Covers. In: Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage. Bussière, B. and Guittony M. (Eds), Chapter 8, CRC Press, Boca Raton. 187-200.
- Palomo, L., Bard, E., Campaña, J., & Anabalón, M. (2008). *High Waste Rock Dumps — Challenges and Developments*. doi: 10.36487/ACG\_repo/802\_6
- Peregoedova, A. (2012). *Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).
- Perri, M. T., Cassiani, G., Gervasio, I., Deiana, R., & Binley, A. (2012). A saline tracer test monitored via both surface and cross-borehole electrical resistivity tomography: Comparison of time-lapse results. *Journal of Applied Geophysics*, 79, 6-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.011>
- Pham, H. Q., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (2005). A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), 1548-1568. doi: 10.1139/t05-071

- Plante, B., Schudel, G., & Benzaazoua, M. (2021). Generation of Acid Mine Drainage. In: Hard Rock Mine Reclamation: From Prediction to Management of Acid Mine Drainage. *Bussière, B. and Guittonny M. (Eds), Chapter 1, CRC Press, Boca Raton, 1-15.*
- Pleasants, M., Neves, F., Parsekian, A., Befus, K., & Kelleners, T. (2022). Hydrogeophysical Inversion of Time-Lapse ERT Data to Determine Hillslope Subsurface Hydraulic Properties. *Water Resources Research, 58.* doi: 10.1029/2021WR031073
- Power, C., Ramasamy, M., & Mkandawire, M. (2018). Performance assessment of a single-layer moisture store-and-release cover system at a mine waste rock pile in a seasonally humid region (Nova Scotia, Canada). *Environmental Monitoring and Assessment, 190(4)*, 186. doi: 10.1007/s10661-018-6555-0
- Power, G., Gräfe, M., & Klauber, C. (2011). Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy, 108(1)*, 33-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>
- Québec. (2024a). Institut de la statistique du Québec. L'investissement minier au Québec en 2023. Repéré
- Québec. (2024b). L'Association minière du Québec. Contribution de l'industrie minière au PIB du Québec: bond de 57% en huit ans. Repéré
- Radcliffe, D. E., & Simunek, J. (2018). *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*. CRC press.
- Ramasamy, M., Power, C., & Mkandawire, M. (2018). Numerical prediction of the long-term evolution of acid mine drainage at a waste rock pile site remediated with an HDPE-lined cover system. *J Contam Hydrol, 216*, 10-26. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.07.007
- Rarison, R., Mbonimpa, M., Bussière, B., Turcotte, S., & Pouliot, S. (2023). HDPE geomembrane properties in mine reclamation covers after 13 and 20 years. Dans (1 éd.). CRC Press.
- Rein, A., Hoffmann, R., & Dietrich, P. (2004). Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of Hydrology, 285(1)*, 215-232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.015>
- Revil, A., Ahmed, A. S., & Matthai, S. (2018). Transport of water and ions in partially water-saturated porous media. Part 3. Electrical conductivity. *Advances in Water Resources, 121*, 97-111.

- Revil, A., Coperey, A., Mao, D., Abdulsamad, F., Ghorbani, A., Rossi, M., & Gasquet, D. (2018). Induced polarization response of porous media with metallic particles—Part 8: Influence of temperature and salinity. *Geophysics*, *83*(6), E435-E456.
- Revil, A., Karaoulis, M., Johnson, T., & Kemna, A. (2012). Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, *20*(4), 617-658. doi: 10.1007/s10040-011-0819-x
- Revil, A., Kessouri, P., & Torres-Verdín, C. (2014). Electrical conductivity, induced polarization, and permeability of the Fontainebleau sandstone. *Geophysics*, *79*(5), D301-D318.
- Rey, J., Mendoza, R., Martínez, J., Hidalgo, M. C., & Rodríguez, C. F. (2022). Combining geophysical methods (DC, IP, TDEM and GPR) to characterise mining waste in the Linares-La Carolina district (southern Spain). *Journal of Environmental Management*, *322*, 116166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116166>
- Rhoades, J., Manteghi, N., Shouse, P., & Alves, W. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. *Soil science society of America journal*, *53*(2), 433-439.
- Rhoades, J., Raats, P., & Prather, R. (1976). Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil science society of America journal*, *40*(5), 651-655.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *physics*. *1*(5), 318-333.
- Robinson, D., Campbell, C., Hopmans, J., Hornbuckle, B., Jones, S., Knight, R., . . . Wendroth, O. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, *7*(1), 358-389. doi: 10.2136/vzj2007.0143
- Robinson, D., Schaap, M., Or, D., & Jones, S. (2005). On the Effective Measurement Frequency of TDR in Dispersive and Non-Conductive Dielectric Materials. *Water Resources Research*, *41*, 02007. doi: 10.1029/2004WR003816
- Robinson, J., Johnson, T., & Rockhold, M. (2020). Feasibility Assessment of Long-Term Electrical Resistivity Monitoring of a Nitrate Plume. *Groundwater*, *58*(2), 224-237. doi: <https://doi.org/10.1111/gwat.12899>
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, *26*, 2625-2629.

- Roy, A., & Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36(5), 943-959.
- Rücker, C., & Günther, T. (2011). The simulation of finite ERT electrodes using the complete electrode model. *Geophysics*, 76(4), F227-F238.
- Rücker, C., Günther, T., & Wagner, F. (2017). pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, 109, 106-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.011>
- Rucker, D. (2014). Investigating motion blur and temporal aliasing from time-lapse electrical resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.09.010>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., A, B., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 83, 173-193. doi: 10.1016/j.still.2004.10.004
- Scaini, A., Audebert, M., Hissler, C., Fenicia, F., Gourdol, L., Pfister, L., & & Beven, K. J. (2017). Velocity and celerity dynamics at plot scale inferred from artificial tracing experiments and time-lapse ERT. *Journal of Hydrology*, 546, 28-43.
- Schmidt-Hattenberger, C., Bergmann, P., Labitzke, T., Wagner, F., & Rippe, D. (2016). Permanent crosshole electrical resistivity tomography (ERT) as an established method for the long-term CO<sub>2</sub> monitoring at the Ketzin pilot site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 52, 432-448.
- Schwartz, B. F., Schreiber, M. E., & Yan, T. (2008). Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 234-246.
- Singha, K., Day-Lewis, F. D., Johnson, T., & Slater, L. D. (2015). Advances in interpretation of subsurface processes with time-lapse electrical imaging. *Hydrological Processes*, 29(6), 1549-1576. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.10280>
- Singha, K., & Gorelick, S. (2005). Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis. *Water Resources Research*, 41(5).
- Singha, K., Johnson, T. C., Day-Lewis, F., & Slater, L. D. (2022). Electrical imaging for hydrogeology. *Electrical imaging for hydrogeology*, 11.

- Slater, L., & Binley, A. . (2021). Advancing hydrological process understanding from long-term resistivity monitoring systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), e1513.
- Steelman, C. M., Klazinga, D. R., Cahill, A. G., Endres, A. L., & Parker, B. L. (2017). Monitoring the evolution and migration of a methane gas plume in an unconfined sandy aquifer using time-lapse GPR and ERT. *Journal of Contaminant Hydrology*, 205, 12-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.08.011>
- Stummer, P., Maurer, H., & Green, A. G. (2004). Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, 69(1), 120-139.
- Sylvain, K., Pabst, T., & Dimech, A. (2019). Waste rock valorization in monolayer covers with elevated water table. *Proceedings of GeoEnvironmental Engineering*, 101-112.
- Taylor, D. W. (1948). Fundamentals of soil mechanics. *Soil Science* 66, 161.
- Rio Tinto, (2024). *Composition des résidus de bauxite*. Repéré à <https://www.votreriotintoslsj.com/wp-content/uploads/2024/05/composition-residus-bauxite.pdf>
- Topp, G. C., Davis, J., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research* 16 (3), 574– 582.
- Tresoldi, G., Hojat, A., Zanzi, L., & Certo, A. (2020). Introducing G. RE. TA—an innovative geo-resistivimeter for long-term monitoring of earthen dams and unstable slopes. Dans *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering* (pp. 487-498). AUS.
- Tso, C. H. M., Johnson, T., Song, X., Chen, X., Kuras, O., Wilkinson, P., . . . Binley, A. (2020). Integrated hydrogeophysical modelling and data assimilation for geoelectrical leak detection. *Journal of Contaminant Hydrology*, 234, 103679. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103679>
- Tso, C. H. M., Kuras, O., & Binley, A. (2019). On the field estimation of moisture content using electrical geophysics: The impact of petrophysical model uncertainty. *Water Resources Research*, 55(8), 7196-7211.
- Uhlemann, S., Chambers, J., Wilkinson, P., Maurer, H., Merritt, A., Meldrum, P., . . . Dijkstra, T. (2017). Four-dimensional imaging of moisture dynamics during landslide reactivation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(1), 398-418.

- Uhlemann, S., Sorensen, J., House, A., Wilkinson, P., Roberts, C., Gooddy, D., . . . Chambers, J. (2016). Integrated time-lapse geoelectrical imaging of wetland hydrological processes. *Water Resources Research*, 52(3), 1607-1625.
- Uhlemann, S., Wilkinson, P., Maurer, H., Wagner, F., Johnson, T., & Chambers, J. (2018). Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement. *Geophysical Journal International*, 214(1), 108-121.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vanella, D., Ramírez-Cuesta, J. M., Sacco, A., Longo-Minnolo, G., Cirelli, G. L., & Consoli, S. (2021). Electrical resistivity imaging for monitoring soil water motion patterns under different drip irrigation scenarios. *Irrigation Science*, 39(1), 145-157. doi: 10.1007/s00271-020-00699-8
- Wagner, F., Bergmann, P., Rücker, C., Wiese, B., Labitzke, T., Schmidt-Hattenberger, C., & Maurer, H. (2015). Impact and mitigation of borehole related effects in permanent crosshole resistivity imaging: An example from the Ketzin CO2 storage site. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 102-111.
- Wagner, F., & Uhlemann, S. (2021). An overview of multimethod imaging approaches in environmental geophysics. Dans (Vol. 62, pp. 1-72). doi: 10.1016/bs.agph.2021.06.001
- Waxman, M. H., & Smits, L. (1968). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), 107-122.
- Weeks, B., & Wilson, G. W. (2005). Variations in moisture content for a soil cover over a 10 year period. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), 1615-1630.
- Wenninger, J., Uhlenbrook, S., Lorentz, S., & Leibundgut, C. (2008). Identification of runoff generation processes using combined hydrometric, tracer and geophysical methods in a headwater catchment in South Africa/Identification des processus de formation du débit en combinat la méthodes hydrométrique, traceur et géophysiques dans un bassin versant sud-africain. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 65-80.
- Woessner, W., & Poeter, E. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow*.
- Woyshner, M. R., & Yanful, E. K. (1995). Modelling and field measurements of water percolation through an experimental soil cover on mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 601-609.

- Yoshikawa, K., & Overduin, P. P. (2005). Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors. *Cold Regions Science and Technology*, 42(3), 250-256. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2005.03.001>
- Zegelin, S. J., White I., & Russell, G. F. (1992). A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. *Soil Sciences Society of America*, 30, 197-207.
- Zienkiewicz, O. (1989). Basic formulation and linear problems. *The finite element method*, 1.