

Titre:	Étude du comportement hydrogéologique d'une couche de contrôle des écoulements placée à la surface d'une halde à stériles expérimentale
Auteur:	Julien Dubuc
Author:	
Date:	2018
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Dubuc, J. (2018). Étude du comportement hydrogéologique d'une couche de contrôle des écoulements placée à la surface d'une halde à stériles expérimentale [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/3187/
Citation:	

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3187/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Thomas Pabst, & Michel Aubertin
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DU COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UNE COUCHE DE CONTRÔLE
DES ÉCOULEMENTS PLACÉE À LA SURFACE D'UNE HALDE À STÉRILES
EXPÉRIMENTALE

JULIEN DUBUC

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)

JUIN 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DU COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UNE COUCHE DE CONTRÔLE
DES ÉCOULEMENTS PLACÉE À LA SURFACE D'UNE HALDE À STÉRILES
EXPÉRIMENTALE

présenté par : DUBUC Julien

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

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

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph. D., président

M. PABST Thomas, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. AUBERTIN Michel, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. ROSA Éric, Ph. D., membre

DÉDICACE

Pour toi qui arrive... ce n'est que le commencement...

REMERCIEMENTS

Je veux tout d'abord remercier Thomas Pabst, mon directeur de recherche pour sa disponibilité, son implication, sa confiance et sa passion. Je remercie aussi Michel Aubertin, mon codirecteur de recherche, de m'avoir fait confiance malgré mon parcours atypique. Je tiens aussi à le remercier de m'avoir guidé à travers la géotechnique et l'environnement minier. Je tiens aussi à remercier Vincent Martin pour son apport majeur dans ce projet, sa patience, son écoute et son amitié. Un grand merci à Marie-Lin, Adrien, P.-A., Bissé et Babacar qui m'ont rendu de fiers services durant les travaux de terrain. Merci à Noura, Richard et tous les stagiaires pour l'aide et les conseils au laboratoire.

Un immense merci à tous mes amis du bureau (Gabrielle, Xavier, L.-P., Roseline, Karim) et de l'IRME à la Poly comme à l'UQAT qui mon fait découvrir leur monde et pour les discussions géniales que j'ai eues avec vous. Les dîners avec vous vont rester des moments inoubliables.

Je tiens à remercier tout particulièrement Evelyne (Mme Dubuc) ma conjointe des 18 dernières années pour son support et ses encouragements pendant tout le processus que fut mon retour aux études. Sans son soutien, ces lignes n'auraient jamais été écrites. Je veux aussi remercier mes parents et mon frère qui m'ont manifesté un support immense pendant cette épopée. Finalement, je veux remercier tous les gens qui ont cru en mon potentiel et qui m'ont encouragé à le développer.

RÉSUMÉ

L'exploitation minière génère d'importants volumes de roches stériles qui sont généralement entreposés en surface dans des haldes. La présence de minéraux réactifs dans ces stériles peut entraîner, lorsqu'ils sont exposés aux conditions atmosphériques (oxygène et eau), la génération de drainage minier acide (DMA) ou de drainage neutre contaminé (DNC).

Le présent projet s'inscrit dans une plus vaste étude visant à évaluer une nouvelle méthode de déposition des roches stériles et dont l'objectif est de limiter la contamination des eaux de drainage qui peuvent percoler dans les haldes, pendant les opérations d'extraction et après la fermeture du site. Le principe de la technique consiste à dévier latéralement l'eau des précipitations le long de couches inclinées formées de matériaux relativement fins et compactés (appelées ici couches de contrôle des écoulements ou CCE) afin de prévenir les écoulements dans les roches stériles réactives. Ces couches peuvent être placées en séquence à la surface des stériles pendant la construction par bancs de la halde. Une halde à stériles expérimentale instrumentée de 70 m de long, de 10 m de large (au sommet) et de 7 m de haut a été construite sur le site de la mine du Lac Tio (43 km au nord de la ville de Havre-Saint-Pierre, Québec, Canada) (Rio Tinto Fer Titane) dans le but d'évaluer la performance de cette nouvelle méthode de construction à grande échelle et dans des conditions réelles de terrain. Cette halde expérimentale comporte une CCE formée d'une couche de sable compactée, recouverte de roches stériles concassée.

L'objectif principal de ce projet de maîtrise était de caractériser le comportement hydrogéologique de la couche de contrôle des écoulements (CCE) installée sur la halde à stériles expérimentale instrumentée au moyen d'essais d'infiltration à grande échelle et de simulations numériques.

Cinq essais d'infiltration à grande échelle (volumes d'eau compris entre 6,4 m³ et 28,0 m³ et durées comprises entre 1 et 6 heures) ont été réalisés sur la halde expérimentale. L'infiltration et l'écoulement de l'eau a été suivi à l'aide de 42 sondes de teneur en eau installées dans la CCE, le haut des stériles et à l'intérieur des lysimètres au bas de la halde. Les débits de sortie ont également été mesurés manuellement plusieurs fois par jour à la suite des essais d'infiltration à grande échelle. Les teneurs en eau ont aussi été mesurées en continu pendant deux ans afin

d'aider à évaluer le comportement hydrogéologique de la halde expérimentale en fonction des précipitations sur le site.

Les résultats des essais d'infiltration à grande échelle ont permis de valider (en partie) et calibrer des modèles numériques réalisés avec le code SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016). Les simulations numériques reproduisent généralement bien les comportements observés sur le terrain. Une analyse paramétrique a permis d'identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur les écoulements dans la halde et d'évaluer notamment l'effet de la pente et de l'épaisseur de la CCE, des propriétés des stériles et de la densité du sable de la CCE.

Les résultats expérimentaux et numériques ont montré que la CCE installée sur la halde expérimentale était en mesure de dévier latéralement une partie de l'eau infiltrée vers le pied de la halde. Cette déviation est toutefois limitée et l'efficacité de la CCE semble diminuer avec la durée et l'intensité des précipitations. Les résultats ont aussi montré que la déviation latérale de l'eau semblait principalement influencée par le contraste entre les propriétés hydrogéologiques des stériles et des matériaux de la CCE, ainsi que par l'angle de la pente. La densité (ou le degré de compaction) de la CCE et son épaisseur ont également une influence, moins marquée, sur le comportement hydrogéologique de la halde expérimentale.

ABSTRACT

The mining industry produces large quantities of waste rocks which are usually disposed of on the surface in piles. Reactive minerals in waste rocks can lead to the generation of acid mining drainage (AMD) or contaminated neutral drainage (CND) when exposed to atmospheric conditions (oxygen and water).

This project is part of a broader research study which aims to evaluate the performance of a new waste rock deposition method. The main objective of this method is to limit contamination of seepage water, during and after the extraction operations. The principle is to divert rainwater along inclined and compacted finer grained material layers (called flow control layers or FCL) to prevent it from reaching underlying reactive waste rocks. Those layers can be placed in sequence at the surface of the pile during its bench construction. A 70 m long, 10 m large (at the top) and 7 m high instrumented experimental waste rock pile was built at the Lac Tio mine site (43 km north of Havre-Saint-Pierre town, Québec, Canada) (Rio Tinto Iron and Titanium) to assess the performance of this new deposition method at a large scale and under field conditions. This experimental pile includes a FCL made of a compacted sand layer covered by crushed waste rock.

The main objective of this master project was to characterize the hydrogeological behaviour of the flow control layer (FCL) installed on top of the experimental waste rock pile using large scale infiltration tests and numerical simulations.

Five large scale infiltration tests (between 6,4 m³ and 28,0 m³ of water were applied over 1 to 6 hours) were carried out on the experimental waste rock pile. Water infiltration and flow was monitored using 42 volumetric water content sensors installed in the FCL, in the upper part of the waste rock and in the lysimeters constructed at the base of the pile. Outflow rates were also measured manually several times per day during and after the infiltration tests. Volumetric water content was also monitored continuously for two years to help assess the hydrogeological response of the experimental waste rock pile exposed to natural weather conditions and precipitations.

Results from the large scale infiltration tests were used to calibrate and validate (in part) numerical models carried out with SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016). Simulations

reproduced generally well field observations. A parametric analysis was conducted to identify key parameters that control water movement in the experimental waste rock pile. The influence of the slope and thickness of the FCL, porosity (density) of the layers, and of waste rock properties was also evaluated using numerical simulations.

Experimental and numerical results indicated that the FCL installed on the experimental waste rock pile was able to divert laterally some of the infiltrated water toward the foot of the pile. However, this diversion is limited and the FCL efficiency seemed to decrease as the precipitation intensity was getting higher. Results also indicate that water diversion is mainly influenced by the contrast between waste rock and FCL hydrogeological properties and by the slope angle of the FCL. The compaction and the thickness of the FCL also showed, to a lesser extent, some influence on the waste rock pile hydrogeological behavior.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XVIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXXV
LISTE DES ANNEXES.....	XL
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs du projet de recherche.....	2
1.2 Contenu du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE ET SITE À L'ÉTUDE	4
2.1 Haldes à stériles.....	4
2.1.1 Propriétés physiques des roches stériles.....	4
2.1.2 Description générale des haldes à stériles	5
2.1.3 Structure interne et comportement hydrique des haldes à stériles	6
2.2 Écoulement de l'eau dans les milieux poreux.....	8
2.2.1 Écoulement saturé	8
2.2.2 Écoulement non saturé	11
2.2.3 Courbe de rétention d'eau	11
2.2.4 Conductivité hydraulique non-saturée	16
2.2.5 Infiltration de l'eau dans un milieu poreux	18

2.3	Drainage contaminé.....	23
2.4	Restauration des haldes à stériles et recouvrements.....	25
2.4.1	Couverture avec effet de barrière capillaire	26
2.5	Halde inclinée avec couche de contrôle des écoulements	30
2.5.1	Halde expérimentale de la mine du Lac Tio	31
2.5.2	Validation numérique	36
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....		40
3.1	Caractérisation complémentaire de la roche stérile concassée.....	40
3.1.1	Granulométrie.....	40
3.1.2	Courbe de rétention d'eau	41
3.2	Instrumentation de la halde expérimentale.....	41
3.3	Essais de terrain.....	46
3.3.1	Essais d'infiltration à moyenne échelle.....	47
3.3.2	Essais d'infiltration à grande échelle	49
3.3.3	Précipitations	54
3.4	Analyses numériques.....	55
3.4.1	Géométrie et conditions frontières du modèle de base	56
3.4.2	Simulation des essais d'infiltration et des événements de précipitation	57
CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		59
4.1	Caractérisation complémentaire de la roche stérile concassée.....	59
4.2	Essais d'infiltration à petite échelle	61
4.3	Essais d'infiltration à grande échelle	64
4.3.1	Essai I-C	65
4.3.2	Essai I-E	84

4.3.3	Représentativité des moyennes de TEV	96
4.3.4	Résultats des essais d'infiltration à grande échelle I-A, I-B et I-D	98
4.4	Teneurs en eau volumique naturelle dans la halde expérimentale	102
4.4.1	Analyse des événements de précipitation intenses.....	104
CHAPITRE 5 SIMULATIONS NUMÉRIQUES DU COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE		108
5.1	Validation du modèle numérique	108
5.1.1	Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C avec les propriétés mesurées (avant calibration).....	108
5.1.2	Ajustements entre les propriétés mesurées et calibrées	112
5.1.3	Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C avec les propriétés calibrées.....	117
5.1.4	Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D	133
5.1.5	Simulation des précipitations	135
5.2	Effet de la porosité des matériaux de la couche de contrôle des écoulements.....	138
5.3	Effet des propriétés hydrogéologiques des roches stériles.....	144
5.4	Effets de l'angle de la pente de la CCE.....	153
5.5	Effets de l'épaisseur de la CCE.....	155
5.6	Effets du matériau de la couche de contrôle des écoulements	159
5.7	Effets des précipitations	161
5.7.1	Précipitations usuelles	161
5.7.2	Précipitations extrêmes	163
5.7.3	Intensité des précipitations	165
CHAPITRE 6 SYNTHÈSE, DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		168
6.1	Synthèse	168

6.2	Discussion	171
6.3	Conclusion.....	173
6.4	Recommandations	174
	BIBLIOGRAPHIE	176
	ANNEXES	188

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques hydrogéologiques des matériaux de la halde expérimentale (basées sur Peregoedova 2012; Bréard Lanoix 2017 et cette étude). θ_s : TEV saturée, θ_r : TEV résiduelle, AEV : Pression d'entrée d'air, ψ_r : Suction résiduelle.....	34
Tableau 3.1 Caractéristiques des essais d'infiltration réalisés à la surface de la halde expérimentale, dans la couche de roches stériles concassées.....	47
Tableau 3.2 Caractéristiques des essais d'infiltration à grande échelle.....	53
Tableau 3.3 Caractéristiques des événements de précipitation retenus pour l'analyse du comportement de la CCE de la halde à stérile expérimentale.....	55
Tableau 4.1 Caractéristiques granulométrique de l'échantillon de roche stérile concassée (cette étude) et tamisée (Lévesque, 2015). (C_U : coefficient d'uniformité, C_C : coefficient de courbure et D_x : diamètre correspondant à x% passant).....	60
Tableau 4.2 Paramètres de lissage obtenus à partir des valeurs mesurées pour l'équation de van Genuchten, (1980).....	61
Tableau 4.3 Caractéristiques et résultats des essais d'infiltration au perméamètre de Guelph	63
Tableau 4.4 Caractéristiques des essais d'infiltration à grande échelle et volumes d'eau appliqués pour chaque essai.	65
Tableau 4.5 Résumé de l'influence des essais d'infiltration sur les sondes de teneur en eau dans la couche de sable de la CCE.	102
Tableau 4.6 Réponse hydrogéologique de la CCE à des événements de pluie.	107
Tableau 5.1 Caractéristiques de la roche stérile concassée mesurées en laboratoire et calibrées suite aux ajustements découlant des simulations. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée.	116
Tableau 5.2 Propriétés des caractéristiques du sable de la CCE mesurées en laboratoire et calibrées. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée (Bréard Lanoix, 2017).	116

Tableau 5.3 Caractéristiques des stériles mesurées en laboratoire et calibrées. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée (Peregoedova, 2012).....	116
Tableau 5.4 Propriétés des stériles des mines Lac Tio (cette étude), Bolduc (Bolduc, 2012) et Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) utilisés pour l'analyse numérique.....	147
Tableau 5.5 Caractéristiques des événements de précipitations usuels simulés.	162
Tableau 5.6 Précipitations maximales simulées (Hatch, 2015).	164
Tableau 5.7 Analyse limite des précipitations maximales dans les simulations de la halde expérimentale.	164
Tableau 5.8 Intensités des précipitations simulées. Les précipitations ont été calculées en répartissant le volume d'eau appliquée lors de l'essai d'infiltration I-C sur des périodes allant de 2 à 10 jours.	165
Tableau A.1 Équation de calibration pour les TEV données par les GS3 dans les différents matériaux de la halde expérimentale.	190
Tableau B.1 Calibration du cône de sable.....	191
Tableau B.2 Mesures au cône de sable dans le sable de la CCE.....	191
Tableau D.1 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-A.....	193
Tableau D.2 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-B.....	193
Tableau D.3 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-C.....	193

Tableau D.4 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-D.....	194
Tableau D.5 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-E	194
Tableau F.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-07 - soir	196
Tableau F.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 - matin	196
Tableau F.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 – 17 :10	197
Tableau F.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 – 21 :45	197
Tableau F.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-09 – matin	198
Tableau F.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-09 – après-midi	198
Tableau F.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-12 – matin	199
Tableau F.8 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-12 – après-midi	199
Tableau F.9 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-13 – matin	200
Tableau F.10 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-13 – après-midi	200
Tableau F.11 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-14	201
Tableau G.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-15 – 9 :00.....	202
Tableau G.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-15 – 14 :00.....	202
Tableau G.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-16 – 9 :00.....	203
Tableau G.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-16 – 16 :00.....	203
Tableau G.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-19 – 9 :00.....	204
Tableau G.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-19 – 14 :00.....	204
Tableau G.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-20 – 9 :00.....	205

Tableau H.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-19 – 16 :00.....	206
Tableau H.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-20 – 9 :00.....	206
Tableau H.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-20 – 13 :00.....	207
Tableau H.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-21 – 9 :00.....	207
Tableau H.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-21 – 13 :00.....	208
Tableau H.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 9 :00.....	208
Tableau H.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 13 :00.....	209
Tableau H.8 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 17 :00.....	209
Tableau H.9 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 21 :00.....	210
Tableau H.10 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-25 – 9 :00.....	210
Tableau H.11 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-25 – 13 :00.....	211
Tableau H.12 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-26 – 9 :00.....	211
Tableau H.13 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-26 – 12 :00.....	212
Tableau J.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A.....	215
Tableau J.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-A	215
Tableau J.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-A	216
Tableau K.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B	220
Tableau K.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-B	221
Tableau K.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-B.....	221

Tableau L.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D.....	225
Tableau L.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-D.....	226
Tableau L.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-D	226

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Structure interne typique dans une halde à stériles construite avec la méthode de déversement à la benne (mine Goldstrike, Barrick Gold Corporation). F (<i>fine</i>) : couche de granulométrie fine; C (<i>coarse</i>) : couche de granulométrie plus grossière. Un bloc d'environ 1 m de diamètre est observé dans la couche de matériaux grossiers (cercle blanc) (tiré de Martin et al., 2006).....	7
Figure 2.2 Courbe de rétention d'eau typique d'un silt (adapté de Fredlund et Xing, 1994).....	12
Figure 2.3 CRE typique des roches stériles. Les points sont des mesures expérimentales réalisées lors d'un essai de drainage en colonne; les courbes noire, bleue, rouge et verte correspondent aux prédictions avec le modèle MKs pour diverses granulométries obtenues sur l'éprouvette avant et après l'essai (tiré de Peregoedova et al., 2014).	16
Figure 2.4 Relation entre la teneur en eau volumique et la conductivité hydraulique (tiré de Musy et Soutter, 1991).....	17
Figure 2.5 Taux d'infiltration en fonction du temps (Horton, 1933; Koorevaar et al., 1983 tiré de Gitirana, 2005). Dans cette figure, $ksatw$ représente la capacité d'infiltration du sol (quasi saturé).....	19
Figure 2.6 Schéma descriptif du perméamètre de Guelph (adapté de Musy et Soutter, 1991).....	20
Figure 2.7 Schéma d'un essai d'infiltration de type simple anneau à charge constante (adapté de Dingman, 1994).....	21
Figure 2.8 Montage des essais d'infiltration <i>in situ</i> de Lessard (2011).....	22
Figure 2.9 Représentation de l'effet de barrière capillaire par les CRE et les fonctions de perméabilité d'un silt et d'un sable (tiré de Aubertin et al. 2002a).....	27
Figure 2.10 Point DDL (<i>Down Dip Limit</i>) dans une couverture à effet de barrière capillaire (CEBC). Les flèches indiquent le mouvement de l'eau. L_D : Longueur effective du bris capillaire (adapté de Bussière, 1999).	29
Figure 2.11 Simulation de l'écoulement dans une halde avec des couches de matériau fin (en foncé à gauche) inclinées entre les bancs de roches stériles plus grossières; les résultats de droite montrent la TEV simulée dans la halde (tiré de Fala et al., 2003).....	29

Figure 2.12 Concept de halde inclinée avec couches de contrôle des écoulements (adapté de Aubertin, 2013)	31
Figure 2.13 Coupe transversale dans l'axe principal de la halde expérimentale construite à la mine du Lac Tio.	32
Figure 2.14 Coupe en section de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio.....	32
Figure 2.15 Halde expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio (crédit: IRME); on y voit la rampe d'accès en arrière-plan, les bermes de protection de chaque côté (à la surface) et le conteneur (beige) qui contient divers équipements (à l'extrémité de la halde).....	33
Figure 2.16 Courbes de rétention d'eau des matériaux de la halde expérimentale, tracées avec la fonction de van Genuchten (voir équations 2,6 et 2,7 (Adapté de Peregoedova, 2012; Lévesque, 2015; Bréard Lanoix, 2017et cette étude).....	35
Figure 2.17 Fonctions de conductivité hydraulique des matériaux de la halde expérimentale, tracées à partir de la fonction de Mualem-van Genuchten (voir équation 2,16) (Adapté de Peregoedova, 2012; Bréard Lanoix, 2017; Lévesque, 2015 et cette étude).....	36
Figure 2.18 Résultats d'une simulation numérique des écoulements avec le logiciel HYDRUS, qui tient compte de la structure interne d'une halde à stériles; les résultats sont présentés en termes de la TEV.....	37
Figure 2.19 Résultat d'une simulation numérique (menée avec SEEP/W) qui illustre l'effet d'une couverture de type SDR, en termes de TEV, après la simulation d'un événement de précipitation d'une durée de 72 heures (Martin et al. 2005).....	39
Figure 3.1 Vue en coupe de la halde expérimentale avec la position des sondes GS3 et MPS-2 pour chacun des six lysimètres (pas à l'échelle).	42
Figure 3.2 Identification des sondes GS3 installées sur la halde expérimentale de la mine du Lac Tio. AC : Roches stériles concassées, SW : sable, WR : stériles, -H : haut de la couche et -b : bas de la couche.....	43
Figure 3.3 Calibration de terrain des sondes GS3 dans le sable de la CCE	44
Figure 3.4 Valeurs de TEV mesurées et calibrées dans le haut (SW-H) et le bas (SW-b) de la couche de sable de la CCE entre novembre 2015 et juillet 2017.....	45

Figure 3.5 Essai d'infiltration avec la méthode du simple anneau ($r=0,3$ m).....	48
Figure 3.6 Camion-citerne utilisé pour les tests d'infiltration à grande échelle (crédit: Macallister Machinery) et photo du camion effectuant un passage d'un essai d'infiltration à grande échelle (crédit : IRME).....	50
Figure 3.7 Taux d'infiltration maximum au sommet de la halde. Le début de la courbe en vert représente le temps d'atteinte de l'équilibre et la partie en bleu le taux d'infiltration limite. Cette figure est tirée des temps de passage durant l'essai I-B.	51
Figure 3.8 Configurations utilisées pour les essais d'infiltration à grande échelle A) une rangée B) deux rangées. Les points bleus indiquent l'emplacement des chaudières disposées le long des corridors d'arrosage.	52
Figure 3.9 Photo de l'installation de la toile plastique de faible perméabilité sur la CCE du 16 juin 2017 au 15 septembre 2017.....	54
Figure 3.10 Modèle numérique de la halde expérimentale. Le plan rapproché montre la taille et la forme du maillage dans l'ensemble des matériaux.	57
Figure 3.11 Progression du front d'évaporation dans la couche de roches stériles concassées après une période de 8 jours plutôt sèche (< 2 mm de précipitation totale).	58
Figure 4.1 Courbes granulométriques de la roche stérile d'anorthosite concassée (cette étude) et de la roche stérile d'anorthosite tamisée (Lévesque, 2015).....	59
Figure 4.2 Courbes de rétention d'eau de la roche stérile concassée, mesurée (points = essai en colonne) lissée avec van Genuchten (1980) et estimée avec le modèle MKs (Peregoedova et al. 2014) et comparée à la CRE de l'anorthosite tamisée (Lévesque, 2015).....	61
Figure 4.3 Taux d'infiltration mesuré durant l'essai 4 au perméamètre de Guelph (ligne bleue) avec la charge hydraulique appliquée (ligne verte). Essai réalisé à la surface de la roche stérile concassée, au-dessus du Lysimètre 4 (19 septembre 2017).	62
Figure 4.4 Taux d'infiltration mesuré durant l'essai d'infiltration 3 avec l'infiltromètre à simple anneau en fonction de la charge appliquée.....	64
Figure 4.5 Précipitations sur le site de la mine Lac Tio entre le 26 mai 2017 et le 13 juin 2017. L'essai d'infiltration à grande échelle I-C a débuté le 7 juin 2017.....	66

Figure 4.6 Volumes d'eau totaux mesurés dans les chaudières placées à la surface de la halde expérimentale à la fin de l'essai d'infiltration I-C	67
Figure 4.7 Variations des TEV mesurées (valeurs non-calibrées) dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable) près de la surface de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Note : La sonde AC Lys 3 n'a enregistré aucune valeur pendant l'essai.	69
Figure 4.8 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable mesurées au-dessus des lysimètres 3, 4 et 5 (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Note : Les sondes SW-H Lys 1, SW-H Lys 2 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.	71
Figure 4.9 Variations de la TEV au-dessus des 6 lysimètres dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des roches stériles) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin au 13 juin 2017).	72
Figure 4.10 Variations des TEV mesurées dans le haut et le bas de la couche de sable au-dessus des lysimètres 3 et 4 pendant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les plages de temps d'arrivée du front de mouillage (augmentation rapide de la TEV) sont également indiquées pour le haut et le bas de la couche de sable. SW-H : haut de la couche de sable ($z = 0,5$ m) et SW-b : bas de la couche de sable ($z = 0,8$ m).	73
Figure 4.11 Variations de TEV dans le haut des roches stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous la CCE) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).....	75
Figure 4.12 Variations des TEV mesurées dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la CCE) à partir du début de l'essai d'infiltration I-C et durant les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Note : Les sondes WR-b Lys 1 et WR-b Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).	76

Figure 4.13 Variations des TEV mesurées dans le haut des stériles (à des profondeurs de 1,1 m et 1,3 m sous la surface de la halde soit 10 cm et 30 cm sous la CCE) au-dessus des lysimètres 2 et 3 pour les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les plages de temps d'arrivée du front de mouillage (augmentation rapide de la TEV) sont également indiquées pour WR-H et WR-b. WR-H : haut des stériles ($z = 1,1$ m) et WR-b : niveau inférieur des sondes dans le haut des stériles ($z = 1,3$ m). 77

Figure 4.14 Variations de TEV dans le sable des lysimètres à la suite de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et durant les 7 jours suivants. Les TEV dans les lysimètres n'ont pas pu être calibrées et les valeurs mesurées doivent être considérées avec précaution. Note : Les sondes Lys 2-a, Lys 2-b, Lys 3-a et Lys 5-a n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai. 78

Figure 4.15 Variations des pressions à 10 cm au-dessus et 10 cm en-dessous de l'interface sable/stériles au-dessus du lysimètre 4 (1,1 m et 0,9 m sous la surface de la halde). 79

Figure 4.16 Débits cumulés mesurés avec les débitmètres et manuellement sur une période de 6 jours suivant l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Les résultats sont présentés pour chaque lysimètre de la halde expérimentale..... 81

Figure 4.17 Débits ponctuels mesurés manuellement à la sortie des lysimètres durant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. 82

Figure 4.18 Taux de récupération total du volume infiltré lors de l'essai d'infiltration I-C sur une période de 7 jours (8 au 14 juin 2017). 83

Figure 4.19 Taux de récupération, par lysimètre, des débits cumulés dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-C (8 au 14 juin 2017). Les histogrammes lignés représentent les jours pour lesquels les débits de sortie ont été estimés. 84

Figure 4.20 Volumes d'eau totaux mesurés dans les chaudières placées à la surface de la halde expérimentale pendant l'essai d'infiltration I-E (19 septembre 2017)..... 85

Figure 4.21 Variations de TEV dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable CCE) au sommet de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E. Les mesures de TEV dans la roche stérile concassée n'ont pas pu être calibrées et que les valeurs mesurées

doivent donc être considérées avec précaution. La sonde AC Lys 5 n'a enregistré aucune valeur pendant l'essai.	87
Figure 4.22 Variations de TEV dans le haut de la couche de sable de la CCE (0,5 m sous la surface de la halde; 20 cm sous la surface de la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E. Note : Les sondes SW-H Lys 1, SW-H Lys 2 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.	88
Figure 4.23 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E.	89
Figure 4.24 Variations de TEV mesurées dans le haut et le bas de la couche de sable au-dessus des lysimètres 4 et 5 pendant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-E. Les temps d'arrivée moyens du front de mouillage sont indiqués pour le haut et le bas de la couche de sable.	90
Figure 4.25 Débits mesurés manuellement à la sortie des lysimètres à la suite de l'essai d'infiltration I-E et dans les 6 jours suivant. Les courbes pointillées représentent une approximation des valeurs durant la fin de semaine du 23 et 24 septembre 2017.	93
Figure 4.26 Taux de récupération du volume infiltré lors de l'essai I-E sur une période de 7 jours (20 juin 2017 au 26 juin 2017).	94
Figure 4.27 Taux de récupération, par lysimètre, des débits cumulés dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-E (19 septembre 2017 au 26 septembre 2017). Les histogrammes lignés représentent les jours pour lesquels les débits de sortie ont été interpolés.	95
Figure 4.28 Résultats de TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface de la halde, 20 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les courbes sont comparées à la moyenne des résultats \pm la marge d'erreur de la sonde ($\pm 0,03$). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.	97
Figure 4.29 Résultats de TEV dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les courbes sont comparées à la moyenne des résultats \pm la marge d'erreur de la sonde (0,03). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.	98

Figure 4.30 Valeurs de TEV moyennes mesurées dans le haut de la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, soient respectivement 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-A	99
Figure 4.31 Valeurs de TEV moyennes dans le haut et le bas de la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-B.....	100
Figure 4.32 Valeurs de TEV moyennes de TEV dans la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-D.	101
Figure 4.33 Variations de TEV dans le sable de la CCE et précipitations enregistrées sur le site de la mine du Lac Tio entre novembre 2015 et juillet 2017.	103
Figure 4.34 Variations de TEV dans le haut des stériles et précipitations enregistrées sur le site entre novembre 2015 et juillet 2017. On rappelle ici que les mesures de TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et que les valeurs mesurées doivent donc être considérées avec précaution.....	104
Figure 4.35 Variations de TEV suite à l'événement P1 (du 6 juin 2016 et le 14 juin 2016) dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE.	105
Figure 4.36 Variations de TEV suite à l'événement P2 (du 7 août 2016 au 9 août 2016) dans la couche de sable de la CCE sur une période de 11,5 jours.....	107
Figure 5.1 Profils de succions dans la halde au-dessus du lysimètre 1 (x=10 m) 140 heures après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les propriétés mesurées au laboratoire et sur le terrain.	110
Figure 5.2 Variations moyennes de TEV dans la couche de roches stériles concassées (0,2 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées.....	110
Figure 5.3 Variations moyennes de TEV dans la couche de sable (0,4 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées.....	111

Figure 5.4. Variations moyennes de TEV dans le haut des stériles (0,95 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées. La valeur initiale des mesures de terrain (en pointillés) a été ramenée à la celle du modèle numérique. Ces valeurs non-corrigées sont présentées dans la section 4.3.1.	111
Figure 5.5 CRE mesurées au laboratoire et calibrées suite aux simulations numériques. Les valeurs mesurées ont été adaptés de : Anorthosite concassée (Lévesque, 2015 et cette étude), Sable CCE (Bréard Lanoix, 2017) et Stériles (Peregoedova, 2012).	115
Figure 5.6 Fonctions de perméabilités estimées à partir des essais au laboratoire et <i>in situ</i> , et calibrées dans les simulations numériques. Adapté de : Anorthosite concassée (Lévesque, 2015 et cette étude), Sable CCE (Bréard Lanoix, 2017) et Stériles (Peregoedova, 2012)...	115
Figure 5.7 Profil de TEV simulées dans le haut de la halde (à $x = 30$ m; courbes) et valeurs moyennes mesurées sur le terrain (points) au début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et après 15h.	118
Figure 5.8 Profils de succion simulés dans la halde expérimentale ($x = 10$ m) au début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et après 6, 8, 48 et 168 heures.	120
Figure 5.9 Résultats, en isocontours de TEV, de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C 2 jours après le début de l'essai.....	121
Figure 5.10 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation de terrain 2 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : roches stériles concassées.	122
Figure 5.11 Isocontours de TEV au centre de la halde ($x =$ de 20 m à 30 m]) 6, 10, 24, 96, 168 et 336 heures après le début de l'essai d'infiltration I-C ($t = 0$).	123
Figure 5.12 TEV simulées dans le haut de la couche de sable (40 cm sous la surface) de la CCE lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Toutes les courbes sont superposées dans la figure.	124
Figure 5.13 Variations de teneurs en eau volumiques simulées et mesurées dans le haut de la couche de sable de la CCE (0,5 m sous la surface de la halde, 15 cm sous l'interface	

sable/roches stériles concassées) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone ombragée (en bleu) représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.....	125
Figure 5.14 TEV simulées et mesurées dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 50 cm sous la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux mesures des sondes de TEV GS3.....	126
Figure 5.15 TEV simulées et mesurées (avant correction) dans la couche de roches stériles concassées de la CCE (0,25 m sous la surface de la halde, 5 cm au-dessus de la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.....	127
Figure 5.16 TEV simulées et mesurées (après correction) dans la couche de roches stériles concassées de la CCE (0,25 m sous la surface de la halde, 5 cm au-dessus de la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.....	128
Figure 5.17 TEV simulées et mesurées dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).....	129
Figure 5.18 TEV simulées et mesurées (après corrections) dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).....	130
Figure 5.19 TEV simulées et mesurées (après corrections) dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).....	131
Figure 5.20 Débits cumulés mesurés et simulés par lysimètre pendant une période de 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C.....	132
Figure 5.21 Taux de récupération cumulé du volume infiltré mesuré <i>in situ</i> et simulé sur une période de 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C.....	133

Figure 5.22 Variations de TEV simulées et mesurées sur le terrain dans le haut et le bas de la couche de sable à la suite de l'essai d'infiltration I-D	135
Figure 5.23 Comparaisons entre les variations de TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface de la halde, 20 cm sous la surface du sable) enregistrées sur le terrain et celles de la simulation pour la période du 6 juin au 9 septembre 2016. La zone en gris représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3	136
Figure 5.24 Comparaisons entre les variations de TEV dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) enregistrées sur le terrain et celles de la simulation pour la période du 6 juin au 9 septembre 2016. La zone en gris représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3	137
Figure 5.25 Courbes de rétention d'eau du sable et de la roche stérile concassée, estimées pour les différentes porosités simulées.	140
Figure 5.26 Fonctions de perméabilité du sable et de la roche stérile concassée, estimées pour les différentes porosités simulées.	140
Figure 5.27 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec la CCE plus compacté ($n = 0,2$) deux jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.	141
Figure 5.28 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec la CCE plus compacté ($n = 0,4$) deux jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.	142
Figure 5.29 Valeurs simulées du taux de récupération de l'eau infiltrée 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction de la porosité des matériaux de la CCE.....	143
Figure 5.30 Valeurs simulées du taux de récupération des débits de sortie cumulés des lysimètres 5 et 6 (combinés) par rapport au volume total infiltré en fonction de la porosité de la CCE pour des durées de 10, 20 et 30 jours.	143

Figure 5.31 Répartition des débits cumulés 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C par lysimètre pour différentes porosités des matériaux de la CCE	144
Figure 5.32 Courbes de rétention d'eau des stériles simulés. Stériles Lac Tio : ilménite (ce projet); Stériles Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) et stériles Bolduc (Bolduc, 2012). Sable: sable de la CCE (ce projet).	146
Figure 5.33 Fonctions de perméabilité des stériles simulés. Stériles Lac Tio : ilménite (ce projet); Stériles Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) et stériles Bolduc (Bolduc, 2012). Sable : sable de la CCE (ce projet).....	146
Figure 5.34. Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec les stériles Bolduc un jour après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.	148
Figure 5.35 Profils de TEV simulées dans le haut ($x = 10$ m) et le bas ($x = 60$ m) de la pente de la halde expérimentale, avec les stériles Bolduc (2012), 100 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C	149
Figure 5.36 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec les stériles Gamache-Rochette un jour après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.	150
Figure 5.37 Taux de récupération simulés 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les stériles Bolduc, Gamache-Rochette et Lac Tio.	151
Figure 5.38 Répartition des débits cumulés simulés par lysimètres 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les stériles Bolduc, Gamache-Rochette et Lac Tio.	152
Figure 5.39 Géométries du modèle de la halde expérimentale pour diverses inclinaisons (3%, 5% (terrain), 7% et 10%) de la CCE.	153
Figure 5.40 Taux de récupération des débits cumulés des lysimètres 5 et 6 par rapport à l'infiltration totale de 10 à 30 jours après l'essai d'infiltration I-C.	154

Figure 5.41 Répartition des débits cumulés par lysimètre selon les différentes inclinaisons de la CCE, 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C	155
Figure 5.42 Variation des TEV moyennes dans le bas de la couche de sable (10 cm au-dessus de l'interface avec les stériles) suite à l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.	156
Figure 5.43 Variation des TEV moyennes dans le haut des stériles (10 cm sous la couche de sable) suite à l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.....	157
Figure 5.44 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.....	158
Figure 5.45 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.....	159
Figure 5.46 Taux de récupération du volume infiltré 7 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction des matériaux de la CCE. Les résultats de terrain sont également rappelés ici.....	160
Figure 5.47 Répartition des débits cumulés par lysimètre 7 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction des matériaux de la CCE. Les résultats de terrain sont également rappelés ici.....	161
Figure 5.48 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après les précipitations 1 (8 mm/12h), 2 (17 mm/12h), 3 (25 mm/12h) et 4 (33 mm/12h).	162
Figure 5.49 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après les précipitations 1 (8 mm/12h), 2 (17 mm/12h), 3 (25 mm/12h) et 4 (33 mm/12h).	163
Figure 5.50 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après la fin des précipitations réparties sur 10 h, 2 jours, 5 jours, 7 jours et 10 jours.	166
Figure 5.51 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après les précipitations réparties sur 10 h, 2 jours, 5 jours, 7 jours et 10 jours.	167
Figure A.1 Calibration des sondes de TEV GS3 dans le sable (CCE)	188

Figure A.2 Calibration des sondes de TEV GS3 dans le sable des lysimètres	188
Figure A.3 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile riche en ilménite	189
Figure A.4 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile riche en anorthosite	189
Figure A.5 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile d'anorthosite concassée ..	190
Figure C.1 Résultat du test d'infiltration 1 au perméamètre de Guelph (2016-09-26).....	192
Figure C.2 Résultat du test d'infiltration 2 au perméamètre de Guelph (2016-09-28).....	192
Figure E.1 Variations des pressions à 10 cm au-dessus et 10 cm en-dessous de l'interface sable/ stériles au-dessus de l'ensemble des lysimètres (1,1 m et 0,9 m sous la surface de la halde). Les informations des sondes SW-b Lys 3 et WR-H Lys 5 sont manquantes.....	195
Figure I.1 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous la surface des stériles) à partir du début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E et durant les 5 jours suivants. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).....	213
Figure I.2 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la surface des stériles) à partir du début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E et durant les 5 jours suivants. Les sondes installées au-dessus des lysimètres 1 et 6 n'ont pas enregistré de données de TEV durant la période étudiée. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).	214
Figure J.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).	

Note : Les sondes SW-H Lys 5 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.....	216
Figure J.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).....	217
Figure J.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).	218
Figure J. 4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).	218
Figure J. 5 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).	219
Figure K.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-B et pour les 2 jours suivants (du 27 au 29 septembre 2016)	222
Figure K.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).....	222
Figure K.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).	223
Figure K.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).	223

Figure K.5 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016)	224
Figure L.1 Variations des TEV mesurées (valeurs non-calibrées) dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable) près de la surface de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration I-D (14 au 28 juin 2017)	227
Figure L.2 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-D et pour les 14 jours suivants (du 14 au 28 juin 2017)	227
Figure L.3 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017)	228
Figure L.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017)	228
Figure L.5 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017)	229
Figure L.6 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017)	229
Figure M.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (du 6 au 27 juin 2016)	230

Figure M.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 14 jours suivants (6 au 27 juin 2016)	231
Figure M.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (6 au 21 juin 2016)	231
Figure M.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (6 au 21 juin 2016)	232
Figure N.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016)	233
Figure N.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016)	234
Figure N.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016)	234
Figure N.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016)	235
Figure O.1 Profil de succion à x=10 m de la simulation avec les stériles Bolduc en remplacement des stériles de Lac Tio. Les profils initial (t=0 sec), un jour après le début de l'essai (t=86400 sec) et après 10 jours de drainage (t=900000 sec) sont représentés dans la figure.	236

Figure O.2 Profil de succion à x=30 m de la simulation avec les stériles Bolduc en remplacement des stériles de Lac Tio. Les profils initial (t=0 sec), un jour après le début de l'essai (t=86400 sec) et après 10 jours de drainage (t=900000 sec) sont représentés dans la figure.236

Figure O.3 Profil de succion à x=50 m de la simulation avec les stériles Bolduc en remplacement des stériles de Lac Tio. Les profils initial (t=0 sec), un jour après le début de l'essai (t=86400 sec) et après 10 jours de drainage (t=900000 sec) sont représentés dans la figure.237

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Stériles d'anorthosite concassés
AEV	Valeur d'entrée d'air (<i>Air Entry Value</i>) [L]
a_c	Coefficient d'adhésion (modèle MK) [-]
a_{vG}	Constante d'ajustement du modèle van Genuchten [-]
a^*	Facteur de forme du modèle MK [-]
C_1	Constante de dimension semi-empirique du modèle de Reynolds et Elrick [-]
C_2	Constante de dimension semi-empirique du modèle de Reynolds et Elrick [-]
C_c	Coefficient de courbure [-]
CCE	Couche de contrôle des écoulements
CEBC	Couverture avec effet de barrière capillaire
C_G	Constante du modèle Kozeny-Carman modifié [-]
CRE	Courbe de rétention d'eau
C_U	Coefficient d'uniformité [-]
DDL	Point ou zone dans une pente à partir duquel l'effet de barrière capillaire disparaît (<i>Down Dip Limit</i>)
D_H	Diamètre équivalent des grains du modèle MK
DMA	Drainage minier acide
DNC	Drainage neutre contaminé
D_r	Densité relative des grains solides [-]
DTS	<i>Distributed temperature sensing systems</i>
d	Profondeur de l'enfoncement de l'infiltromètre dans le sol [L]
d_{eq}	Diamètre équivalent des grains [L]
d_x	Diamètre des grains coresspondant à x% passant [L]

d_{10}	Diamètre des grains coresspondant à 10% passant [L]
d_{30}	Diamètre des grains coresspondant à 30% passant [L]
d_{60}	Diamètre des grains coresspondant à 60% passant [L]
e	Indice des vides [-]
FCL	<i>Flow Control Layer</i>
g	Constante gravitationnelle (9,81 m ² /s) [LT ⁻²]
h	Charge hydraulique [L]
h_f	Profondeur du front de mouillage [L]
h_{surf}	Hauteur d'eau en surface [L]
h_{co}	Remontér capillaire équivalente [L]
I	Taux d'infiltration [LT ⁻¹]
IRME	Institut de recherche en mines et environnement
i	Gradient hydraulique [-]
i_c	Capacité d'infiltration [LT ⁻¹]
i_0	Infiltration au temps initial [LT ⁻¹]
i_s	Taux d'infiltration lorsque celui-ci devient constant en fonction du temps [LT ⁻¹]
KCM	Modèle prédictif de Kozeny-Carman modifié
k	Conductivité hydraulique [LT ⁻¹]
k_{fs}	Conductivité hydraulique à satiéte (sur le terrain) [LT ⁻¹]
k_r	Conductivité hydraulique relative [-]
k_{sat}	Conductivité hydraulique saturée [LT ⁻¹]
k_u	Conductivité hydraulique non saturée [LT ⁻¹]
k_x	Conductivité hydraulique dans le référentiel x [LT ⁻¹]
k_y	Conductivité hydraulique dans le référentiel y [LT ⁻¹]

k_z	Conductivité hydraulique dans le référentiel z [LT^{-1}]
k_{sat}^w	Capacité d'infiltration du sol [LT^{-1}]
L	Longueur [L]
L_D	Longueur de déviation [L]
Lys	Lysimètre
MK	Modèle Kovács Modifié (<i>Modified Kovács</i>)
m	Coefficient de distribution de la taille des pores du modèle Kovács Modifié [-]
m_{vG}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
n	Porosité [-]
n_f	Paramètre de lissage qui contrôle la pente au point d'inflexion de la courbe de rétention d'eau du modèle de Fredlund et Xing [-]
n_{vG}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [-]
PMP	Précipitation maximale probable
P_{NoD}	Pourcentage de la masse sèche pour un tamis de taille nominale D
P_{Nod}	Pourcentage de la masse sèche pour un tamis de taille nominale d
pH	Potentiel hydrogène
Q	Débit [L^3T^{-1}]
q	Débit unitaire [LT^{-1}]
q_s	Taux d'infiltration constant dans l'infiltromètre [LT^{-1}]
RTFT	Rio Tinto Fer et Titane
r	Rayon du cylindre du perméamètre de Guelph [L]
r_a	Rayon intérieur de l'infiltromètre [L]
S_a	Degré de saturation dû à l'adhésion [-]
S_c	Degré de saturation dû à la capillarité [-]

SDR	Couverture de type stockage déviation relargage
S_r	Degré de saturation [-]
S_s	Surface spécifique des grains solides [L^2M^{-1}]
t	Temps [T]
TDR	<i>Time domain reflectometry</i>
TEV	Teneur en eau volumique
V	Volume [L^3]
WEV	Valeur d'entrée d'eau (<i>Water Entry Value</i>) [L]
w	Teneur en eau massique [%]
x	Paramètre de tortuosité du modèle [-]
z	Profondeur [L]
α_{vG}	Paramètre d'ajustement du modèle de van Genuchten [L^{-1}]
β_w	Angle de mouillage ou angle de contact entre l'eau et la surface des particules solides [°]
ϵ_a	Permittivité diélectrique [$M^{-1}L^{-3}T^4I^2$]
γ_w	Poids volumique de l'eau (9,81 kN/m ³) [$(MLT^{-2})L^{-3}$]
λ_c	Longueur capillaire microscopique estimée selon la texture et la structure du sol pour le calcul de la conductivité hydraulique à partir du perméamètre de Guelph [L]
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau ($\approx 10^{-3}$ Pa s à 20°C) [$ML^{-1}T^{-2}$]
ρ_d	Masse volumique sèche [ML^{-3}]
ρ_s	Masse volumique des grains solides [ML^{-3}]
ρ_s	Masse volumique de l'eau (≈ 1000 kg/m ³ à 20°C) [ML^{-3}]
ψ	Succion matricielle [$ML^{-1}T^{-2}$]
ψ_a	Pression d'entrée d'air [$ML^{-1}T^{-2}$]

ψ_n Paramètre de normalisation du modèle de Kovács Modifié [ML⁻¹T⁻²]

ψ_r Suction résiduelle [ML⁻¹T⁻²]

ψ_0 Suction à l'état initial (t=0) [ML⁻¹T⁻²]

σ_w Tension de surface de l'eau (0,0073 N/m à 20°C)

θ Teneur en eau volumique [-]

θ_r Teneur en eau volumique résiduelle [-]

θ_s Teneur en eau volumique à saturation [-]

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Calibration en laboratoire des sondes de TEV (GS3).....	188
Annexe B - Méthode de validation de la calibration des TEV (sondes GS3) in situ dans la couche de sable de la CCE	191
Annexe C - Résultats des essais d'infiltration avec le perméamètre de guelph (1 et 2)	192
Annexe D - Temps d'arrivé du front de mouillage aux différents niveaux des sondes de TEV..	193
Annexe E - Résultats des sondes de succion (MPS-2) durant l'essai d'infiltration I-C.....	195
Annexe F - Résultats des mesures manuelles de débits de sortie – Essai d'infiltration à grande échelle I-C	196
Annexe G - Résultats des mesures manuelles de débits de sortie – Essai d'infiltration à grande échelle I-D	202
Annexe H - Résultats des mesures manuelles de débits de sortie – Essai d'infiltration à grande échelle I-E	206
Annexe I - Résultats essai I-E dans les roches stériles.....	213
Annexe J - Résultats de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A	215
Annexe K - Résultats de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B.....	220
Annexe L - Résultats de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D	225
Annexe M - Résultats de l'événement de précipitation P1 (2016-06-06).....	230
Annexe N - Résultats de l'événement de précipitation P2 (2016-08-07)	233
Annexe O - Profils de succion de la simulation avec les stériles Bolduc	236

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'industrie minière est un secteur important pour l'économie du Québec. La province comptait, en 2017, 62 mines ou projets miniers sur l'ensemble de son territoire (Gouvernement du Québec, 2017b), celles-ci comptent pour un cinquième de la production minière canadienne. L'impact environnemental des exploitations peut cependant être important. La gestion à court, moyen et long terme des importantes quantités de rejets produits pendant les opérations constitue notamment un défi majeur pour l'ensemble de l'industrie (Aubertin et al., 2002a, Aubertin et al., 2016).

Parmi ces rejets, la gestion des roches stériles peut être particulièrement complexe en raison de leur nature fortement hétérogène et de leur granulométrie étalée. Ces rejets sont habituellement stockés en surface dans des empilements souvent de grandes tailles, appelés haldes à stériles. L'exposition de ces roches stériles aux conditions météoriques peut entraîner la génération de drainage minier acide (DMA) ou de drainage neutre contaminé (DNC) lorsque ces roches contiennent des sulfures (Morin et al., 1991).

La mine du Lac Tio (Rio Tinto Fer et Titane), située à 43 km au nord-est de la ville de Havre-Saint-Pierre, dans la région de la Côte-Nord (Québec, Canada), est un exemple de site générateur de DNC. Des dépassements occasionnels des concentrations réglementaires de nickel (0,5 mg/L concentration moyenne mensuelle acceptable, Directive 019 MDDELCC, 2012) ont ainsi été constatés dans les eaux de lixiviation aux pieds des haldes à stériles (Bussière et al., 2015). Cette mine est l'un des plus importants gisements d'ilménite ($FeTiO_3$) massive au monde (Charlier et al., 2010). La teneur de coupure d'environ 76% entraîne la production de deux types de roches stériles (Martin et al., 2017) :

- des stériles riches en anorthosite, faiblement minéralisés et peu réactifs (faible teneur en ilménite) ;
- des stériles riches en ilménite et contenant des sulfures de fer et de nickel. Ces stériles sont considérés comme potentiellement générateurs de DNC.

Une nouvelle méthode de construction des haldes à stériles a été proposée et développée par l'équipe de la chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement et gestion des rejets miniers afin de limiter la génération de drainage contaminé (Aubertin et al., 2002b, 2005,

2008, 2013; Fala et al., 2003, 2005, 2006; Dawood et al., 2014). Cette méthode vise à limiter l'infiltration de l'eau dans les stériles au moyen d'une ou plusieurs couches de contrôle des écoulements (CCE) constituée(s) de matériaux inertes de granulométrie fine. Le contraste entre les propriétés hydrauliques de la CCE et des stériles sous-jacents permet de développer un effet de barrière capillaire à l'interface entre ces deux matériaux. L'eau est retenue et déviée latéralement par la CCE vers le pied de la halde composé de matériaux non réactifs. Cette technique permet ainsi une gestion intégrée des stériles pendant l'opération de la mine, selon le concept de conception pour la fermeture (ou *Designing for closure*; p. ex. SRK, 1991; Aubertin et Chapuis, 1991; Aubertin et al., 2015, 2016).

La halde expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio (Bussière et al., 2015; Martin et al., 2017) a pour objectif d'évaluer l'efficacité de cette méthode à grande échelle et dans des conditions réelles de terrain.

1.1 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet est l'étude du comportement hydrogéologique de la CCE et de la halde à stériles expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Évaluer le comportement hydrogéologique de la CCE et de la halde expérimentale au moyen d'essais d'infiltration à grande échelle réalisés dans le cadre de ce projet.
- Calibrer et valider un modèle numérique réalisé avec le modèle SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016) à partir des essais d'infiltration à grande échelle et des précipitations enregistrées sur le site de la mine.
- Évaluer le comportement de la CCE à grande échelle au moyen de simulations 2D pour différentes conditions de précipitation.
- Évaluer le comportement de la CCE à grande échelle au moyen de simulations 2D pour différentes configurations géométriques de la halde expérimentale (notamment la pente et l'épaisseur de la CCE) et pour différentes propriétés hydrogéologiques des matériaux.

1.2 Contenu du mémoire

Ce mémoire comporte 6 chapitres. À la suite du chapitre d'introduction (chapitre 1), le chapitre 2 présente l'état des connaissances sur les propriétés des roches stériles et de leur entreposage. L'écoulement saturé et non saturé, les notions de drainage contaminé et la restauration des haldes à stériles y sont aussi abordés. Le chapitre 3 présente les protocoles expérimentaux et la méthodologie des essais réalisés sur le terrain et au laboratoire. Le chapitre 4 est consacré aux résultats obtenus au laboratoire et sur le site de la halde expérimentale. Le chapitre 5 présente les résultats de la calibration, de la validation du modèle numérique de la halde expérimentale ainsi que les résultats des simulations numériques complémentaires. Le chapitre 6 résume les résultats des essais de terrain et des simulations numériques et présente les conclusions issues des analyses numériques complémentaires et propose quelques recommandations pour les travaux futurs. Les détails des différents essais sont présentés aux Annexes A à O.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE ET SITE À L'ÉTUDE

2.1 Haldes à stériles

2.1.1 Propriétés physiques des roches stériles

Les roches stériles sont produites lors des opérations minières afin de permettre l'accès aux zones minéralisées. Il s'agit de matériaux hétérogènes dont la taille des grains peut varier de quelques micromètres (argile et silt) à plusieurs dizaines de centimètres (blocs) (Martin, 2003; Fala et al., 2005; Aubertin et al., 2013). La valeur du D_{10} (soit la taille des particules correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique) est généralement comprise entre 0,2 mm et 3 mm et celle du D_{60} se situe entre 1 et 80 mm (e.g. McKeown et al., 2000; Peregoedova, 2012). Le coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$) des roches stériles peut atteindre 30 ou plus (Aubertin et al., 2002b; Gamache-Rochette, 2004; Peregoedova, 2012) ce qui en fait un matériau à granulométrie très étalée. L'indice des vides (e) des stériles en place est aussi très variable, soit entre 0,25 et 0,6 (Peregoedova, 2002; Lessard, 2011) selon la granulométrie et la méthode de construction (voir section 2.1.2). La conductivité hydraulique des roches stériles dépend aussi fortement de la distribution granulométrique (Peregoedova, 2012; Maknoon, 2016). Des conductivités hydrauliques saturées de 10^{-9} m/s ont été observées pour la fraction très fine (argileuse) des roches stériles alors que des roches stériles plus grossières (avec des porosités comprises entre 0,35 et 0,40) ont montré des valeurs aussi élevées que 10^{-2} m/s (Morin et al., 1991). La densité relative des grains est comprise entre 2,4 et 6 (et plus) selon la minéralogie de la roche (Hernandez, 2007). Par exemple, les roches stériles minéralisées (ilménite) de la mine Havre-Saint-Pierre (RTFT) montrent une densité relative comprise entre 3,9 et 4,2 (Lessard, 2011; Peregoedova, 2012) et les stériles non minéralisés (anorthosite) entre 2,7 et 2,9 (Plante, 2010; Levesque, 2015).

2.1.2 Description générale des haldes à stériles

Les roches stériles sont généralement entreposées à proximité du lieu de production, dans des haldes à stériles (Aubertin et al., 2002b). Leur hauteur peut dépasser 100 m et leur superficie peut atteindre plusieurs centaines d'hectares (Martin, 2003). La configuration des haldes à stériles dépend principalement de deux paramètres : la technique de construction et la topographie du site.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour construire les haldes à stériles. La topographie du site, les équipements de transport disponibles et les caractéristiques physicochimiques des roches stériles déterminent en grande partie la méthode employée pour chaque exploitation. Les principales méthodes peuvent être décrites succinctement comme suit (Morin et al., 1991; Aubertin et al., 2002a; Fala, 2002; Martin, 2003) :

- Déversement à la benne (*end-dumping*) : Des camions-bennes déversent directement les stériles en crête de la halde. Ce type de déversement entraîne un granoclassement marqué des stériles le long des pentes. Les particules fines restent majoritairement proches du sommet (près du point de dépôt) alors que les plus gros blocs tendent à se retrouver en bas de pente, avec une zone de transition entre les deux.
- Épandage au butoir (*push-dumping*) : Les stériles sont déposés par camion ou convoyeur en bord de la crête et sont ensuite poussés par butoir dans la pente. Cette technique entraîne aussi un granoclassement des stériles moins important que la méthode de déversement à la benne.
- Déversement à la benne avec régalage (*free-dumping*) : Cette technique consiste à déverser les stériles en tas à la surface de la halde puis à les niveler et les compacter afin d'obtenir une couche relativement uniforme. Cette approche permet de minimiser la ségrégation des particules et d'augmenter la densité des matériaux en place (comparativement aux deux méthodes précédentes).
- Mise en place par pelle à benne traînante (*drag-line*) : Cette méthode est surtout appliquée dans les exploitations à faible profondeur par découverte et placers. La technique entraîne peu de ségrégation et produit une densification plus faible que pour la technique de déversement à la benne avec régalage.

Le choix de la (ou des) technique(s) de construction a un effet direct sur la structure interne des haldes à stériles et sur leur comportement hydrique (Aubertin et al., 2002a, 2005; Anterrieu et al., 2010; Dawood et al., 2011). La topographie du site influence aussi la dynamique de l'écoulement et la quantité d'eau qui s'écoule à travers la halde. Par exemple, les haldes construites dans des vallées ou à flanc de montagne sont fréquemment saturées à leur base en raison de la remontée de la nappe phréatique.

2.1.3 Structure interne et comportement hydrique des haldes à stériles

Les haldes à stériles construites par les méthodes de déversement à la benne ou d'épandage au butoir (section 2.1.2) présentent généralement une structure interne caractérisée par une succession de couches de granulométrie fine et de couches avec une granulométrie plus grossière (Martin, 2003; Aubertin, 2013) (figure 2.1). Cette configuration est due surtout à la granulométrie hétérogène des stériles et à la ségrégation des particules lors de la construction. Les passages répétés de la machinerie lourde à la surface de la halde pendant sa construction entraînent aussi la formation de couches compactées plus denses (Aubertin et al., 2002, 2005).

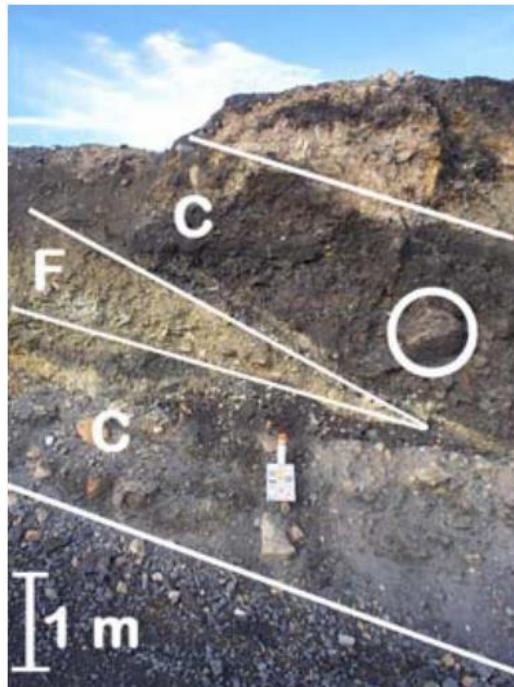


Figure 2.1 Structure interne typique dans une halde à stériles construite avec la méthode de déversement à la benne (mine Goldstrike, Barrick Gold Corporation). F (*fine*) : couche de granulométrie fine; C (*coarse*) : couche de granulométrie plus grossière. Un bloc d'environ 1 m de diamètre est observé dans la couche de matériaux grossiers (cercle blanc) (tiré de Martin et al., 2006).

Le comportement hydrogéologique des haldes à stériles est largement contrôlé par la présence des couches de matériaux fins et compactés (Martin, 2003; Intissar, 2009; Anterrieu et al., 2010) (voir figure 2.12 présentée plus loin). Les eaux de percolation peuvent être retenues dans les couches de matériau fin par effet de barrière capillaire, jusqu'à l'atteinte d'une pression critique (c'est-à-dire la pression d'entrée d'eau, WEV de la couche sous-jacente), ce qui peut alors provoquer une infiltration localisée dans la halde (Fala et al., 2003) ; dans d'autres cas, il peut y avoir évaporation de l'eau infiltrée et retenue dans la couche de surface (Zhan et al., 2001b). Les eaux infiltrées peuvent aussi être déviées latéralement le long de ces couches de matériaux fins inclinées (Bussière, 1999; Zhan et al., 2001a; Apithy, 2003). Cet écoulement latéral se poursuit jusqu'à ce que la pression d'eau atteigne la valeur critique (WEV) des matériaux grossiers : c'est le point DDL (*Down Dip Limit*) (voir section 2.4.1.2; Bussière, 1999). De plus, l'écoulement dans la fraction plus grossière ne se fait pas de manière uniforme, car la nature hétérogène des stériles peut entraîner la formation de zones d'écoulements préférentiels locaux le long des

macropores (Broda et al., 2014). La section suivante décrit plus en détail les écoulements dans les milieux poreux en conditions saturées et non saturées.

2.2 Écoulement de l'eau dans les milieux poreux

2.2.1 Écoulement saturé

L'écoulement de l'eau dans un matériau poreux saturé isotrope peut être décrit par la loi de Darcy, qui peut s'écrire comme suit pour un écoulement 1D (e.g. Fetter, 2008):

$$q = -k_{sat}i \quad (2.1)$$

Où : $i = \frac{\Delta h}{\Delta z}$ (2.2)

Avec :

q : débit unitaire ou vitesse de Darcy $[LT^{-1}]$

k_{sat} : conductivité hydraulique saturée $[LT^{-1}]$

i : gradient hydraulique [-]

Δh : différence de charge hydraulique [L]

Δz : distance entre les deux points de mesure [L]

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) dépend de la granulométrie, de la forme des grains, de la distribution, de la taille et de la forme des pores, de la viscosité et de la masse volumique de l'eau (Fetter, 2008). Selon les hypothèses de Darcy, la conductivité hydraulique est constante lorsque le matériel est saturé et incompressible (porosité constante).

La conductivité hydraulique saturée des sols et des matériaux analogues (comme les roches stériles par exemple) peut être mesurée au laboratoire (essai de perméabilité; ASTM 5856,

ASTM 2015) ou sur le terrain (essais d'infiltration; ASTM 5126, ASTM 2016). La conductivité hydraulique saturée peut aussi être mesurée sur le terrain au moyen d'essai de perméabilité *in situ* (*slug test*) dans un puits (Bower et Rice, 1976; Chapuis, 1999) ou au moyen d'essai au perméamètre ou avec un infiltromètre (Elrick et Reynolds, 1992; Reynolds et Elrick, 2005). Il est cependant difficile d'assurer une saturation complète des matériaux sur le terrain. La valeur obtenue par les essais d'infiltration sur le terrain est donc généralement plus faible que la conductivité hydraulique saturée et est appelée conductivité hydraulique à satiéte (Bouwer, 2002; Bréard Lanoix, 2017). Notons aussi que dans le cas des roches stériles, les protocoles d'essais doivent souvent être adaptés (modifiés) en fonction de la taille des grains et du volume des éprouvettes ou des zones mises à l'essai (Hernandez, 2007; Lessard, 2010; Peregoedova, 2012).

La conductivité hydraulique saturée peut également être estimée (ou prédictée). Plusieurs équations et modèles existent selon le type de sol et ses propriétés (Hazen, 1892; Terzaghi, 1925; Taylor, 1948; Mbonimpa et al., 2002). Les méthodes de Hazen (1892), Taylor (1948) et Terzaghi (1925) s'appliquent par exemple aux matériaux non plastiques (granulaires) et sont basées sur les propriétés granulométriques et/ou l'indice des vides du sol.

L'équation de Kozeny-Carman (KC) s'applique aux sols (et matériaux) plastiques et non plastiques incluant les résidus miniers pour des valeurs de conductivités hydrauliques comprises entre 10^{-1} et 10^{-11} m/s (Chapuis et Aubertin, 2003). Cette équation repose sur l'hypothèse qu'un matériau poreux peut être représenté comme un assemblage de tubes. Elle peut s'écrire comme suit (Chapuis et Aubertin, 2003) :

$$k_{sat} = \frac{C \times g}{\mu_w \rho_w S_s^2 D r^2} \frac{e^3}{(1 + e)} \quad (2.3)$$

Avec :

k_{sat} : conductivité hydraulique saturée [LT^{-1}]

C : constante du modèle ($C = 0,2 \times 100$ si k_{sat} est exprimé en cm/s)

g : accélération gravitationnelle [LT^{-2}]

μ_w : viscosité dynamique de l'eau [$ML^{-1}T^{-1}$]

ρ_w : masse volumique de l'eau [ML^{-3}]

S_s : surface spécifique des grains solides [L^2M^{-1}], estimée selon la granulométrie par la méthode de Chapuis et Légaré (1992)

D_r : densité relative des grains solides [-]

e : indice des vides [-]

Cette équation a été appliquée, avec certains ajustements (pour les particules mobiles), afin d'estimer la valeur de k_{sat} de roches stériles soumises à des essais de laboratoire (Peregoedova et al., 2013).

L'équation du modèle KCM développé par Aubertin et al. (1996) et Mbonimpa et al. (2002) pour les matériaux granulaires est particulièrement adaptée à l'estimation de la conductivité hydraulique saturée pour les sols naturels et pour les matériaux concassés comme les rejets miniers (Chapuis, 2012). Elle peut s'écrire comme suit (Mbonimpa et al., 2002) :

$$k_G = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} \frac{e^{3+x}}{1+e} C_u^{1/3} D_{10}^2 \quad (2.4)$$

Avec :

k_G : conductivité hydraulique saturée pour un matériau granulaire [LT^{-1}]

C_G : constante reliée au matériau granulaire ($= 0,1$; Mbonimpa et al., 2002) [-]

x : constante du modèle (généralement, $x = 2$; Mbonimpa et al., 2002) [-]

γ_w : poids unitaire de l'eau [$ML^{-2}L^3$]

C_u : coefficient d'uniformité [-]

D_{10} : taille des particules correspondant à 10% passant [L]

D'autres modèles prédictifs basés sur le diamètre des grains correspondant à 50% passant (D_{50}) (Shepherd, 1989; Taylor, 1948; Budhu, 2011) se sont avérés particulièrement bien adaptés aux roches stériles (Peregoedova et al., 2013). Les conductivités hydrauliques obtenues avec l'équation de Taylor (1948) et Budhu (2011), ajustées selon certains des résultats expérimentaux

de Peregoedova (2012), ont mené à des valeurs comprises dans le même ordre de grandeur que les résultats d'essais obtenus au laboratoire (Peregoedova et al., 2013).

2.2.2 Écoulement non saturé

La loi de Darcy peut être généralisée aux écoulements dans les milieux non saturés. Dans ces conditions, la conductivité hydraulique (k) varie en fonction de la teneur en eau (ou de la succion). L'équation de Richards (1931) permet d'évaluer l'écoulement et les variations de la teneur en eau volumique en fonction de la succion dans un domaine partiellement saturé. Elle peut s'écrire comme suit dans un référentiel en trois dimensions (Hillel, 1998) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Où :

θ : teneur en eau volumique [$L^3 L^{-3}$]

ψ : succion [$ML^{-1}T^{-2}$]

k_x, k_y et k_z : Conductivités hydrauliques dans les directions x, y et z

La courbe de rétention d'eau (section 2.2.3) et la fonction de perméabilité (section 2.2.4) sont nécessaires pour résoudre l'équation (2.5). Cette équation est habituellement résolue au moyen de codes numériques comme le programme SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016) utilisé dans ce projet pour simuler les écoulements non saturés dans la halde expérimentale. Les principales caractéristiques de ce code sont décrites à la section 2.5.2.

2.2.3 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) est la fonction qui décrit la variation de la teneur en eau volumique (θ , [-]) ou du degré de saturation (S_r , [%]) d'un sol (ou matériau analogue) en fonction de la succion (ψ , [kPa]) (figure 2.2). La CRE dépend du type de matériau, de la porosité et de la

taille des pores (Aubertin et al., 1998, 2003). Cette courbe est caractérisée par la pression d'entrée d'air (AEV), la succion résiduelle (ψ_r), la teneur en eau résiduelle (θ_r) et la teneur en eau à saturation (θ_s). La pression d'entrée d'air (*Air Entry Value*, AEV ou ψ_a) correspond à la succion maximale à laquelle le matériau reste (quasi) saturé ($S_i \approx 100\%$). La succion résiduelle (ψ_r) (aussi valeur d'entrée d'eau ; *Water Entry Value*, WEV, si l'effet d'hystérésis est négligé) est la valeur de pression négative à laquelle un matériau atteint sa teneur en eau résiduelle (θ_r) (Fredlund et Xing, 1994). Ces points sont généralement obtenus graphiquement sur la CRE par la méthode des tangentes. On considère habituellement que la teneur en eau devient nulle pour une succion de 10^6 kPa (Fredlund et Xing, 1994).

La teneur en eau volumique (θ) est souvent plus élevée en drainage qu'en mouillage pour une même succion (tel qu'illustré sur la figure 2.2). La présence d'air dans les pores, la distribution de la taille et la forme des pores, le changement de volume induit par les variations de teneur en eau volumique et l'angle de contact (eau-solide) selon la direction de l'écoulement peuvent expliquer ce phénomène d'hystérésis (Maqsoud et al., 2006; Fala, 2008).

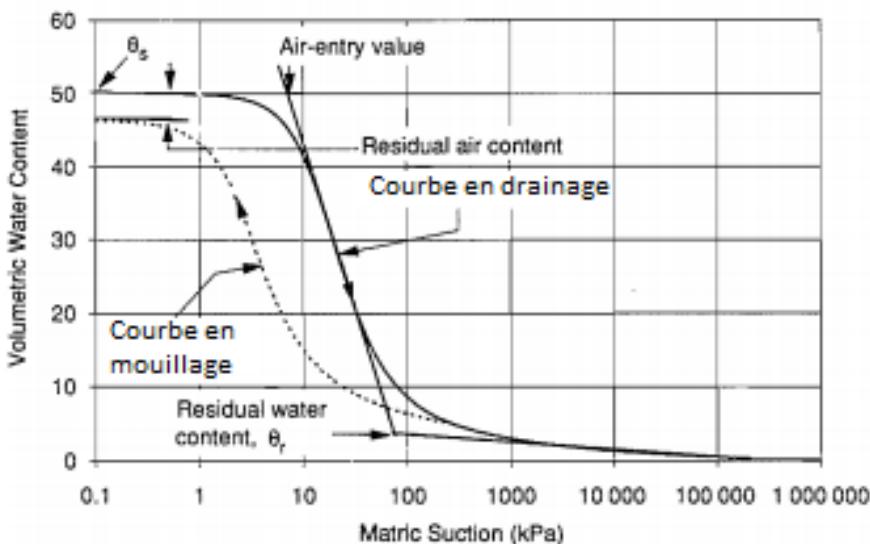


Figure 2.2 Courbe de rétention d'eau typique d'un silt (adapté de Fredlund et Xing, 1994).

La courbe de rétention d'eau peut être mesurée au laboratoire par différentes méthodes, comme par exemple la cellule Tempe, la plaque de pression et les essais en colonnes (Delage et Cui,

2000). Les essais consistent généralement à mesurer la teneur en eau volumique (θ) pour différentes succions et à définir la CRE point par point. Plusieurs modèles descriptifs permettent de décrire la CRE par une fonction. Par exemple, l'équation développée par van Genuchten (1980, 1985) s'écrit :

$$\theta = (1 + (\alpha_{vG} \psi)^{n_{vG}})^{-m_{vG}} \quad (2.6)$$

$$m_{vG} = 1 - \frac{1}{n_{vG}} \quad (2.7)$$

Où :

α_{vG} : constante d'ajustement du modèle [L-1]

m_{vG} et n_{vG} : constantes d'ajustement du modèle [-]

La courbe de rétention d'eau peut aussi être estimée avec des modèles prédictifs basés sur les propriétés géotechniques de base du matériau (e.g. Fredlund et al., 2012). Les modèles de Kovács (1981) et Kovács modifié (MK) (Aubertin et al., 1998, 2003) considèrent la contribution des forces d'adhésion et capillaire au degré de saturation. Le modèle MK est particulièrement bien adapté aux résidus miniers et aux sols fins et grossiers (Aubertin et al., 2003), et peut s'écrire :

$$S_r = \frac{\theta}{n} = 1 - \langle 1 - S_a \rangle (1 - S_c) \quad (2.8)$$

Avec :

S_a : composante d'adhésion [-]

S_c : composante de capillarité [-]

$\langle \rangle$: crochets de Macauley [$\langle y \rangle = 0,5 (y + |y|)$]

$$S_a = a_c \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r})} \right] \frac{(h_{co}/\psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} (\frac{\psi}{\psi_n})^{1/6}} \quad (2.9)$$

Avec :

a_c : coefficient d'adhésion [-]

ψ_0 : succion lorsque la teneur en eau volumique est nulle [L]

ψ_n : paramètre de normalisation [L]

h_{co} : hauteur de remontée capillaire équivalente [L]

ψ_r : succion résiduelle [L]

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp[-m(h_{co}/\psi)^2] \quad (2.10)$$

Avec :

m : coefficient qui dépend de la distribution de la taille des pores [-]

Dans le modèle MK, la succion résiduelle (ψ_r) peut être estimée par la relation suivante (Aubertin et al., 2006):

$$\psi_r = 0,8h_{co}^{1,2} \quad (2.11)$$

La hauteur de remontée capillaire (h_{co}) et le diamètre équivalent des grains (D_H) peuvent être évalués de la manière suivante pour un matériau granulaire (Aubertin et al., 2006):

$$h_{co} = \frac{0,75}{[1,17 \log(C_U) + 1]eD_{10}} \quad (2.12)$$

Une variante du modèle MK a été proposée pour les stériles (MKs) par Peregoedova et al. (2014) afin de mieux tenir compte de la présence d'une fraction fine sur la teneur en eau résiduelle. Les calculs de la surface spécifique et du diamètre équivalent dans le modèle MKs sont ainsi adaptés au stériles (Peregoedova et al., 2014) :

Calcul de la surface spécifique (Chapuis et Légaré, 1992) :

$$S_m \left(\frac{m^2}{kg} \right) = \frac{\alpha}{\rho_s} \Sigma [(P_{NoD} - P_{Nod})/d] \quad (2.13)$$

Diamètre équivalent pour les particules :

$$D_H \frac{\alpha \times 100}{S_m \rho_s} \quad (\text{le facteur 100 permet d'exprimer } D_H \text{ en cm}) \quad (2.14)$$

Où :

S_m : surface spécifique [$L^2 M^{-1}$]

α : facteur de forme [-]

ρ_s : masse volumique du matériau [ML^{-3}]

D et d : diamètre des grains de chaque fraction [L]

P_{NoD} et P_{Nod} : pourcentage en poids de chaque fraction (entre deux tailles de tamis numéro x) dont la taille est comprise entre D et d [-]

La figure 2.3 montre une CRE expérimentale (points) comparée aux prédictions du modèle MKs des stériles de la mine du Lac Tio pour une granulométrie inférieure à 50 mm (Peregoedova et al., 2014). Les courbes noire, rouge, bleue et verte montrent des prédictions du modèle MKs pour les granulométries initiales et finale dans le haut, le milieu et le bas de la colonne, respectivement. Les quatre prédictions montrent des AEV identiques mais des TEV résiduelles différentes (comprise entre 0,05 et 0,07). On constate que le modèle prédictif (MKs) donne des résultats relativement proches de ceux obtenus de façon expérimentale. Cette CRE montre que le AEV des stériles est très faible (inférieur à 10 cm ou 1 kPa) et que la teneur en eau volumique

résiduelle est relativement grande (autour de 0,06) pour un matériau aussi grossier (mais qui contient tout de même une fraction fine non négligeable).

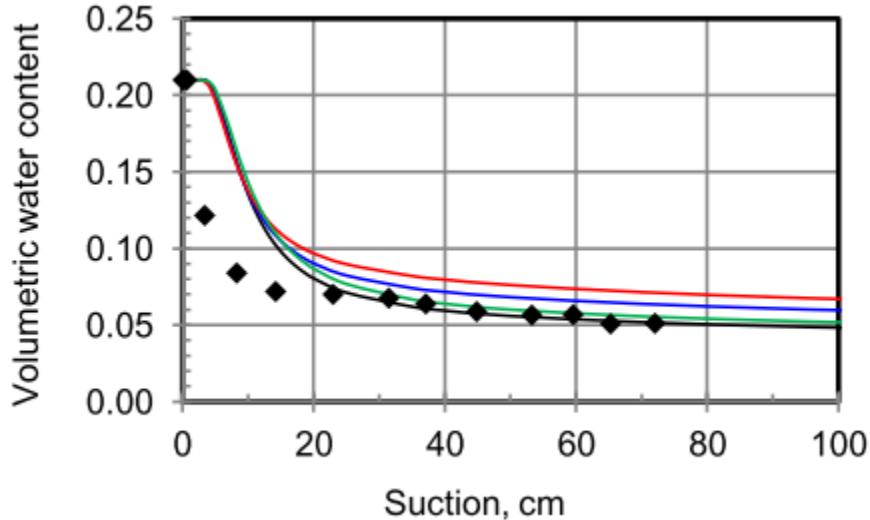


Figure 2.3 CRE typique des roches stériles. Les points sont des mesures expérimentales réalisées lors d'un essai de drainage en colonne; les courbes noire, bleue, rouge et verte correspondent aux prédictions avec le modèle MKs pour diverses granulométries obtenues sur l'éprouvette avant et après l'essai (tiré de Peregoedova et al., 2014).

2.2.4 Conductivité hydraulique non-saturée

La conductivité hydraulique non-saturée (k_u) dépend de la teneur en eau d'un matériau et donc de la succion appliquée (selon la CRE) (figure 2.4). Cette relation peut être évaluée par l'étude de l'évolution spatiale des profils de teneur en eau et de succion suite à une infiltration à flux constant (Musy et Soutter, 1991). La loi de Darcy exprimée en fonction de la teneur en eau volumique peut s'écrire comme suit pour un écoulement vertical (Musy et Soutter, 1991):

$$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.15)$$

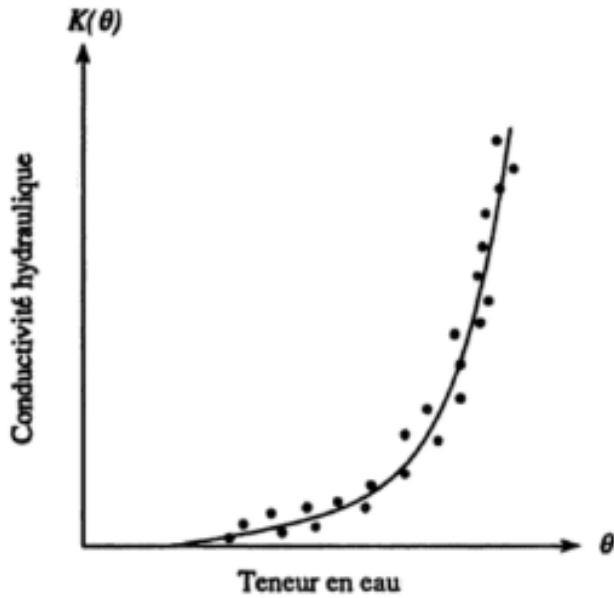


Figure 2.4 Relation entre la teneur en eau volumique et la conductivité hydraulique (tiré de Musy et Soutter, 1991).

La fonction de perméabilité peut être estimée par différents modèles statistiques comme ceux de Child et Colis-George (1950), de Burdine (1953) et de Mualem (1976). Ce dernier combiné avec l'équation de van Genuchten (1980) pour la CRE est fréquemment employé pour les sols et les rejets miniers (Bussière, 1999; Zhuang et al., 2001; Pabst, 2011; Lévesque, 2015). L'équation résultante peut s'exprimer de la façon suivante (van Genuchten, 1980, Mbonimpa et al., 2006) :

$$k_r = \theta_e^{1/2} [1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{m_{vG}}})^{m_{vG}}]^2 \quad (2.16)$$

Avec :

k_r : conductivité hydraulique relative ($=k_{ut}/k_{sat}$) [-]

θ_e : teneur en eau volumétrique réduite ($\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$) [-]

m_{vG} : constante du modèle de van Genuchten [-]

2.2.5 Infiltration de l'eau dans un milieu poreux

La dynamique de l'écoulement de l'eau dans les haldes à stériles est essentiellement liée aux précipitations et aux infiltrations (Morin et al., 1991).

De façon plus spécifique, le taux d'infiltration est fonction du taux de précipitation, de la teneur en eau initiale, de la charge en surface, de la conductivité hydraulique du matériau et de la configuration et du type de matériau (Hillel, 1998). Si le taux de précipitation est inférieur à la capacité d'infiltration du matériau, l'infiltration est contrôlée surtout par l'apport en eau. Si le taux de précipitation excède la capacité d'infiltration, le matériau atteint alors son « infiltrabilité » (Horton, 1940; Hillel, 1998). Dans ce cas, il y a ruissellement ou accumulation d'eau à la surface (Delleur, 2006).

Le taux d'infiltration dans un milieu non saturé est représenté de façon schématique à la figure 2.5. Le taux d'infiltration est plus grand au début de l'essai et tend à diminuer en fonction du temps pour atteindre la capacité d'infiltration du matériau (qui tend vers la conductivité hydraulique saturée du matériau si la charge hydraulique de surface est faible) (Hillel, 1998; Miyazaki, 2005). Cette tendance est reliée au gradient hydraulique plus élevé et à la succion plus élevée en surface dans le matériau non saturé au début de l'infiltration. La capacité d'infiltration d'un sol peut être évaluée numériquement ou mesurée au moyen d'essais de terrain (ou de laboratoire).

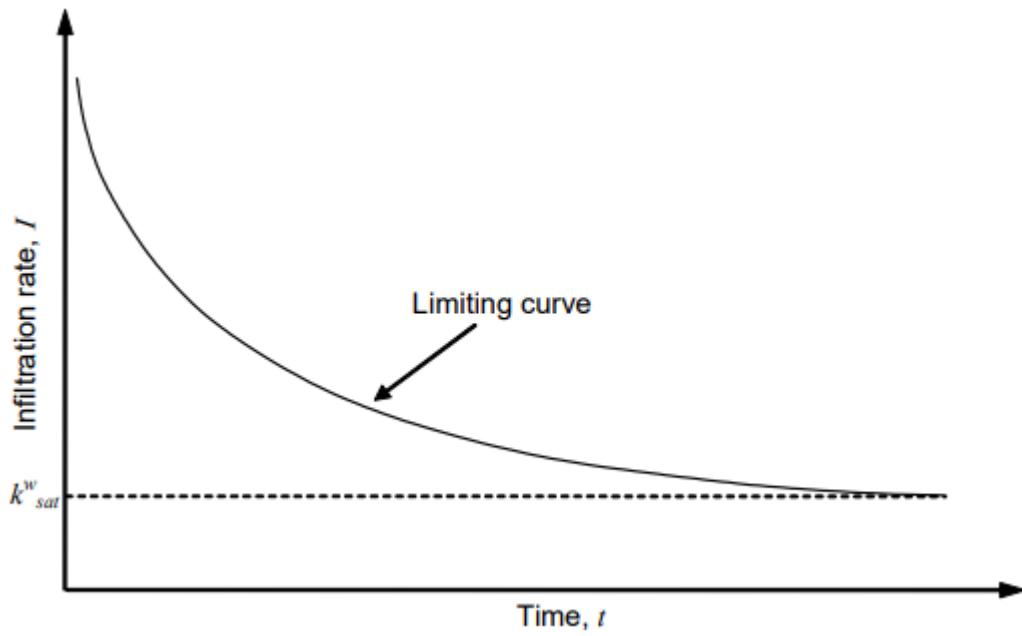


Figure 2.5 Taux d'infiltration en fonction du temps (Horton, 1933; Koorevaar et al., 1983 tiré de Gitirana, 2005). Dans cette figure, k_w^{sat} représente la capacité d'infiltration du sol (quasi saturé).

L'infiltration peut se faire de façon homogène ou hétérogène en présence d'irrégularités ou de macropores (ou fissures). Pour un matériau granulaire homogène non saturé, le front de mouillage peut aussi être irrégulier lorsque la force gravitaire est plus grande que la force capillaire locale (par exemple dans Hill et Parlange, 1972; Liu et al., 1994). Ces infiltrations localisées sont quelques fois appelées digitation (*fingering*) (par exemple dans Fala et al., 2003, 2005 et 2006).

2.2.5.1 Essai d'infiltration sur le terrain

Il existe plusieurs façons d'évaluer les conditions d'infiltration *in situ*. Les principaux types d'essai ont surtout pour objectif d'évaluer la valeur de k_{sat} (ou k_{fs} , la conductivité hydraulique à satiation). En pratique, les méthodes les plus utilisées sont l'infiltromètre à simple ou double anneau(x) et le perméamètre de Guelph (Gamache-Rochette, 2004; Bréard Lanoix, 2017). Ces méthodes permettent de mesurer des débits d'infiltration en fonction de la charge hydraulique qui sont ensuite reliés à la conductivité hydraulique à satiation (c'est-à-dire la saturation maximale mais sans que le matériau soit complètement saturé (Arson, 2009)); diverses relations

mathématiques ont été proposées à cet égard (Reynolds & Elrick, 1986, 1990 et 2005; Elrick. & Reynolds, 1992).

Le perméamètre de Guelph permet de réaliser des essais de percolation à charge constante sur presque tous les types de sols (Kanwar et al., 1989; Havlena et Stephens, 1992; Gribb et al., 2004; ASTM D5126, 2016). Les principales composantes du paramètre de Guelph sont présentées à la figure 2.6.

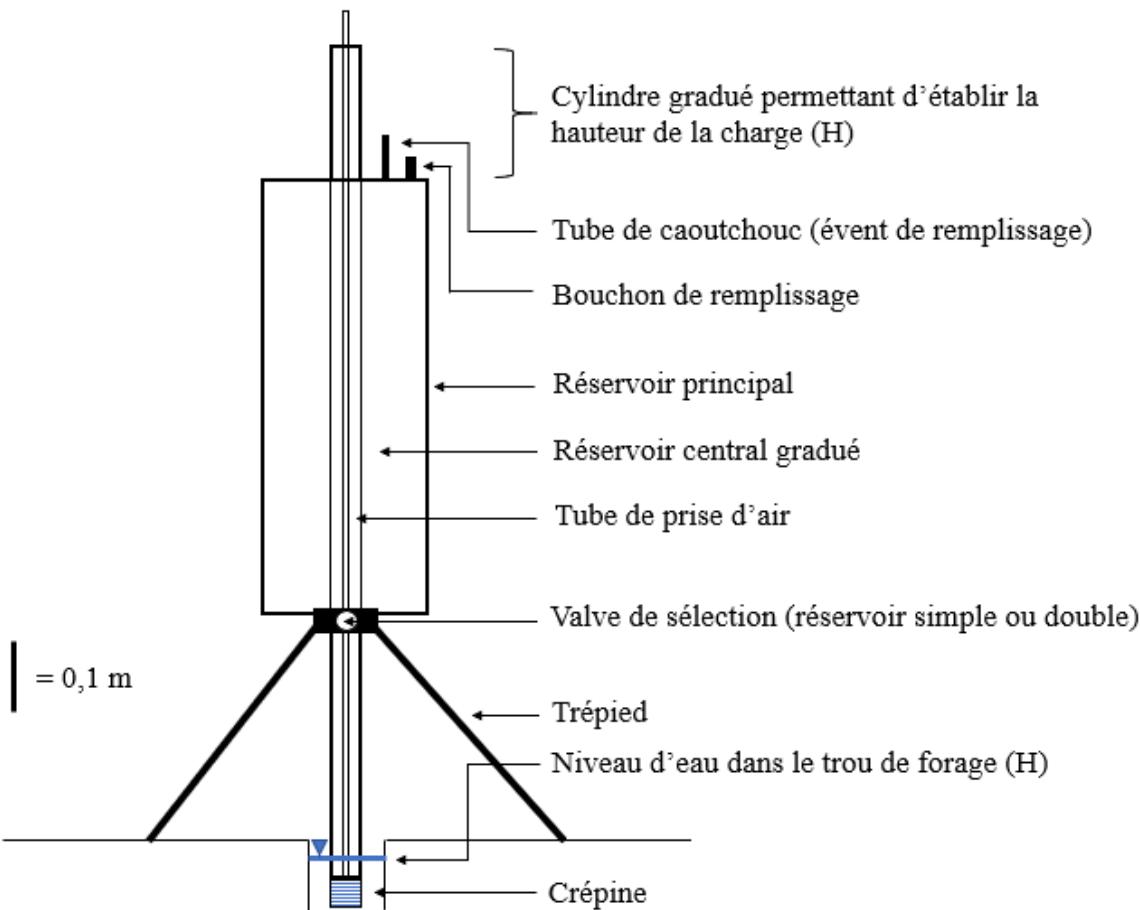


Figure 2.6 Schéma descriptif du perméamètre de Guelph (adapté de Musy et Soutter, 1991).

L'infiltromètre à simple anneau est constitué d'un anneau imperméable de quelques dizaines de centimètres de diamètre qui est enfoncé dans le matériau étudié (figure 2.7). Une charge hydraulique variable ou constante est appliquée à l'intérieur de l'anneau (ASTM D5126, 2016). La méthode de l'infiltromètre à double anneau repose sur des principes similaires à celle du

simple anneau mais permet de favoriser un écoulement vertical dans l'anneau interne (ASTM D5126, 2016).

Ces trois méthodes permettent généralement d'obtenir des conductivités hydrauliques à satiation comparable (c'est-à-dire du même ordre de grandeur) bien que les résultats avec le perméamètre de Guelph et l'infiltromètre à double anneau soient généralement sensiblement plus faibles que ceux mesurés avec l'infiltromètre à simple anneau (Bréard Lanoix, 2017).

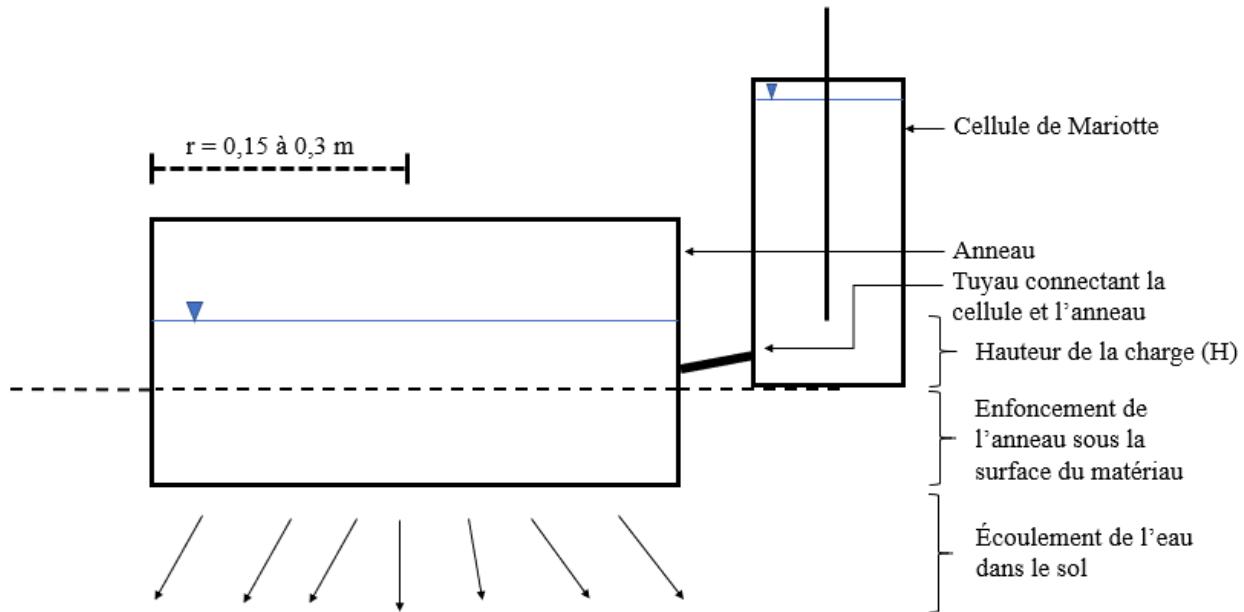


Figure 2.7 Schéma d'un essai d'infiltration de type simple anneau à charge constante (adapté de Dingman, 1994).

2.2.5.2 Essai d'infiltration à grande échelle

Il existe plusieurs types d'essais d'infiltration à grande échelle. Les essais d'arrosages sont utilisés pour l'étude du ruissellement ou de l'érosion de surface d'un sol (Delleur, 2006). Des essais d'infiltration à charge variable ou constante dans des bassins d'infiltration de grande dimension (plusieurs mètres de côtés) peuvent être utilisés pour étudier les paramètres contrôlant l'infiltration dans les sols (Wauchope et al., 1999), les massifs rocheux (Unger et al., 2004) ou sur les haldes à stériles (Gamache-Rochette, 2004). Les essais en bassin permettent généralement

l'installation d'instruments (p.ex. sondes de teneur en eau ou de succion) afin de suivre l'infiltration de l'eau sous la surface (Gamache-Rochette, 2004; Fala, 2008; Lessard, 2011).

La figure 2.8 montre un montage types d'essais d'infiltration à grande échelle de 3 m^3 (3000 L) dans des bassins d'environ 7 m^2 aménagés sur des haldes à stériles (Lessard, 2011). Ces essais ont montré des taux d'infiltration compris entre 0,01 et 0,03 cm/s.

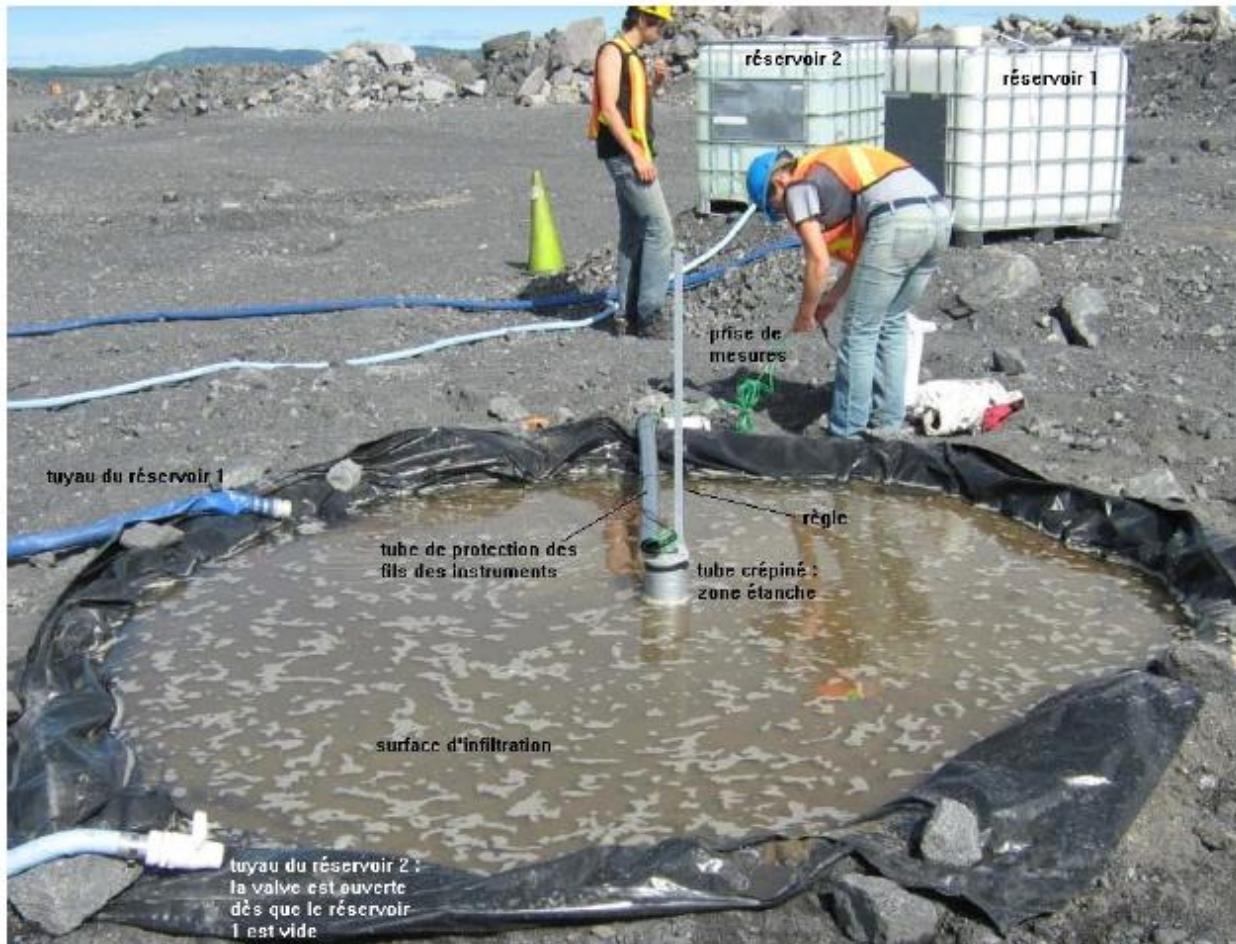


Figure 2.8 Montage des essais d'infiltration *in situ* de Lessard (2011).

2.2.5.3 Modèles estimatifs

Le taux d'infiltration peut également être estimé au moyen de modèles analytiques à partir des caractéristiques de base des matériaux étudiés. La fonction proposée par Green et Ampt (1911)

permet d'estimer la progression du front de mouillage en fonction du temps (Delleur, 2006). Cette fonction est basée sur des caractéristiques du sol (ou matériau) qui peuvent être mesurées ou estimées tel que la variation de la TEV, la conductivité hydraulique saturée et la succion au front de mouillage. Cette fonction peut s'exprimer ainsi (Delleur, 2006) :

$$I = I_c = K_{sat}t + (h_{surf} - h_f)\Delta\theta \ln\left(1 + \frac{I}{(h_{surf} - h_f)\Delta\theta}\right) \quad (2.17)$$

Où :

I : Infiltration [LT^{-1}]

I_c : Capacité d'infiltration [LT^{-1}]

t : Temps [T]

h_{surf} : Hauteur d'eau à la surface (>0) [L]

h_f : Profondeur du front de mouillage [L]

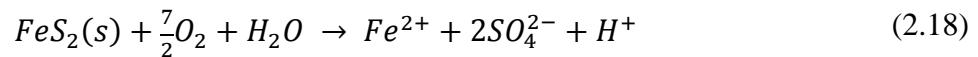
Le modèle de Green et Ampt (1911) est valable pour une condition de charge d'eau constante en surface et est principalement applicable pour l'infiltration dans un matériau grossier relativement sec (Hillel, 1998). Le modèle de Philip (1957), plus élaboré, se base sur l'hypothèse d'un écoulement vertical en 1D dans un sol homogène avec une teneur en eau initiale connue (Dingman, 1994). D'autres modèles (Parlange et al., 1982 et Swartzendruber, 1987) ont aussi été développés pour des charges variant dans le temps et pour diverses conditions frontières (Delleur, 2006). Les essais d'infiltration peuvent aussi être interprétés au moyen d'approches analytiques ou numériques (analyses inverses) (Bréard Lanoix, 2017).

2.3 Drainage contaminé

L'infiltration de l'eau dans les haldes peut contribuer à l'oxydation de certains minéraux présents dans les stériles miniers et entraîner la génération de drainage minier acide (DMA) ou de drainage neutre contaminé (DNC). Le DMA est caractérisé par un pH faible (< 5) et une

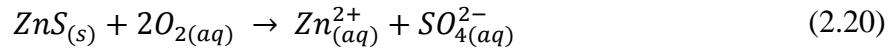
concentration élevée en métaux et en sulfates (p. ex. Aubertin et al., 2002a; Nordstrom et al., 2015). Le DNC peut résulter aussi de l’oxydation des sulfures mais il est caractérisé par un pH proche de la neutralité (entre 6,5 et 8,5) avec des concentrations relativement élevées en certains métaux. La génération de DNC implique souvent la neutralisation par des minéraux neutralisants (acidivores, comme les carbonates) de l’acide générée par l’oxydation des sulfures de fer (Blowes et al., 2003; Cravotta III, 2008). Dans ce cas, le pH de la solution se maintient autour de la neutralité tant que des minéraux neutralisants restent disponibles. Lors de l’oxydation des sulfures, les métaux associés peuvent être mis en solution et certains d’entre eux, comme le cobalt, le manganèse ou le nickel, peuvent rester mobiles même à des pH relativement élevés.

Les équations 2.16 et 2.17 décrivent l’oxydation (directe) de la pyrite suivie de la neutralisation de l’acide par la calcite (Blowes et al., 2003).



D’autres minéraux, par exemple les plagioclases calciques (telle que la labradorite) ont aussi un pouvoir neutralisant tel que montré par les travaux de Plante (2010). Celui-ci a aussi montré que des minéraux contenus dans les roches stériles ont un pouvoir de sorption (limité) qui a le potentiel de capter des métaux (tel que Ni dans le cas de la mine du Lac Tio), réduisant ainsi la quantité de métaux en solution dans les eaux de ruissellement et de percolation (du moins, de façon temporaire).

L’oxydation (directe) d’autres sulfures métalliques non générateurs d’acide ne provoque pas de baisse du pH (Nicholson, 2004; Bussière et al., 2005). Les métaux associés peuvent cependant être solubles et mobiles à des pH proches de la neutralité (Blowes et al., 2003; Cravotta III, 2008), ce qui contribue au DNC. Par exemple, la sphalérite peut réagir avec l’oxygène (oxydation directe) pour former des ions sulfates et des ions zinc mais pas de protons (Blowes et al., 2003) :



Tel que mentionné plus tôt, ce projet de recherche vise à évaluer une méthode de conception des haldes à stériles qui pourrait prévenir la formation de DNC (ou même de DMA).

2.4 Restauration des haldes à stériles et recouvrements

La loi sur les mines (RLRQ chapitre M-13.1) stipule que pour obtenir une bail dans le but d'exploiter une ressource minérale au Québec, un plan de réaménagement et de restauration doit être soumis et approuvé (Gouvernement du Québec, 2016). Les principaux objectifs du plan de restauration sont ((Gouvernement du Québec, 2017a)):

- L'élimination des risques pour la santé et la sécurité des personnes.
- La limitation de la production et de la propagation de contaminants susceptibles de dégrader l'environnement et viser à l'élimination de toute forme d'entretien et de suivi à long terme.
- La réhabilitation du site dans un état visuellement acceptable.
- La réhabilitation des infrastructures en lien avec l'usage futur du site.

Plusieurs techniques ont été développées dans le but de limiter les réactions d'oxydation (et donc la génération de DMA et de DNC) à la source (Aubertin et al., 2002a, 2015, 2016). Elles devraient être mises en place le plus tôt possible dans le cycle d'opération (gestion intégrée des rejets miniers et *Designing for closure*) (Aubertin et al., 2002a, 2015, 2016). Le concept de couche de contrôle des écoulements étudié dans le cadre de ce projet est un exemple d'une gestion intégrée pour les roches stériles (section 2.5).

Les trois grandes catégories de recouvrements utilisés sur les sites d'entreposage de rejets miniers réactifs au Québec (climat humide) sont (SRK 1991; Aubertin et al., 2002a) :

- Recouvrement de type barrière à l'oxygène
- Recouvrement limitant l'infiltration d'eau (barrière à l'eau)
- Recouvrement consommant l'oxygène

Le choix d'une méthode de restauration se fait généralement en fonction du climat, de la nature et des propriétés chimiques et géotechniques des rejets miniers, des conditions *in situ* (p.ex. position de la nappe phréatique), de la disponibilité des matériaux d'emprunt (pour la construction du

recouvrement) et des coûts. Les méthodes de restauration sont fonction du type de rejet minier. Les parcs à résidus (rejets du concentrateur) et les haldes à stériles sont des ouvrages géotechniques très différents qui nécessitent des techniques de restauration adaptées selon l'ouvrage et la problématique *in situ*. Les caractéristiques des haldes à stériles (hauteur des empilements et l'angle des pentes) limitent les modes de restauration applicables.

2.4.1 Couverture avec effet de barrière capillaire

Le fonctionnement de plusieurs types de recouvrements (dont la méthode de la couche de contrôle des écoulements étudiée dans ce mémoire) repose sur le concept d'effet de barrière capillaire. L'objectif de cette technique est de réduire les infiltrations liquides (eau) ou le flux gazeux (oxygène) vers les stériles réactifs (Nicholson et al., 1989; Udoth, 1993; Yanful et al., 1993; Aubertin et al., 1995; O'kane et al., 1998; Bussière, 1999; Martin et al., 2006; Williams et al., 2006; Qing, 2010; Schneider et al., 2010).

2.4.1.1 Effet de barrière capillaire

Un effet de barrière capillaire peut se développer en condition non saturée lorsqu'une couche de matériau fin est placée sur une couche de matériau plus grossier (Nicholson et al., 1989). Lorsque la succion augmente, la teneur en eau du matériau plus grossier diminue plus rapidement (AEV plus faible) que celle du matériau fin (à gauche dans la figure 2.9 pour une couche de silt sur du sable). Cette désaturation du matériau plus grossier s'accompagne d'une baisse de sa conductivité hydraulique. Dans ces conditions, pour une succion donnée, la teneur en eau et donc la conductivité hydraulique du matériau grossier (le sable sur la figure 2.9) peut devenir inférieure à celle du matériau fin (le silt). L'eau est alors retenue dans la couche de matériau fin jusqu'à ce que la pression d'entrée d'eau (WEV) du matériau grossier soit atteinte en condition de mouillage (il faut aussi que la succion excède le AEV du matériau plus fin pour provoquer sa désaturation).

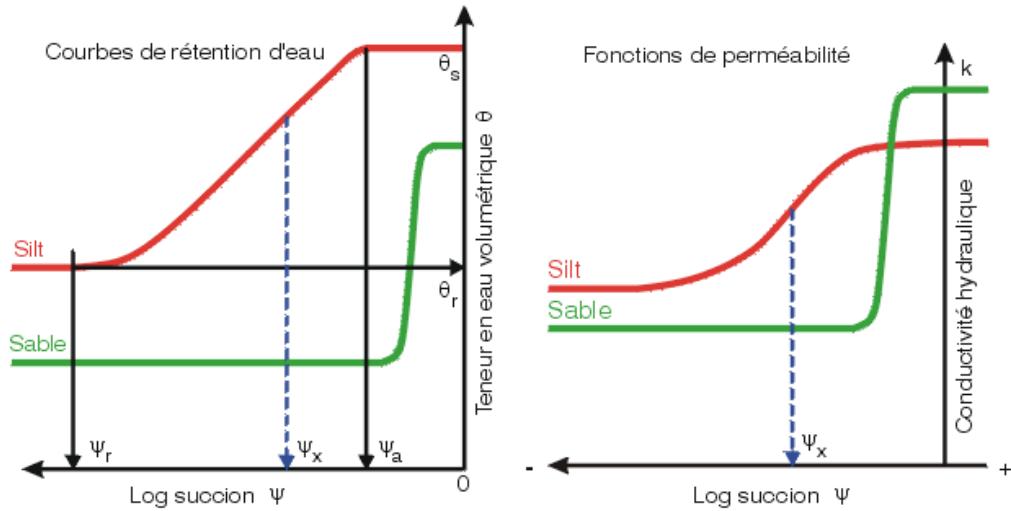


Figure 2.9 Représentation de l'effet de barrière capillaire par les CRE et les fonctions de perméabilité d'un silt et d'un sable (tiré de Aubertin et al. 2002a)

En climat humide, l'objectif d'une couverture à effets de barrière capillaire (CEBC) est généralement de limiter le flux d'oxygène vers les rejets réactifs (Aubertin et al., 2002a). Une CEBC est typiquement constituée de trois couches principales : une couche de matériaux grossiers (bris capillaire), surmontée d'une couche de matériaux fins (couche de rétention d'eau) et d'une autre couche de matériaux grossiers sous-jacente qui crée le bris capillaire (Aubertin et al., 2002a). La couche de matériaux grossiers installée sur la couche de rétention peut aussi servir de protection contre l'érosion et de barrière à l'évaporation. Cette technique a été utilisée sur quelques haldes à stériles et elle aurait permis de réduire la génération de DMA jusqu'à 90% dans certains cas (Yanful et al., 1993). D'autres configurations et matériaux basés sur le même concept auraient donné des résultats similaires (O'kane et al., 1998; Qing, 2010). Les principales limitations et contraintes de ce type de couvertures placées sur des haldes (ou des digues de résidus miniers) concernent le maintien de la saturation dans le haut de pente de couche de rétention d'eau inclinée (Bussière et al., 2003) et la durabilité des matériaux de la couche de rétention d'eau (érosion, cycles de mouillage/séchage et de gel/dégel) (Aubertin et al., 2002b).

Les recouvrements de type *store-divert and release* (SDR) utilisent l'effet de barrière capillaire pour contrôler l'infiltration de l'eau des précipitations (Zhan et al., 2000, 2001a, 2001b). L'eau des précipitations s'accumule dans la couche de matériau plus fin, où elle est stockée

momentanément puis évacuée par évaporation ou par drainage latéral (dans le cas d'une surface inclinée; voir section 2.4.1.2). Des simulations numériques basées sur des travaux de terrain ont montré que cette technique pouvait limiter efficacement l'infiltration de l'eau jusqu'aux roches stériles réactives pour un climat relativement sec (Zhan et al., 2000; Martin et al., 2006). L'efficacité des couvertures de type SDR a été testée et validée sur le terrain (Zhan et al., 2001b; Schneider et al., 2010; Bossé et al., 2013, 2015). Des travaux ont aussi montré l'importance de l'homogénéité du matériau de couverture afin de prévenir les écoulements préférentiels le long de macropores (Schneider et al., 2010).

2.4.1.2 Effet de pente

Les couvertures à effets de barrière capillaire construites sur une surface inclinée favorisent un écoulement latéral (déviation), qui est plus ou moins rapide selon l'inclinaison et les propriétés des matériaux (Bussiere, 1999). Durant l'écoulement, la pression d'eau à l'interface des matériaux grossiers et fins augmente à mesure que l'eau déviée s'accumule le long de la pente. L'effet de barrière capillaire peut être progressivement réduit lorsque la succion devient inférieure à la pression d'entrée d'eau (WEV) du matériau sous-jacent. L'eau commence alors à s'écouler dans le matériau grossier sous-jacent (qui ne peut plus agir comme bris capillaire). Ce point est appelé "*Down Dip Limit*" (DDL) (Ross, 1990). La distance entre le haut de la pente et le point DDL est appelé longueur effective du bris capillaire (ou longueur de diversion, L_D) (Bussière et al., 1998, 2007; Bussière, 1999, Aubertin et al., 2009) (figure 2.10). En pratique, le point DDL devrait être considéré comme une zone plutôt qu'un point unique (Bussière, 1999; Aubertin et al., 2006, 2009; Cifuentes, 2006; Lacroix Vachon et al., 2015).

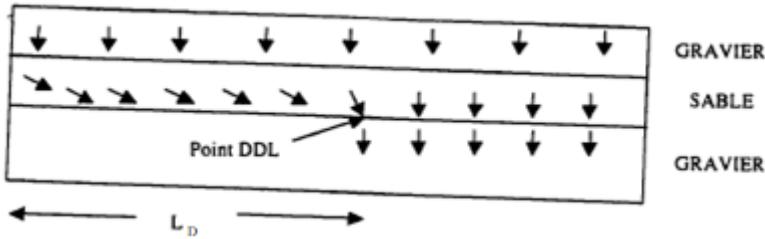


Figure 2.10 Point DDL (*Down Dip Limit*) dans une couverture à effet de barrière capillaire (CEBC). Les flèches indiquent le mouvement de l'eau. L_D : Longueur effective du bris capillaire (adapté de Bussière, 1999).

Ce principe peut servir à contrôler les écoulements d'eau dans les haldes. La figure 2.11 présente un modèle de halle avec couches de granulométries fines inclinées intercalées entre des bancs de stériles plus grossiers (à gauche) et l'écoulement de l'eau dans ce système (selon la TEV) dans l'image de droite (Fala et al., 2003). Cette configuration utilise l'effet d'une barrière capillaire en pente pour dévier l'eau infiltrée dans la halle vers l'extérieur. L'eau s'accumule dans les couches de matériau plus fins et elle est déviée vers le pied de la halle en suivant le bas de la couche de rétention jusqu'à ce qu'il y ait écoulement dans l'horizon sous-jacent. Cet écoulement vertical peut toutefois se faire avant d'atteindre la face externe de la halle lorsque la valeur de L_D est plus petite que la longueur de cette couche inclinée.

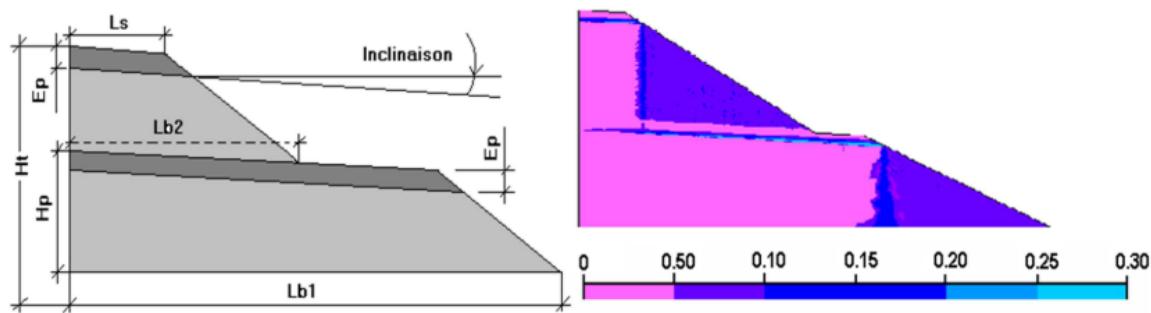


Figure 2.11 Simulation de l'écoulement dans une halde avec des couches de matériau fin (en foncé à gauche) inclinées entre les bancs de roches stériles plus grossières; les résultats de droite montrent la TEV simulée dans la halde (tiré de Fala et al., 2003).

2.4.1.3 Évaluation de la longueur effective L_D du bris capillaire

Quelques relations analytiques permettent d'estimer la longueur effective du bris capillaire en régime permanent. Ces formulations ne permettent cependant pas d'évaluer la pression dans la zone en amont et en aval du point DDL. Les équations analytiques de Ross (1990), Ross modifié par Steenhuis et al. (1991), Morel-Seytoux (1994) et Warrick et al. (1997) donnent des résultats similaires lorsque l'angle de la pente est inférieur à 5°, mais les résultats divergent significativement lorsque l'angle de la pente excède 10° (Bussière, 1999; Bussière et al., 2007).

La longueur effective du bris capillaire peut aussi être estimée, souvent de façon plus représentative, au moyen de simulations numériques (Bussière, 1999; Apithy, 2003; Cifuentes, 2006; Martin et al., 2006; Aubertin et al., 2006, 2009; Bussière et al., 2007; Lacroix Vachon et al., 2015). Les conditions climatiques, l'épaisseur de la couche de rétention d'eau, l'inclinaison de la pente et les propriétés des matériaux du recouvrement ont une influence sur la longueur effective du bris capillaire. L'épaisseur de la couche de diversion de l'eau a toutefois un effet limité au-delà d'une certaine épaisseur (Apithy, 2003; Aubertin et al., 2009).

2.5 Halde inclinée avec couche de contrôle des écoulements

L'objectif des couches de contrôle des écoulements (CCE) est de réduire les infiltrations dans les stériles réactifs afin de limiter les risques de génération de DMA et/ou de DNC. Cette approche permet d'intégrer la restauration à la construction de la halde selon les concepts à la base d'une gestion intégrée des rejets miniers et en adoptant une approche de conception pour la fermeture du site - *Designing for Closure* (p. ex. Aubertin et al., 2015, 2016). Le principe de la technique consiste à dévier latéralement l'eau des précipitations le long des couches inclinées de matériaux fins. Ces couches peuvent être placées en séquence à la surface des stériles pendant la construction de la halde (figure 2.12). Les couches de contrôle des écoulements (en marron dans la figure 2.12) deviennent l'eau qui percole dans les stériles (en beige dans la figure 2.12) vers le pied de la halde fait de stériles non-générateurs (en gris dans la figure 2.12). Le concept a été développé et validé (en partie) au moyen de simulations numériques (Aubertin et al., 2002b, 2005, 2009; Fala et al., 2003, 2005, 2006) et d'essais sur des modèles physiques (Zhan et al., 2001b; Bussière et al., 2002). Des simulations numériques (réalisées par Broda et al.,

2014) ont aussi servi à établir les caractéristiques visées pour la halde expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio (RTFT) afin d'évaluer la performance d'une CCE à grande échelle et dans des conditions réelles de terrain.

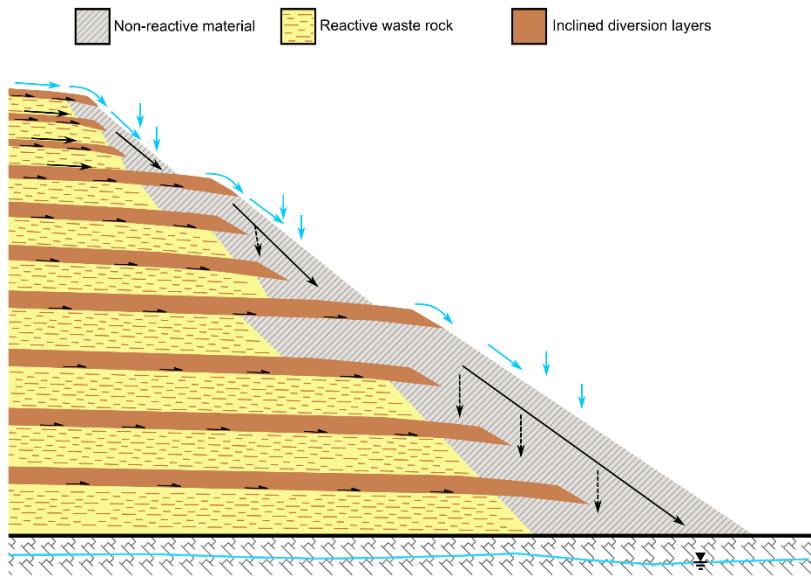


Figure 2.12 Concept de halde inclinée avec couches de contrôle des écoulements (adapté de Aubertin, 2013).

2.5.1 Halde expérimentale de la mine du Lac Tio

La halde expérimentale a une longueur de 70 mètres, une largeur de 10 à 12 mètres au sommet et une hauteur maximale de 7 mètres (figure 2.13, 2.14 et 2.15). Six lysimètres de 10 m de longueur et 10 m de largeur ont été installés sous la base de la halde et connectés à des débitmètres automatisés. Le cœur de la halde a été construit avec des stériles à forte teneur en hémo-ilménite contenant une faible teneur en sulfures réactifs et potentiellement générateurs de DNC (Pépin, 2009; Plante, 2010). Le pied de la halde (au-dessus des lysimètres 5 et 6) est constitué de stériles d'anorthosite peu (ou non) réactifs (Pépin, 2009). La halde expérimentale a été construite par la méthode d'épandage au butoir (Bussière et al., 2015). La couche de contrôle des écoulements est composée d'une couche de sable compacté de 58 à 75 cm d'épaisseur recouverte d'une couche de 24 à 30 cm de roches stériles (d'anorthosite) concassée. Le sable provient d'une sablière située à

proximité de la ville d'Havre-Saint-Pierre (environ 40 km au sud de la mine) et la roche stérile concassée placée en surface a été produite sur le site. La CCE est inclinée selon une pente de 5% vers le pied de la halde (Bussière et al., 2015; Martin et al. 2017). Les figures 2.13, 2.14 et 2.15 montrent une coupe transversale dans l'axe principal, une coupe perpendiculaire et une photo de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio.

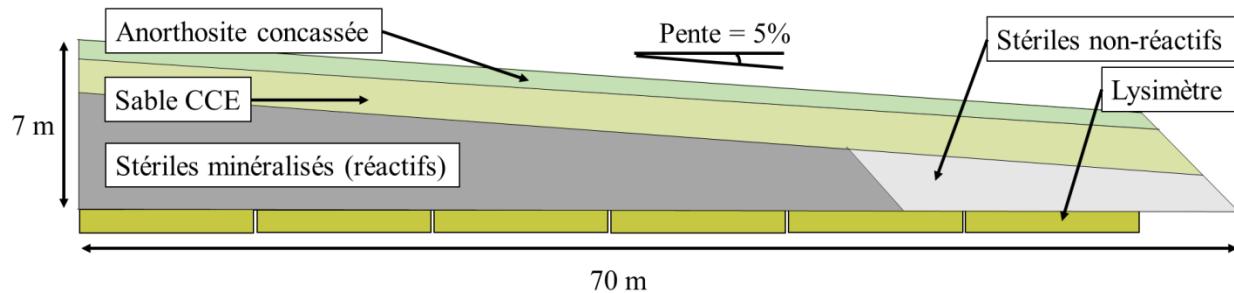


Figure 2.13 Coupe transversale dans l'axe principal de la halde expérimentale construite à la mine du Lac Tio.

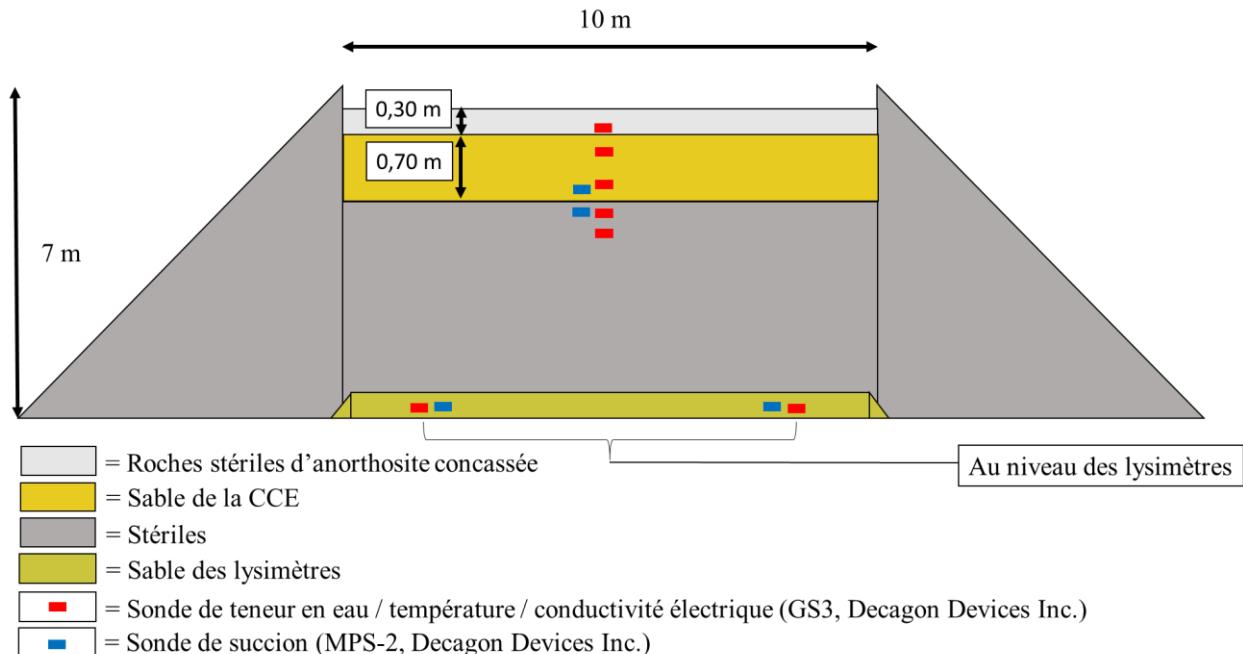


Figure 2.14 Coupe en section de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio



Figure 2.15 Halde expérimentale construite sur le site de la mine du Lac Tio (crédit: IRME); on y voit la rampe d'accès en arrière-plan, les bermes de protection de chaque côté (à la surface) et le conteneur (beige) qui contient divers équipements (à l'extrémité de la halde).

Propriétés des matériaux

Les études antérieures menées sur le site de la mine du Lac Tio ont permis de classer les roches stériles riches en ilménite comme potentiellement générateurs de DNC (Pépin, 2009; Plante, 2010). Une portion des haldes existantes a fait l'objet d'une investigation géophysique à grande échelle pour analyser leur structure interne (Intissar, 2009; Dawood et al., 2011). Ces travaux basés sur des profils de résistivité électrique ont aussi permis d'évaluer les propriétés des stériles (échantillonnages) et d'observer une alternance de couches hétérogènes et résistives (faible TEV) et de couches plus homogènes et plus conductrices (plus forte TEV). Les propriétés hydrogéologiques des stériles ont été étudiées plus spécifiquement au moyen d'essais d'infiltration *in situ* (Lessard, 2011) et d'essais en colonne de grande taille au laboratoire (Peregoedova, 2012). Les propriétés des stériles présentées dans le tableau 2.1 correspondent à des stériles frais (non altérés) pour une fraction granulométrique tronquée de taille inférieure à 50 mm (QIT1_P50_f2; Peregoedova, 2012). Des approches de prédiction de la courbe de rétention d'eau et de la fonction de conductivité hydraulique, mieux adaptées aux roches stériles,

ont été proposées suite à ces essais (Peregoedova et al., 2013, 2014). Les propriétés du sable de la CCE ont été caractérisées au laboratoire et sur le terrain par des essais d'infiltration avec des infiltromètres à simple et à double anneau et avec un perméamètre de Guelph (Bréard-Lanoix, 2017); celles des roches stériles d'anorthosite concassées ont été évaluées en laboratoire (Lévesque, 2015) et sur le terrain (cette étude).

Comme ceci a été mentionné antérieurement, la caractérisation des propriétés de ces différents matériaux indique que l'AEV du stérile d'anorthosite concassée est faible ($\sim 0,5$ kPa) comparativement à celui du sable (3,8 kPa) mais il serait plus élevé que celui des roches stériles d'ilménite plus grossières (de l'ordre de 0,1 kPa) (tableau 2.1 et figure 2.16). La succion résiduelle (Ψ_r) de la roche stérile concassée (2 kPa) est proche de celle des stériles ($\sim 1,5$ kPa); ces valeurs sont plus faibles que celle du sable (10 kPa). Les TEV à saturation (ou la porosité) du sable et de la roche stérile concassée sont comprises entre 0,23 et 0,42 alors que celle des stériles serait autour de 0,21 (Peregoedova, 2012). Les conductivités hydrauliques saturées (k_{sat}) de la roche stérile concassée mesurées *in situ* (cette étude) et du sable sont similaires (5×10^{-6} m/s et 7×10^{-6} m/s respectivement) alors que celle des stériles serait nettement plus élevée (jusqu'à 1×10^{-3} m/s) (tableau 2.1 et figure 2.17); notons toutefois cette dernière valeur s'accompagne d'une grande incertitude. Le sable et le stérile d'anorthosite concassé (dans la CCE) ont des caractéristiques comparables et ils peuvent être classifiés comme SW-SP et SW-SM respectivement (système USCS, ASTM D2487, 2011). Le sable est un cas limite SW-SP (avec portion relativement grande de particules fines) et l'anorthosite concassé est un SW-SM, car il contient du silt et du gravier.

Tableau 2.1 Caractéristiques hydrogéologiques des matériaux de la halde expérimentale (basées sur Peregoedova 2012; Bréard Lanoix 2017 et cette étude). θ_s : TEV saturée, θ_r : TEV résiduelle, AEV : Pression d'entrée d'air, ψ_r : Suction résiduelle.

Propriétés	Roches stériles concassées	Sable CCE	Stériles
θ_s	0,31	0,37	0,21
θ_r	0,08	0,03	0,05
AEV (kPa)	0,5	3,8	0,1
ψ_r (kPa)	2	10,2	1,5
k_{sat} (m/s)	5×10^{-6}	7×10^{-6}	1×10^{-3}

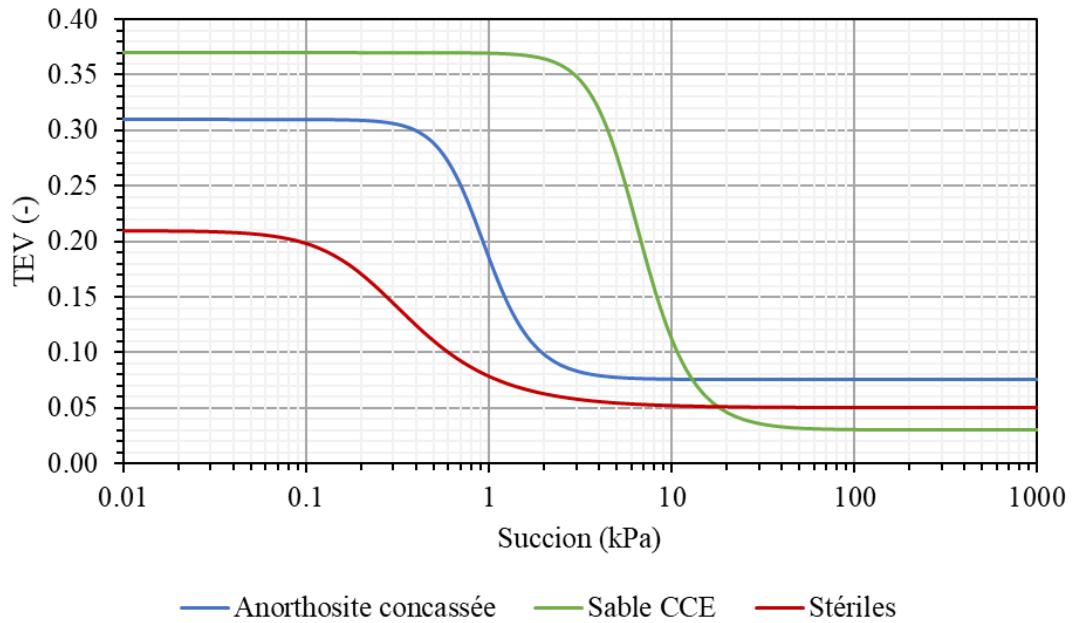


Figure 2.16 Courbes de rétention d'eau des matériaux de la halde expérimentale, tracées avec la fonction de van Genuchten (voir équations 2,6 et 2,7 (Adapté de Peregoedova, 2012; Lévesque, 2015; Bréard Lanoix, 2017et cette étude).

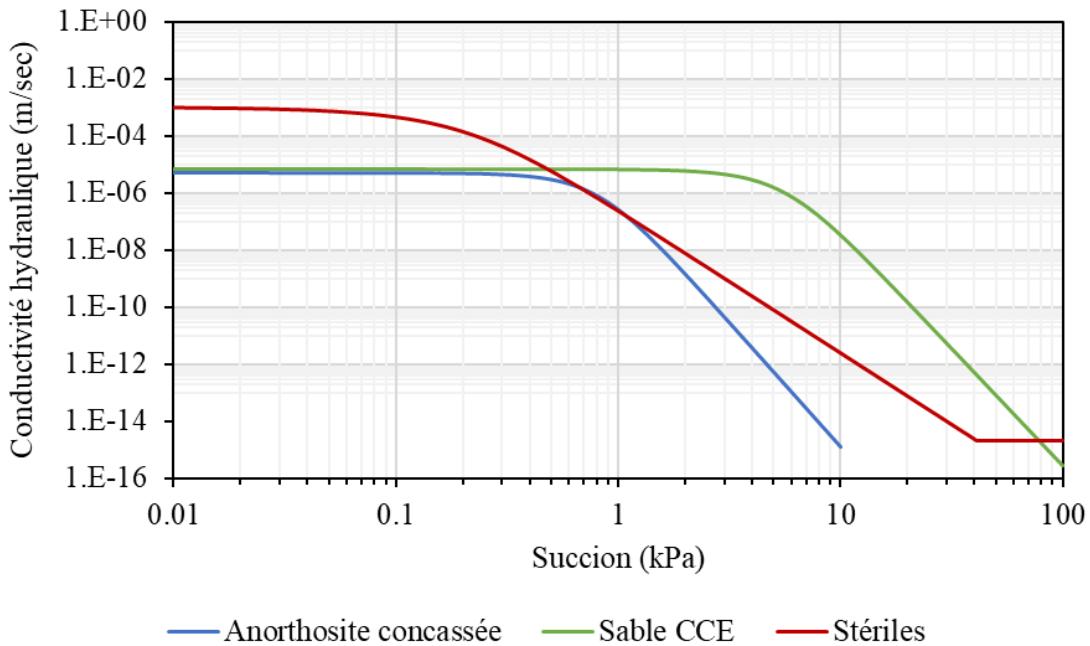


Figure 2.17 Fonctions de conductivité hydraulique des matériaux de la halde expérimentale, tracées à partir de la fonction de Mualem-van Genuchten (voir équation 2,16) (Adapté de Pergoedova, 2012; Bréard Lanoix, 2017; Lévesque, 2015 et cette étude).

2.5.2 Validation numérique

Divers outils numériques permettent de simuler l’écoulement de l’eau en milieux saturé et non-saturé (section 2.2.2) et en particulier dans les haldes à stériles (Aubertin et al., 2002b, 2005; Fala et al., 2003, 2005, 2006, 2011; Molson et al., 2005; Dawood et al. 2011; Broda et al., 2013, 2014; Martin, 2003). Les simulations numériques représentent un moyen d’étudier et de mieux comprendre les phénomènes hydrogéologiques et le rôle de différents paramètres sur l’écoulement (géométrie de la structure, propriétés hydrogéologiques des matériaux et précipitation appliquées).

Plusieurs codes existent pour simuler les écoulements dans les stériles. Par exemple, le code Soilcover (Geo-Analysis 2000 Ltd., 1997) a été utilisé lors de simulations du comportement hydrogéologique dans le cadre des travaux sur le recouvrement d’une aire de lixiviation en tas (Zhan et al., 2000).

Le logiciel HYDRUS (Simunek et al, 2007) permet de simuler l'écoulement de l'eau et de différents produits (en solution) dans un milieu poreux saturé ou non-saturé en 2D ou 3D. Le code intègre la possibilité de simuler des frontières irrégulières et des régions aux propriétés anisotropes (Sejna et al., 2011; Simunek et al, 2007); il peut aussi donner de bons résultats pour les simulations de matériaux hétérogènes (Bufon et al., 2012). Par contre, l'utilisation de la technique de résolution numérique de type *Galerkin FE* peut entraîner une dispersion numérique importante si la discrétisation spatiale est trop grande (Yu et Zheng, 2010; voir aussi Fala 2002).

Le logiciel HYDRUS a été utilisé dans le cadre de plusieurs travaux menés à Polytechnique Montréal (e.g. Fala, 2002, 2008), incluant une étude visant à intégrer les résultats de relevés géophysiques dans une halde à stériles dans une simulation numérique. La figure 2.18 montre un exemple de résultats pour le cas de base, qui illustre le comportement hydrogéologique de la structure interne de la halde à partir de la distribution des TEV (Dawood et al., 2011). Ce logiciel a aussi été utilisé par Dawood et Aubertin (2014) afin d'évaluer l'effet de la présence de couches plus denses sur l'écoulement de l'eau dans une halde à stériles (cas basés sur les haldes de la mine du Lac Tio).

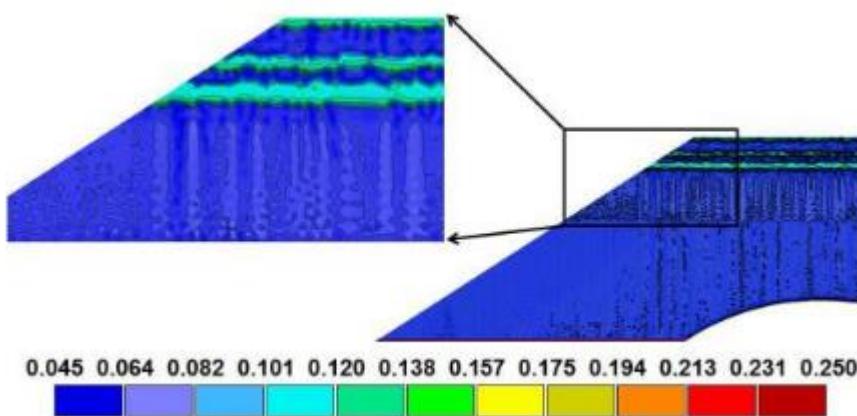


Figure 2.18 Résultats d'une simulation numérique des écoulements avec le logiciel HYDRUS, qui tient compte de la structure interne d'une halde à stériles; les résultats sont présentés en termes de la TEV.

Le logiciel HydroGeoSphere (Aquanty, 2016), anciennement FRAC3D-VS (Therrien et Sudecki, 1996) permet également de simuler les écoulements en condition saturée et non-saturée (2D et 3D). Le logiciel intègre aussi le transport de substances chimiques (réactifs ou non) et de chaleur, l'évapotranspiration, la consommation d'eau par les racines et la simulation de la fonte des neiges (Therrien et al., 2010). Il permet également d'inclure l'effet de fractures dans le milieu (p. ex. Ben Abdelghani et al. 2015). Il a aussi été utilisé pour simuler des écoulements dans des haldes à stériles (Broda et al. 2013, 2014). Ces simulations ont permis d'évaluer l'effet de divers paramètres sur la dynamique d'écoulement dans une halde (c'est-à-dire pente en surface, présence d'une couverture ou de fractures).

Le logiciel SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016) utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les problèmes d'écoulements en 2D dans des matériaux saturés ou non saturés en régime permanent et transitoire (GEO-SLOPE international Ltd., 2016). Les calculs sont basés sur la fonction de Richards (1931; Darcy généralisée avec l'équation de continuité) (section 2.2.2 et 2.2.4). Le logiciel SEEP/W a souvent été utilisé pour simuler les écoulements dans les résidus miniers et les roches stériles (Crespo, 1994; Aubertin et al., 1996, 2009; Bussiere, 1999; Chapuis et al., 2001; Apithy, 2003; Martin, 2003); il a notamment servi dans l'élaboration du concept de couche de contrôle des écoulements (Fala et al. 2003; Martin et al., 2005; Aubertin et al., 2009). Les travaux de Apithy (2003), Martin et al. (2005) et Cifuentes (2006) sur des couvertures de type SDR (sections 2.4 et 2.5) ont notamment montré numériquement l'efficacité de cette méthode. À titre d'exemple, la figure 2.19 montre une coupe 2D d'une halde surmontée d'une couverture de type SDR. Les valeurs de TEV montrées ici indiquent que l'écoulement se fait majoritairement dans la couverture même pour trois périodes de précipitation relativement abondante (chacune de $9,07 \times 10^{-7}$ m/s sur une période de 24 heures).

SEEP/W a été utilisé dans ce projet pour simuler les écoulements dans les stériles et la CCE de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio.

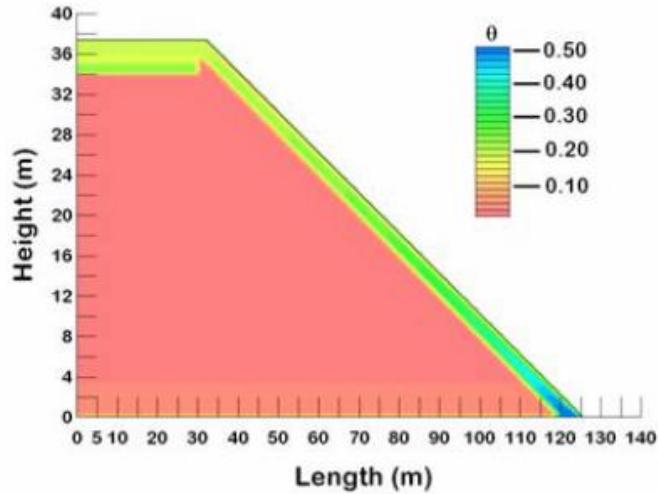


Figure 2.19 Résultat d'une simulation numérique (menée avec SEEP/W) qui illustre l'effet d'une couverture de type SDR, en termes de TEV, après la simulation d'un événement de précipitation d'une durée de 72 heures (Martin et al. 2005).

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Caractérisation complémentaire de la roche stérile concassée

Des échantillons de roches stériles concassées ont été prélevés au sommet de la halde expérimentale de la mine du Lac Tio (section 2.5) durant l'automne 2016, et caractérisés au laboratoire. Il s'agit de roches stériles d'anorthosite (considérés peu ou non-réactives) qui ont été concassés à une taille inférieure à 10 mm. Les courbes granulométriques et de rétention d'eau (essai en colonne) obtenues ont été comparées aux propriétés de la roche stérile d'anorthosite tamisée caractérisée par Lévesque (2015). Les échantillons testés au laboratoire étaient représentatifs (ASTM C-702, 2012) des matériaux prélevés sur le terrain. Ces essais ont servi dans l'élaboration de la simulation numérique représentative du terrain (section 5.1 et suivantes). Les propriétés des autres matériaux de la halde ont été obtenues à partir d'autres sources (Peregoedova 2012; Lévesque, 2015; Bréard Lanoix 2017).

3.1.1 Granulométrie

La granulométrie de la roche stérile concassée a été évaluée selon les normes ASTM D6913/D6913M-17 (ASTM 2017) pour la portion grossière et ASTM D7928-17 (ASTM 2017) pour la portion fine ($< 75 \mu\text{m}$). Les coefficients d'uniformité (C_u) et de courbure (C_c) sont des indices de la dispersion granulométrique d'un matériau; ils ont été estimés de la façon suivante (McCarthy, 2007) :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}} \quad (3.2)$$

Avec :

D_x : Dimension de la taille des grains correspondant à X % cumulé de matériau sur la courbe granulométrique [L]

3.1.2 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau (CRE) de la roche stérile concassée a été évaluée au laboratoire au moyen d'un essai en colonne suivant la méthode décrite par Chapuis et al, (2006) (voir aussi Hernandez, 2007; Peregoedova, 2012). Une colonne de 0,62 m de hauteur et 0,15 m de diamètre a été utilisée. Le rapport entre le diamètre de la colonne et la taille maximale des grains (0,015 m) est de 10 ce qui est à l'intérieur des limites fixées par les normes ASTM D2434-68 (2006) et ASTM D5856 (2015). Le matériau a été placé par couche de 0,05 m avec une teneur en eau massique (w) initiale d'environ 3% et compacté au moyen d'un marteau Proctor modifié. Entre 25 et 30 coups ont été appliqués pour chaque couche afin d'obtenir un matériau uniforme dans toute la colonne. La CRE obtenue a été comparée au modèle prédictif MKs (Peregoedova et al., 2014; décrit dans la section 2.2.3).

3.2 Instrumentation de la halde expérimentale

Des capteurs de teneur en eau volumique, de température, de conductivité électrique et de succion ont été installés dans la CCE, dans les stériles et dans le sable des lysimètres à la base de la halde expérimentale. L'épaisseur théorique des matériaux de la CCE a été utilisée pour analyser les résultats des sondes puisque la profondeur des sondes n'était pas connue précisément. Ces épaisseurs sont respectivement de 0,3 m pour le stérile concassé et de 0,7 m pour le sable. La figure 3.1 détaille le type et la position des sondes. Les capteurs sont installés le long d'un axe vertical à partir du centre de chaque lysimètre. Les sondes de mesure de la teneur en eau volumique, de la température et de la conductivité électrique (GS3; Decagon Devices Inc., 2017a) sont situées au bas de la couche de roches stériles concassées ($z = 0,25$ m), dans le haut ($z = 0,5$ m) et le bas ($z = 0,8$ m) de la couche de sable de la CCE et dans le haut des stériles à 0,1 m et 0,3 m sous l'interface avec le sable. Les sondes de succion (MPS-2; Decagon Devices Inc., 2017b) sont situées de part et d'autre de l'interface entre le sable CCE et les stériles à des profondeurs de 0,9 m et 1,1 m sous la surface de la halde. Deux autres sondes GS3 et deux autres sondes MPS-2 ont été installées de façon décentrée au bas dans chaque lysimètre. Chaque sonde

s'est vu attribuer un nom correspondant au matériau dans lequel elle est installée combiné au numéro du lysimètre au-dessus duquel elle est située (figure 3.2).

Des électrodes (destinées à des investigations géophysiques) et un système de détection de la teneur en eau par fibre optique (DTS) ont aussi été installés dans la halde expérimentale, mais ces mesures ne font pas partie de cette étude (Martin et al., 2017). Les informations à ce sujet sont présentées par Dimech (2018) et Wu et al. (2018).

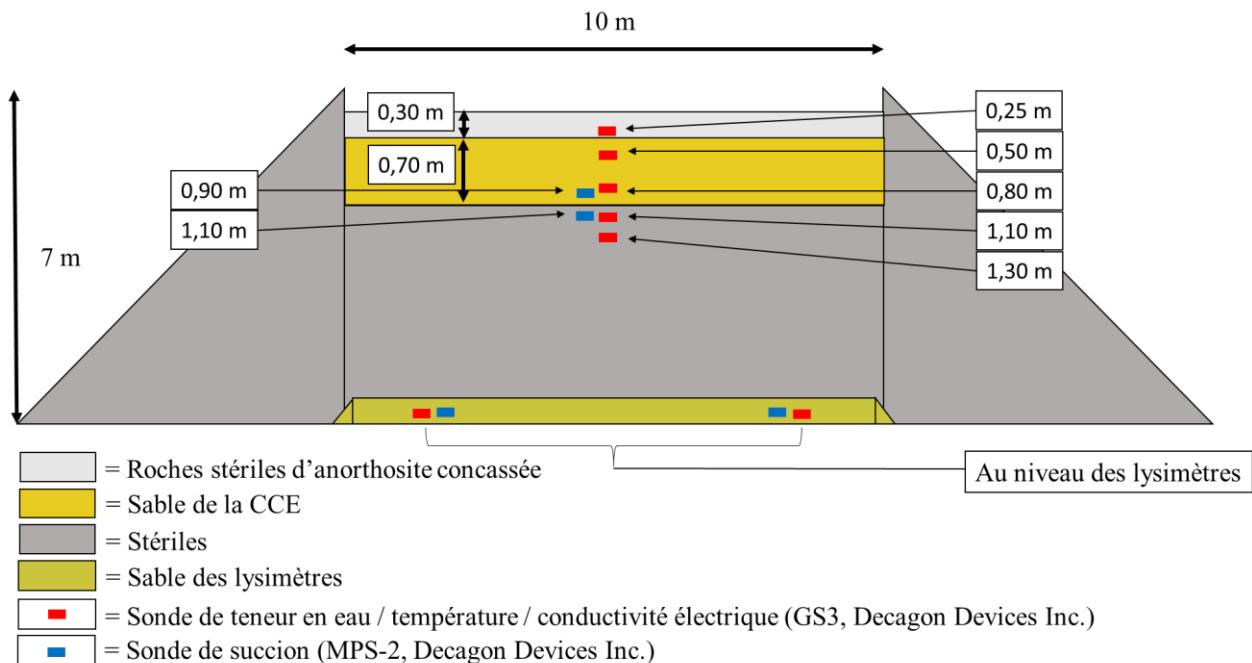


Figure 3.1 Vue en coupe de la halde expérimentale avec la position des sondes GS3 et MPS-2 pour chacun des six lysimètres (pas à l'échelle).

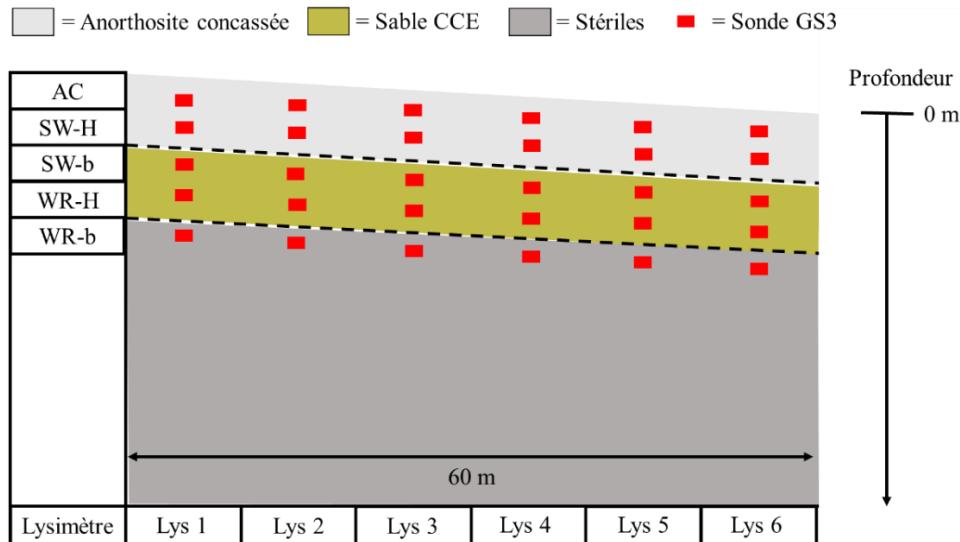


Figure 3.2 Identification des sondes GS3 installées sur la halde expérimentale de la mine du Lac Tio. AC : Roches stériles concassées, SW : sable, WR : stériles, -H : haut de la couche et -b : bas de la couche.

Teneurs en eau volumique

La teneur en eau volumique, la conductivité électrique et la température dans la CCE (sable et stériles d'anorthosite concassée), dans les stériles et dans les lysimètres ont été mesurées au moyen de sonde GS3 (Decagon Devices Inc., 2017a). La fréquence des mesures variait de 1 à 15 minutes durant les essais d'infiltration à grande échelle et de 1 à 4 heures le reste de l'année. Les teneurs en eau ont été suivies de novembre 2015 à septembre 2017. Une relation entre la permittivité diélectrique du milieu et la TEV a été établie par Topp et al. (1980). La précision des mesures de TEV est de l'ordre de $\pm 0,03$ et celle des mesures de température de $\pm 1^\circ\text{C}$ (Decagon Devices Inc., 2017a). La précision des mesures peut être affectée par plusieurs facteurs comme la quantité d'argile et de matière organique, la minéralogie, la porosité, le poids volumique ou le contenu en sels solubles (Bouksila et al, 2008). Une calibration spécifique des sondes pour chaque matériau étudié est donc généralement recommandée (Decagon Devices Inc., 2017a). La calibration des sondes au laboratoire (selon la méthode proposée par le fabricant; Annexe A) réalisée dans le cadre de ce projet n'a cependant pas été jugée satisfaisante pour les mesures *in situ*, et une calibration de terrain (lorsque applicable) a donc été préférée.

Les résultats de mesure des sondes de TEV installées dans la couche de sable de la halde expérimentale ont été comparés aux mesures réalisées à proximité et aux mêmes moments avec un nucléodensimètre (Bréard Lanoix, 2017). Cette dernière méthode utilise la radioactivité (bombardements de neutrons) pour mesurer la teneur en eau massique et la porosité du matériau (ASTM 6938, 2017). Le nucléodensimètre est considéré parmi les techniques les plus précises pour mesurer la teneur en eau *in situ* (Susha Lekshmi et al., 2014). Les résultats obtenus avec le nucléodensimètre ont également été validés par des mesures directes de teneur en eau avec la technique du cône de sable (ASTM 1556/1556M, 2015) (Annexe B) et à l'aide d'autres approches directes et indirectes (mesures à l'anneau, sondes TDR (Soilmoisture Equipment Corp., Soilmoisture equipment, 1996), 5TM et EC5 (Metergroup, Meter Environment 2017)). La figure 3.3 montre l'écart entre les valeurs obtenues avec les sondes GS3 et celles obtenues par le nucléodensimètre. Les deux lignes pointillées représentent la marge d'erreur usuelle des sondes de TEV ($\pm 0,03$; Decagon Devices Inc., Decagon GS3 manual, 2017a). L'écart entre la tendance des valeurs de TEV des sondes et celle du nucléodensimètre était de 0,16. Cette valeur a donc été soustraite des TEV mesurées dans la couche de sable pour obtenir des valeurs corrigées (calibration de terrain; figure 3.3).

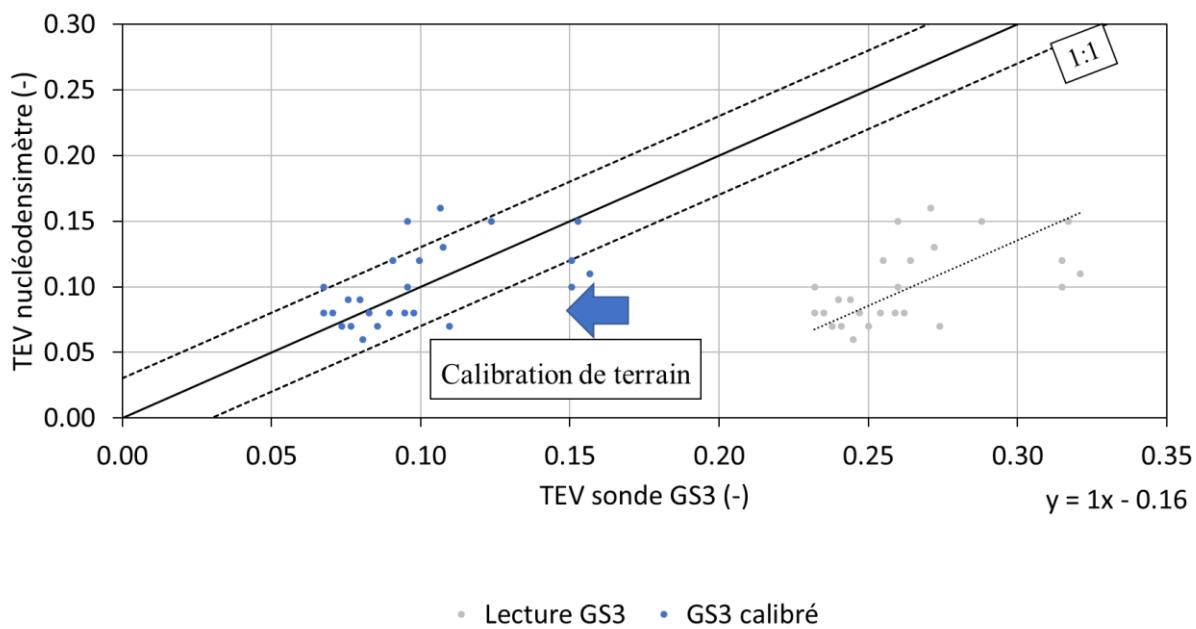


Figure 3.3 Calibration de terrain des sondes GS3 dans le sable de la CCE.

L'effet de la calibration sur la mesure des TEV dans la CCE est illustré à la figure 3.4 pour les TEV moyenne dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde) entre les mois de novembre 2015 et de juin 2016. Les TEV calibrées tendent vers 0 durant les mois d'hiver (janvier à mai), ce qui correspond bien aux valeurs attendues de teneur en eau non gelée pendant l'hiver (Température moyenne = -5°C).

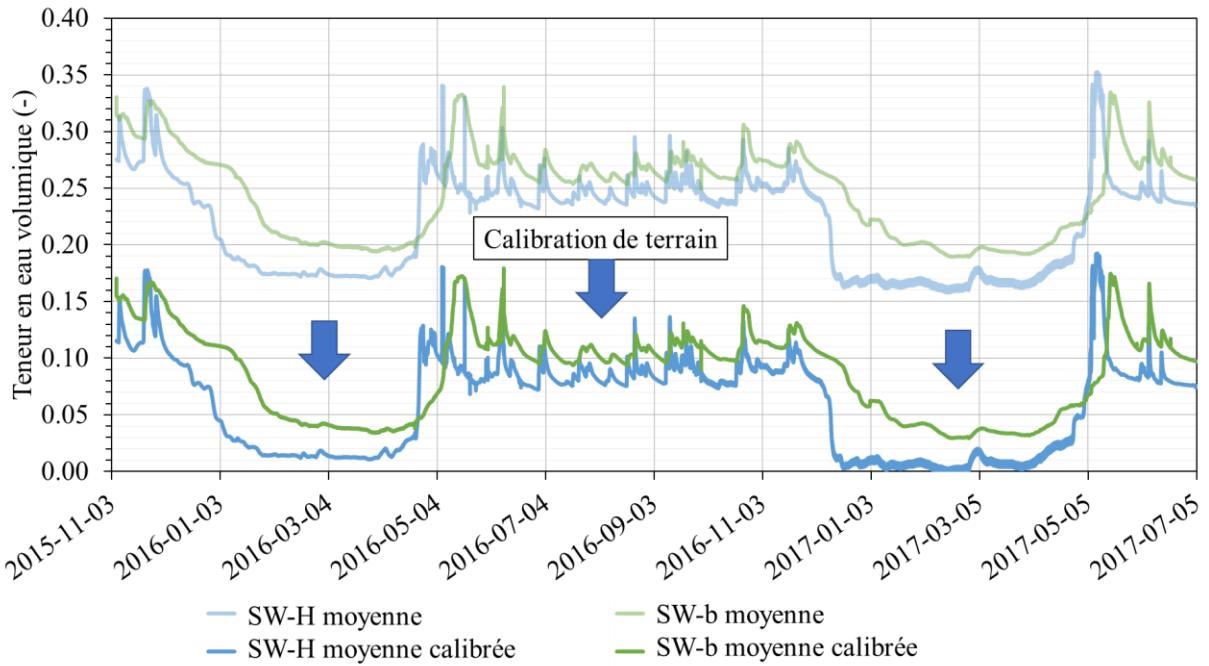


Figure 3.4 Valeurs de TEV mesurées et calibrées dans le haut (SW-H) et le bas (SW-b) de la couche de sable de la CCE entre novembre 2015 et juillet 2017.

La méthode de calibration utilisée pour le sable de la CCE n'a cependant pas pu être utilisée pour la roche stérile concassée ou les stériles puisqu'aucune mesure au nucléodensimètre n'a pu être réalisée pour corriger les résultats des sondes GS3. Les mesures dans ces matériaux ont donc été utilisées sans calibration. Les résultats obtenus sont donc généralement supérieurs aux TEV attendues. Une calibration a été faite au laboratoire mais les résultats de cette calibration n'ont pas pu être appliqués aux données des sondes (Annexe A).

Mesure des débits

Les débits à la sortie de chaque lysimètre ont été enregistrés avec des débitmètres à auget pour lesquels chaque basculement correspondait à une valeur de 1 L. Le dispositif était relié à un module d'enregistrement qui permettait de mesurer les débits de sortie de façon continue. Ces instruments étaient installés chaque printemps et retirés l'automne. Des mesures manuelles des débits ont également été réalisées aux mois de juin, septembre et octobre 2017 au moyen d'un cylindre gradué, une à trois fois par jours, pour des volumes de l'ordre de 50 mL à 1700 mL.

Mesure des succions

Les succions ont été mesurées *in situ* en continu au moyen de capteurs MPS-2 (Decagon Devices Inc., 2017b) (figure 3.1). La fréquence des enregistrements était les mêmes que pour les sondes de TEV (GS3). Ce type de sonde couvre une gamme de succion comprise entre 9 kPa et 100 000 kPa. La précision des mesures est de l'ordre $\pm (2 \text{ kPa} + 25\% \text{ de la mesure})$ (Decagon Devices Inc, 2017b).

3.3 Essais de terrain

Des essais d'infiltration à petite et à grande échelle ont été réalisés à la surface de la CCE. Les essais à petite échelle ont été réalisés sur la roche stérile concassée (CCE) à plusieurs endroits au sommet de la halde expérimentale pour une bonne représentativité des propriétés du matériau en place. L'essai avec infiltromètre à simple anneau a été réalisé directement à la surface de la halde expérimentale sur la couche de roches stériles concassées; les essais au perméamètre de Guelph ont été réalisés dans un trou de tarière (~12 cm de profondeur). La procédure détaillée des essais est décrite ci-dessous (Bréard Lanoix, 2017). Le tableau 3.1 résume les caractéristiques des essais d'infiltrations réalisés à la surface de la couche de roches stériles concassées.

Tableau 3.1 Caractéristiques des essais d'infiltration réalisés à la surface de la halde expérimentale, dans la couche de roches stériles concassées.

# de l'essai	Date	Type d'essai (perméamètre)	Emplacement	Durée (heure)	Charge (cm)
1	2016-09-26	Guelph	Lys. 6	1,0	5
2	2016-09-28	Guelph	Lys. 4	1,3	5
3	2016-09-28	Simple anneau	Lys. 5	3,8	6.8
4	2017-06-19	Guelph	Lys. 4	1,5	4

3.3.1 Essais d'infiltration à moyenne échelle

3.3.1.1 Infiltromètre à simple anneau

La conductivité hydraulique (à satiété) de la roche stérile concassée a été estimée au moyen d'un essai d'infiltration avec infiltromètre à simple anneau (figure 3.5). L'anneau métallique a été enfoncé à l'aide d'une masse sur une profondeur d'environ 0,05 m. De la bentonite a été placée sur le pourtour extérieur de l'anneau afin de limiter les fuites. Une charge d'eau constante d'environ 6,8 cm a été appliquée à la surface dans l'anneau au moyen d'une cellule de Mariotte. Le taux d'infiltration a été mesuré pendant 3,8 heures. Un taux d'infiltration constant d'environ $0,04 \text{ mL/s}$ ($1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$), a été atteint après environ 15 minutes.



Figure 3.5 Essai d'infiltration avec la méthode du simple anneau ($r=0,3$ m).

L'équation de Reynolds et Elrick (2005) a été utilisée pour estimer la conductivité hydraulique à satiété *in situ* (k_{fs}).

$$K_{fs} = \frac{q_s}{\left[\frac{H}{(C_1 d + C_2 a)} \right] + \{1/[\alpha^*(C_1 d + C_2 a)]\} + 1} \quad (3.3)$$

Où :

k_{fs} : conductivité hydraulique à satiété de terrain [LT^{-1}]

q_s : taux d'infiltration [LT^{-1}]

H : charge appliquée [L]

d : profondeur de l'enfoncement de l'anneau [L]

a : rayon de l'anneau [L]

C_1 et C_2 : paramètres quasi empiriques liés à la profondeur de l'anneau dans le matériau et à la charge appliquée dans l'anneau ($C_1 = 0,316\pi$ et $C_2 = 0,184\pi$)

α^* : paramètre du matériau relié à la sorption qui représente les propriétés capillaires du sol (Philip, 1985) ($\alpha^* = 36$; Reynolds et Elrick, 2005) [L^{-1}]

3.3.1.2 Perméamètre de Guelph

Trois essais d'infiltration ont été réalisés avec le perméamètre de Guelph (Soil moisture equipment Corp. modèle 2800) à la surface de la halde expérimentale (roches stériles concassées). La charge appliquée dans les trous de tarière (entre 10 et 13 cm de profondeur) était comprise entre 4 cm et 5 cm (dans le bas du trou). L'équation proposée par Elrick et Reynolds (1992) a été utilisée pour évaluer la conductivité hydraulique à satiété (k_{fs}) à partir du taux d'infiltration mesuré (à l'équilibre) dans la roche stérile concassée. L'équation peut s'écrire comme suit (Reynold et al., 1992):

$$k_{fs} = \frac{i_s}{1 + \frac{H\lambda_c}{G\pi r^2} + \frac{H^2}{G\pi r^2}} \quad (3.4)$$

Avec :

$$G = \frac{1}{2\pi} \left[A_1 + A_2 \frac{H}{r} + A_3 \left(\frac{H}{r} \right)^2 + A_4 \left(\frac{H}{r} \right)^3 \right] \quad (3.5)$$

Où :

k_{fs} : conductivité hydraulique à satiété de terrain [LT^{-1}]

i_s : taux d'infiltration [LT^{-1}]

H : charge appliquée [L]

r : rayon du trou de tarière [L]

λ_c : longueur capillaire estimée selon la texture et la structure du sol [L]

A_1, A_2, A_3 et A_4 : Paramètres en fonction du type de matériau (dans ce cas : $A_1=0,079$, $A_2 =0,516$, $A_3 =-0,048$ et $A_4 =0,002$; pour les autres paramètres, voir Reynold et al., 1992)

3.3.2 Essais d'infiltration à grande échelle

Un camion-citerne a été utilisé afin de réaliser des essais d'infiltration à grande échelle à la surface de la halde expérimentale (figure 3.6). L'arrosage s'effectuait à l'arrière du camion au

moyen de deux jets qui couvraient chacun 180°. La combinaison de ces deux jets couvrait la totalité de la surface de la halde (et plus que la largeur). Le contrôle des passages du camion a permis de maximiser l'infiltration de l'eau dans la CCE tout en minimisant le ruissellement. Chaque passage de camion était suivi par une inspection visuelle de la surface de la halde; le passage suivant n'était permis que lorsque l'eau du passage précédent s'était complètement infiltrée. Les temps de passage ont été enregistrés pendant tous les essais et ont permis d'établir le taux d'infiltration limite (avant le développement du ruissellement) à la surface de la halde (figure 3.7).



Figure 3.6 Camion-citerne utilisé pour les tests d'infiltration à grande échelle (crédit: Macallister Machinery) et photo du camion effectuant un passage d'un essai d'infiltration à grande échelle (crédit : IRME).

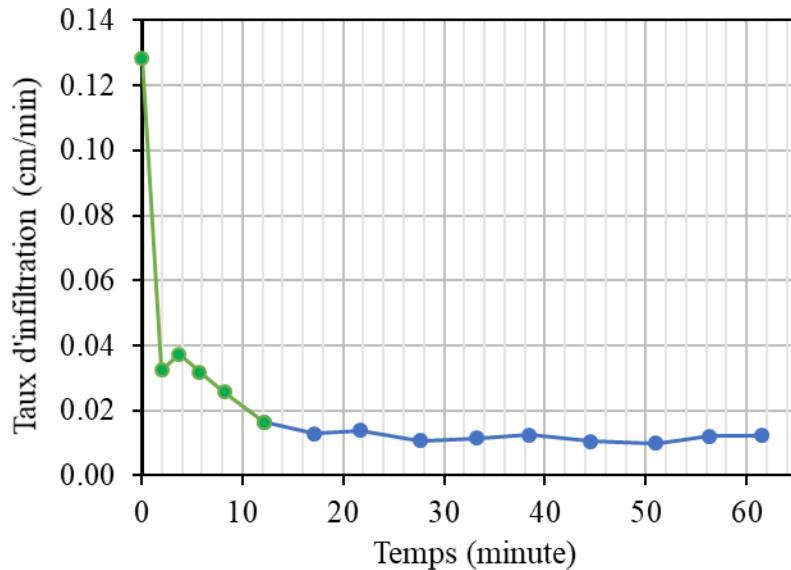


Figure 3.7 Taux d'infiltration maximum au sommet de la halde. Le début de la courbe en vert représente le temps d'atteinte de l'équilibre et la partie en bleu le taux d'infiltration limite. Cette figure est tirée des temps de passage durant l'essai I-B.

Deux configurations d'arrosage ont été utilisées lors des essais d'infiltration à grande échelle (figure 3.8; tableau 3.2). La première technique (A) consistait à délimiter un seul corridor d'arrosage à la surface de la halde. Cette configuration donnait plus d'espace pour manœuvrer l'équipement et elle permettait une distribution relativement homogène de la quantité d'eau sur l'ensemble de la halde. Par contre, elle favorisait le ruissellement dans les ornières laissées par les passages répétés du camion. La deuxième configuration (B) consistait à diviser la halde en deux rangés dans le sens de la longueur. Un passage du camion-citerne correspondait à l'arrosage des deux rangées. Le camion arrosait d'abord la rangée A (en marche avant) puis il reculait sans arroser dans la rangée B avant d'arroser celle-ci en marche avant. Le camion revenait ensuite se replacer en marche arrière dans la rangée A en attendant le signal de départ d'un autre passage (figure 3.8). Cette méthode avait l'avantage de bien couvrir d'eau l'ensemble de la surface de la halde. Par contre, elle occasionnait aussi une plus grande disparité entre la quantité d'eau appliquée au centre de la halde par rapport aux côtés et provoquait un ruissellement plus marqué que la technique (A) et elle occasionnait aussi de la confusion chez l'opérateur lors de l'arrosage.

Des chaudières (18,9 L) étaient disposées de chaque côté des corridors d'arrosage (figure 3.8) pendant chaque essai. Le rapport entre la surface occupée par les chaudières et la surface totale de la halde était d'environ 0,2%. La quantité d'eau contenue dans chaque chaudière a été mesurée avec un cylindre gradué à la fin de chaque phase d'arrosage et additionnées afin d'estimer la quantité d'eau appliquée à la surface de la halde. On a fait l'hypothèse ici que chaque passage de camion (lors d'un même essai) correspondait au même volume d'eau. Les cinq essais ont été réalisés avec un vent dominant de direction est-ouest qui a entraîné un arrosage plus important de la partie ouest de la halde expérimentale (plus de détails sections 4.3.1 et 4.3.2).

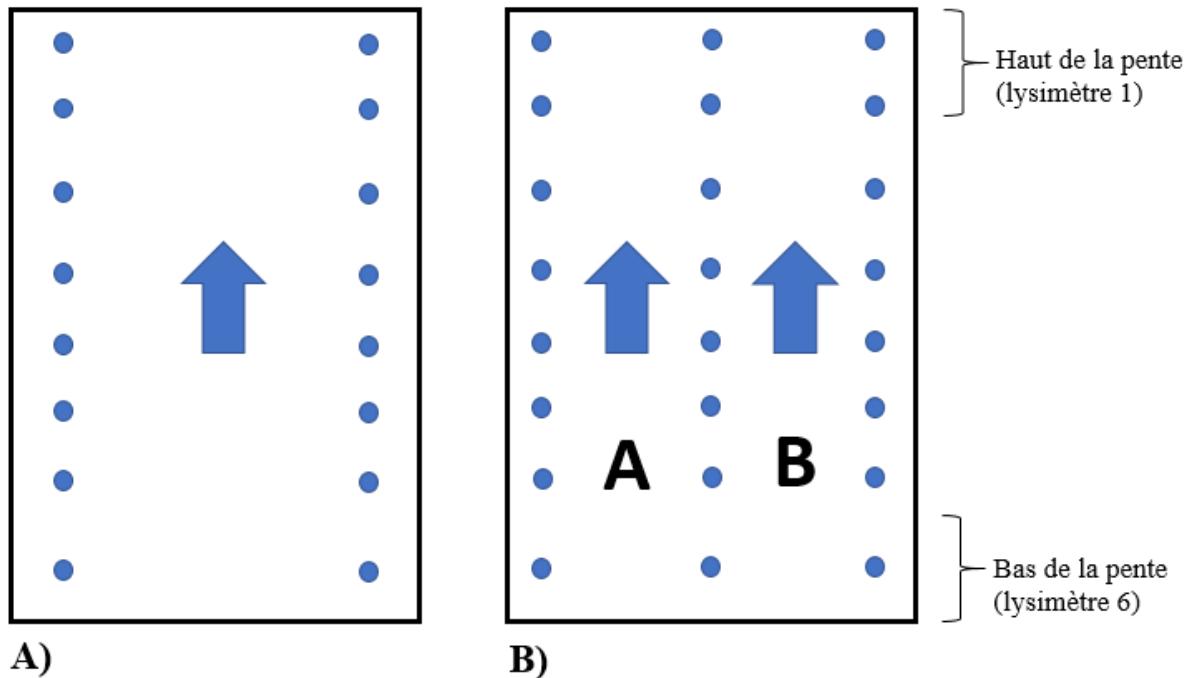


Figure 3.8 Configurations utilisées pour les essais d'infiltration à grande échelle A) une rangée B) deux rangées. Les points bleus indiquent l'emplacement des chaudières disposées le long des corridors d'arrosage.

Au total, 5 essais d'infiltration à grande échelle ont été réalisés sur la halde expérimentale en 2016 et 2017 (tableau 3.2).

- L'essai I-A (23 septembre 2016) a totalisé 8,6 m³ et a nécessité 24 passages (pour chacune des deux rangées) sur un total de 90 minutes. Durant cet essai, le ciel était nuageux et il n'y a eu aucune précipitation.
- Le deuxième essai (I-B) (27 septembre 2016) a été réalisé en 62 minutes pour un total de 6,4 m³ en 15 passages. Durant cet essai, le ciel était dégagé et il n'y a eu aucune précipitation.
- Le troisième essai (I-C) (7 juin 2017) est le plus long des 5 essais avec 334 minutes. C'est aussi l'essai de plus grand volume avec 28 m³ d'eau appliqués en 96 passages. Durant cet essai, le ciel était nuageux et il n'y a eu aucune précipitation.
- L'essai I-D (14 juin 2017) a duré 304 minutes et a nécessité 50 passages pour un total de 16,8 m³. Durant cet essai, le ciel était dégagé et il n'y a eu aucune précipitation.
- Durant le dernier essai (I-E) (19 septembre 2017), un total de 12 m³ d'eau a été appliqué sur la halde durant 120 minutes. La météo était variable avec de faibles précipitations. L'essai d'infiltration à grande échelle I-E a été réalisé 4 jours après le retrait d'une toile (15 septembre 2017) de faible perméabilité couvrant le dessus de la CCE (figure 3.9). Cette toile installée le 16 juin 2017 avait comme objectif de limiter l'infiltration d'eau dans la CCE durant l'été 2017.

Tableau 3.2 Caractéristiques des essais d'infiltration à grande échelle

Essai	Date	Configuration	Durée totale de l'essai (sans les pauses)	Volume total d'eau appliqué (m ³)	Équivalent en mm
I-A	2016-09-23	2 rangées	90 min	8,6	14
I-B	2016-09-27	1 rangée	62 min	6,4	11
I-C	2017-06-07	1 rangée	334 min (5,6 heures)	28	47
I-D	2017-06-14	1 rangée	304 min (5,1 heures)	16,8	28
I-E	2017-09-19	1 rangée	120 min (2 heures)	12	20

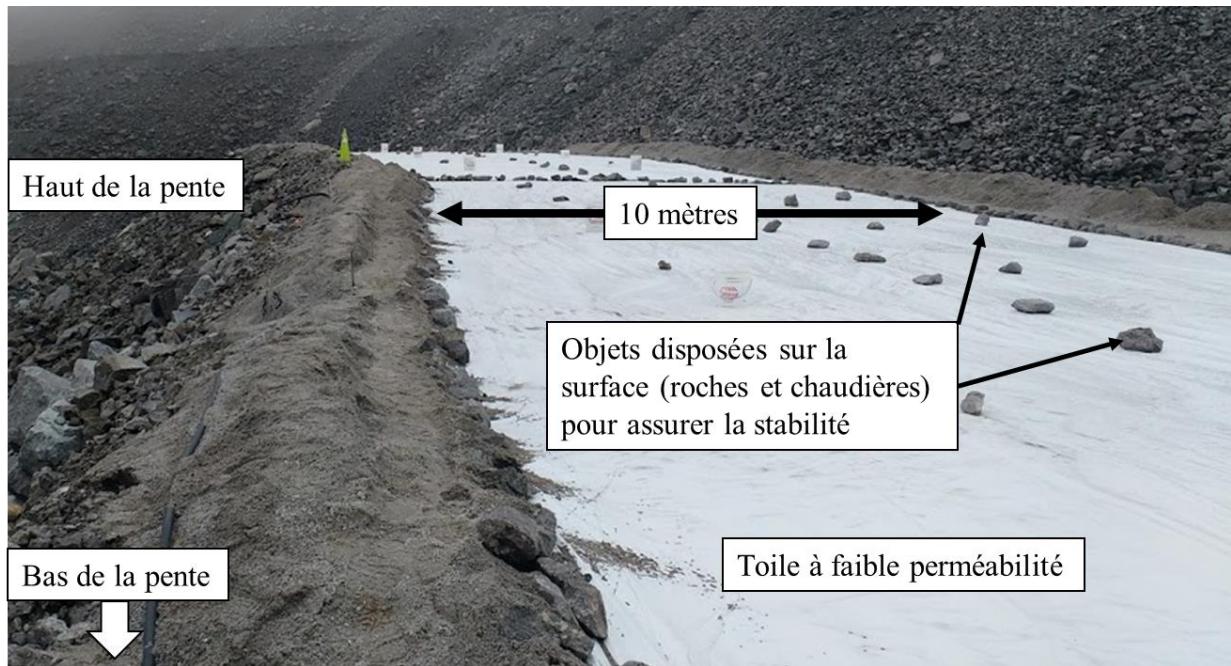


Figure 3.9 Photo de l'installation de la toile plastique de faible perméabilité sur la CCE du 16 juin 2017 au 15 septembre 2017.

3.3.3 Précipitations

Les précipitations, la température, l'humidité relative moyenne et les rafales maximales sont enregistrées par une station météo située sur le site de la mine du Lac Tio. Ces données sont disponibles pour la période du mois de janvier 2015 au mois de juillet 2017 avec des interruptions du 2 novembre 2016 au 2 avril 2017 et du 26 avril 2017 au 23 mai 2017. Les températures sont enregistrées toutes les 60 minutes, celles de l'humidité relative moyenne et du vent toutes les 30 minutes et les précipitations chaque minute. L'enregistrement des données météorologiques a permis d'identifier deux événements susceptibles de contribuer à l'étude du comportement hydrogéologique de la halde en juin 2016 et en août 2016. Les événements retenus avaient les caractéristiques suivantes dans le but de faciliter la cueillette et l'analyse des résultats :

- i. Total des précipitations supérieures à 25 mm sur une période maximale de 4 jours pour que l'instrumentation puisse enregistrer un contraste.

- ii. La période de précipitation devait être précédée et suivie d'une période sans précipitations d'un minimum de 5 jours pour mieux isoler les résultats attribuables à la période de précipitation étudiée.
- iii. Les critères d'infiltration maximum (observés lors de l'essai à grande échelle I-B; figure 3.7) devaient être respectés dans le but de minimiser le ruissellement.

Les TEV enregistrées automatiquement par l'équipement en place (GS3) ont ensuite été isolées pour les périodes sélectionnées. Le tableau 3.3 résume les caractéristiques des événements de précipitations retenus pour analyse.

Tableau 3.3 Caractéristiques des événements de précipitation retenus pour l'analyse du comportement de la CCE de la halde à stérile expérimentale.

Identification	Date du début	Durée de la période de précipitation	Quantité totale de précipitation (mm)
P 1	2016-06-06	72 heures	53
P 2	2016-08-07	72 heures	25

Deux événements d'intensités et de durées différentes ont été retenus (tableau 3.3).

- Le premier événement (1) (6 juin 2016 au 9 juin 2016) est le plus intense avec 53 mm de précipitation en 72 heures. Cette précipitation est équivalente à un volume $31,8 \text{ m}^3$ sur la surface de la halde expérimentale (600 m^2).
- La deuxième précipitation (2) (7 aout 2016 au 10 aout 2016) retenue est plus faible avec 25 mm de pluie sur une période de trois jours. Cette précipitation est équivalente à 15 m^3 sur la surface de la halde expérimentale.

3.4 Analyses numériques

Les essais d'infiltration à grande échelle (section 3.3.2) et les événements de précipitation sélectionnés (section 3.3.3) ont été utilisés pour évaluer, valider et éventuellement calibrer le modèle hydrogéologique numérique de la halde expérimentale. Des analyses paramétriques ont

ensuite été réalisées sur le modèle calibré afin d'évaluer l'effet de différentes caractéristiques sur le comportement hydrogéologique de la halde et de la CCE (pente et épaisseur de la CCE, propriétés hydrogéologiques des matériaux de la CCE et des stériles et volume et intensité des précipitations). Toutes les analyses numériques ont été réalisées en deux dimensions avec le code SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016; section 2.5.2).

3.4.1 Géométrie et conditions frontières du modèle de base

Les dimensions du modèle numérique sont basées sur les dimensions réelles de la halde expérimentale (section 2.5). Le modèle numérique fait 7 m de haut (à son maximum) et 60 m de long. Les stériles ont une hauteur maximale de 6,25 m et minimale 3,16 m. La CCE est représentée par une couche de sable de 0,6 m d'épaisseur surmontée d'une couche de roches stériles d'anorthosite concassée de 0,25 m. Les propriétés des matériaux simulés sont présentées en détail à la section 5.1.2. La CCE est inclinée de 5 % vers le pied de la halde. Un matériau fictif (très perméable) de 0,5 m de largeur et 4 m de hauteur a été ajouté à la droite du modèle de la halde afin de permettre l'écoulement latéral de l'eau déviée et éviter les effets de bords (figure 3.10). Les propriétés des stériles d'ilménite et d'anorthosite ont été supposées similaires dans les simulations (voir aussi section 3.4).

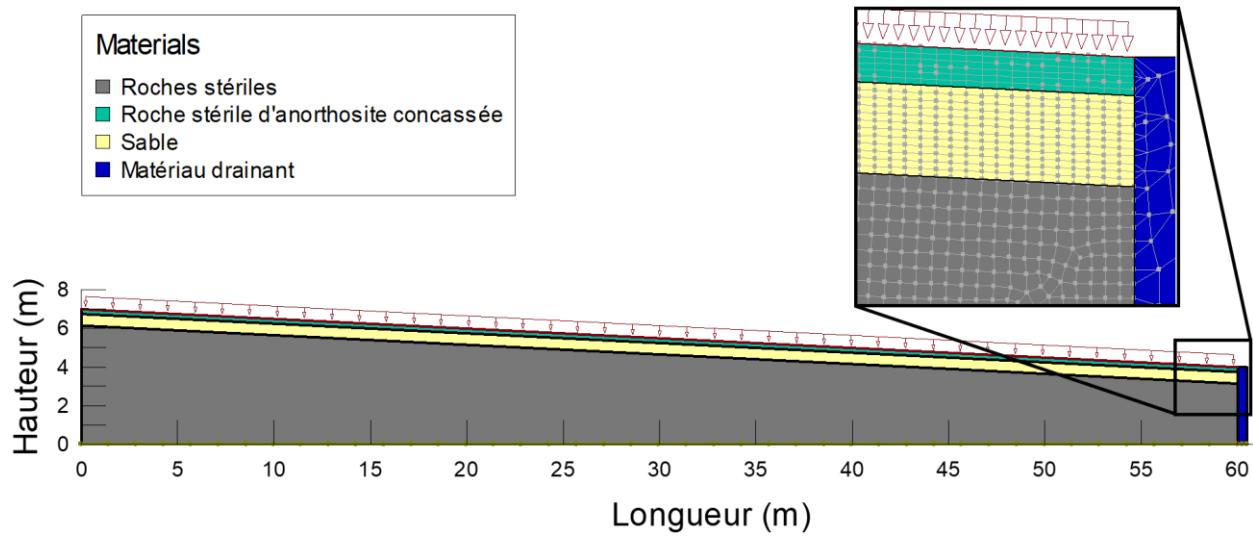


Figure 3.10 Modèle numérique de la halde expérimentale. Le plan rapproché montre la taille et la forme du maillage dans l'ensemble des matériaux.

Une nappe phréatique constante ($h=0$ m) a été simulée à la base du modèle ($z = 0$ m). Une précipitation de 10^{-9} m/s (soit environ 0,09 mm/jour) en régime permanent a été imposée au sommet du modèle afin de représenter les conditions de succion et de teneur en eau initiale dans les stériles. Cela permet aussi une meilleure convergence des calculs en régime transitoire. Les frontières latérales sont considérées imperméables ($x=0$ m et $x=60,5$ m). La taille du maillage est d'environ 10 cm de largeur et 10 cm de hauteur dans les stériles (de forme carrée) et 10 cm de largeur et 5 cm de hauteur dans la CCE (de forme rectangulaire dans la roche stérile concassée et le sable). Le maillage dans le matériau fictif au pied de la halde est plus grossier (> 5 cm).

3.4.2 Simulation des essais d'infiltration et des événements de précipitation

Les débits unitaires appliqués au sommet des modèles reflètent le volume d'eau total estimé durant les essais. Le volume total a été réparti en fonction du nombre de phases de l'essai. L'infiltration a aussi été ajustée en fonction du nombre de passages (section 3.3.2). Les précipitations enregistrées entre le 30 juin 2016 et le 7 septembre 2016 ont été appliquées au modèle numérique calibré pour fins de validation. La moyenne journalière des précipitations a été

retenue pour la simulation numérique puisqu'elle offre un bon compromis entre la précision obtenue et la vitesse de calcul du modèle numérique.

SEEP/W (2016) ne permet pas de simuler l'évaporation et elle a donc été négligée dans les modèles. Cette simplification a été jugée acceptable, car des observations visuelles sur le terrain ont montré que la couche de roches stériles concassées favorise une infiltration gravitaire et constituait une barrière efficace à l'évaporation. La figure 3.11 montre un profil vertical dans la roche stérile concassée à la suite d'une période de 8 jours pendant laquelle les précipitations ont été minimes. Les 6 premiers centimètres sont plutôt secs alors que le reste de la couche a conservé une certaine humidité (non mesurée) qui a entraîné une coloration plus foncée du matériau.

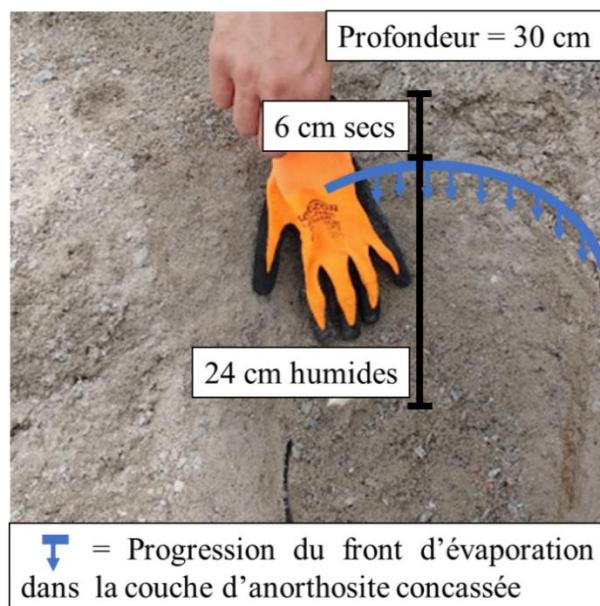


Figure 3.11 Progression du front d'évaporation dans la couche de roches stériles concassées après une période de 8 jours plutôt sèche (< 2 mm de précipitation totale).

CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉIMENTAUX

4.1 Caractérisation complémentaire de la roche stérile concassée

La roche stérile d'anorthosite concassée, qui constitue la partie supérieure de la couche de contrôle des écoulements (section 2.5), a été échantillonnée sur la halde expérimentale et caractérisée au laboratoire. Les résultats ont été comparés aux propriétés de la roche stérile d'anorthosite tamisée caractérisée par Lévesque (2015). Les propriétés des autres matériaux de la halde expérimentale ont été caractérisées lors de travaux antérieurs (section 2.5.1).

L'analyse granulométrique de la roche stérile concassée (figure 4.1 et tableau 4.1) indique qu'il correspond à un sable bien classé avec un peu de silt et du gravier (SW-SM) (USCS - ASTM D2487, 2011). Les valeurs de D_{10} et D_{60} sont respectivement de 0,13 mm et 3 mm. Le coefficient d'uniformité (C_U) et le coefficient de courbure (C_C) sont respectivement de 23,1 et 1,26. Le matériau contient une faible quantité (environ 5%) de particules fines ($< 75 \mu\text{m}$). Ces résultats sont très similaires (moins de 5% de différence) à ceux obtenus par Lévesque (2015) sur la roche stérile d'anorthosite tamisée.

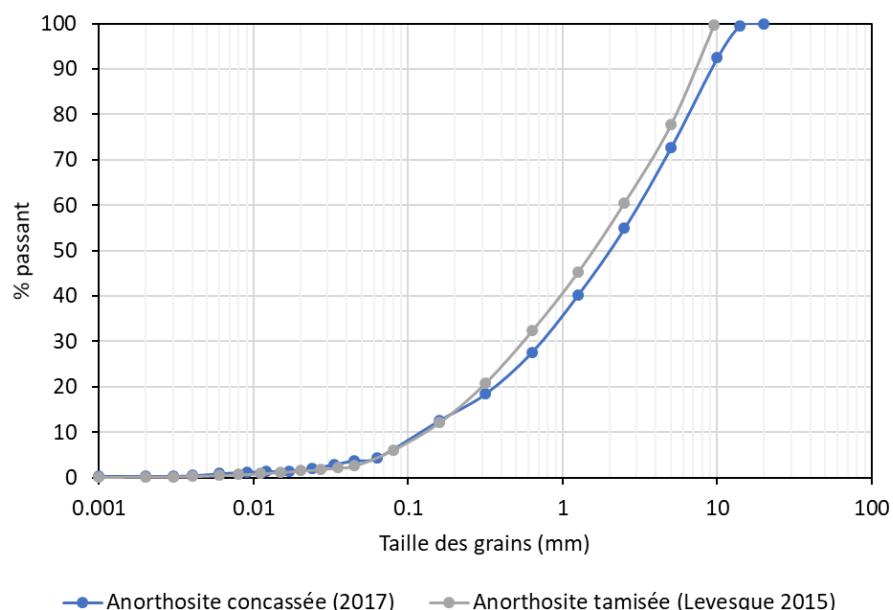


Figure 4.1 Courbes granulométriques de la roche stérile d'anorthosite concassée (cette étude) et de la roche stérile d'anorthosite tamisée (Lévesque, 2015).

Tableau 4.1 Caractéristiques granulométrique de l'échantillon de roche stérile concassée (cette étude) et tamisée (Lévesque, 2015). (C_U : coefficient d'uniformité, C_C : coefficient de courbure et D_x : diamètre correspondant à x% passant).

Matériaux	D_5 (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_U (-)	C_C (-)	$<75 \mu\text{m}$ (#200) (%)
Anorth. concassée	0,075	0,13	0,7	3	23,1	1,26	5
Anorth. tamisée	0,06	0,13	0,55	2,5	19,2	0,93	5

Un essai en colonne (section 3.1.2) a été réalisé afin d'évaluer la courbe de rétention d'eau de la roche stérile concassée. Les résultats de cet essai ont été lissés au moyen du modèle van Genuchten (1980) (équation 2.5 et tableau 4.2) et comparés avec la courbe prédite avec le modèle MKs (Peregoedova et al., 2014; voir aussi section 2.2.2) et avec les résultats obtenus par Lévesque (2015) pour des roches stériles d'anorthosite tamisée (figure 4.2). L'AEV déduit des mesures sur la roche stérile d'anorthosite concassée est d'environ 5,5 cm et la succion résiduelle est autour de 20 cm pour une teneur en eau résiduelle de l'ordre de 0,08. La courbe de rétention d'eau de la roche stérile concassée est assez bien prédite par le modèle MKs (section 2.2.3) (Peregoedova et al. 2014) et elle est relativement similaire à la courbe obtenue par Lévesque (2015) pour le stérile d'anorthosite tamisée. Le modèle MKs surestime légèrement l'AEV (environ 10 cm). La teneur en eau résiduelle prédite est environ deux fois inférieure à celle mesurée. Ces différences restent cependant limitées (compte tenu des imprécisions des mesures et des faibles valeurs impliquées).

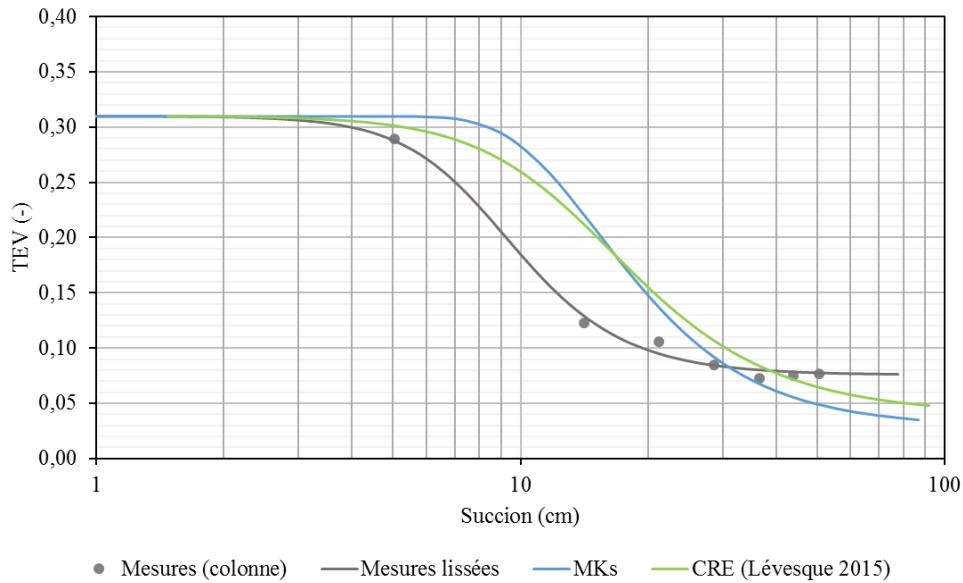


Figure 4.2 Courbes de rétention d'eau de la roche stérile concassée, mesurée (points = essai en colonne) lissée avec van Genuchten (1980) et estimée avec le modèle MKs (Peregoedova et al. 2014) et comparée à la CRE de l'anorthosite tamisée (Lévesque, 2015).

Tableau 4.2 Paramètres de lissage obtenus à partir des valeurs mesurées pour l'équation de van Genuchten, (1980).

Paramètre de lissage	Roches stériles concassées
$\theta_s = n$	0,31
θ_r	0,076
a_{vG}	0,118
n_{vG}	3,70

4.2 Essais d'infiltration à petite échelle

Quatre essais d'infiltration à petite échelle ont été réalisés sur la couche de roches stériles concassées, à la surface de la halde à stériles expérimentale; trois essais ont été menés avec le perméamètre de Guelph (section 3.3.1.2) et un avec l'infiltromètre à simple anneau (60 cm de diamètre, section 3.3.1.1). Les essais au perméamètre de Guelph ont été réalisés au-dessus des lysimètres 4 et 6 et l'essai avec l'infiltromètre à simple anneau au-dessus du lysimètre 5. La figure 4.3 montre un exemple de résultats pour un essai d'infiltration au perméamètre de Guelph (essai 4) réalisé au-dessus du lysimètre 4 (19 septembre 2017). Les résultats des autres essais suivent les mêmes tendances avec des charges différentes et sont présentés à l'Annexe C.

Le taux d'infiltration mesuré pendant les essais d'infiltration a commencé à se stabiliser après une dizaine de minutes. Il est ensuite resté quasiment constant jusqu'à la fin de l'essai 4 (durée totale : 45 minutes). Le taux d'infiltration moyen (après la stabilisation) durant cet essai était de 0,021 cm/minute pour une charge hydraulique constante de 4 cm. Le tableau 4.3 résume les caractéristiques et les résultats des autres essais d'infiltration au perméamètre de Guelph. Les taux d'infiltration mesurés variaient entre 0,021 et 0,034 cm/min pour des charges comprises entre 4 et 5 cm. La conductivité hydraulique à saturation (k_{fs}) a été estimée au moyen de l'équation de Elricks et Reynolds (1992) (éq. 3.5) et elle est comprise entre 2×10^{-6} et 3×10^{-6} m/s pour une moyenne de 2×10^{-6} m/s. Ces résultats sont environ un ordre de grandeur plus faible que les valeurs prédictes avec le modèle KCM (Mbonimpa et al., 2002) (tableau 4.3). Ces résultats indiquent que les propriétés hydrogéologiques de la roche stérile concassée à la surface de la halde expérimentale sont relativement homogènes et correspondent relativement bien à un sable bien classé avec du silt et du gravier (USCS; McCarthy, 2007).

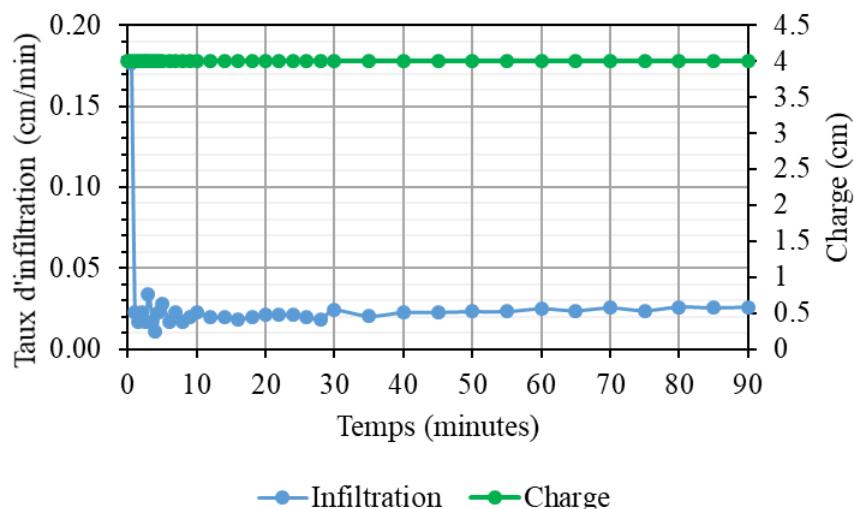


Figure 4.3 Taux d'infiltration mesuré durant l'essai 4 au perméamètre de Guelph (ligne bleue) avec la charge hydraulique appliquée (ligne verte). Essai réalisé à la surface de la roche stérile concassée, au-dessus du Lysimètre 4 (19 septembre 2017).

Tableau 4.3 Caractéristiques et résultats des essais d'infiltration au perméamètre de Guelph.

Date de l'essai	#	Position	Taux d'infiltration après stabilisation (cm/min)	Charge (cm)	Conductivité hydraulique à satiété (m/s)	Valeur prédictive de k_{sat} KCM (m/s)
2016-09-26	1	Lys 6	0,034	5	3×10^{-6}	3×10^{-5}
2016-09-28	2	Lys 4	0,024	5	2×10^{-6}	2×10^{-5}
2017-06-19	4	Lys 4	0,021	4	2×10^{-6}	2×10^{-5}

L'essai d'infiltration à simple anneau ($d=60$ cm) a été réalisé avec une charge hydraulique constante de 6,8 cm. Le taux d'infiltration s'est stabilisé après 15 minutes environ, atteignant des valeurs qui fluctuaient entre 0,04 et 0,05 cm/min (figure 4.4). La conductivité hydraulique à satiété (k_{fs}) calculée à partir de l'équation de Reynolds et Elrick (1990) (éq. 3.4) est estimée à environ 5×10^{-6} m/s. Cette estimation est comparable aux résultats obtenus avec le perméamètre de Guelph, ce qui suggère que les deux types d'essais donnent des résultats assez similaires (tel qu'observé par Bréard Lanoix, 2017).

Des mesures au nucléodensimètre ont été réalisées avant chaque essai d'infiltration (perméamètre de Guelph et infiltromètre à simple anneau). Les porosités mesurées *in situ* dans la couche de roches stériles concassées étaient comprises entre 0,24 et 0,28.

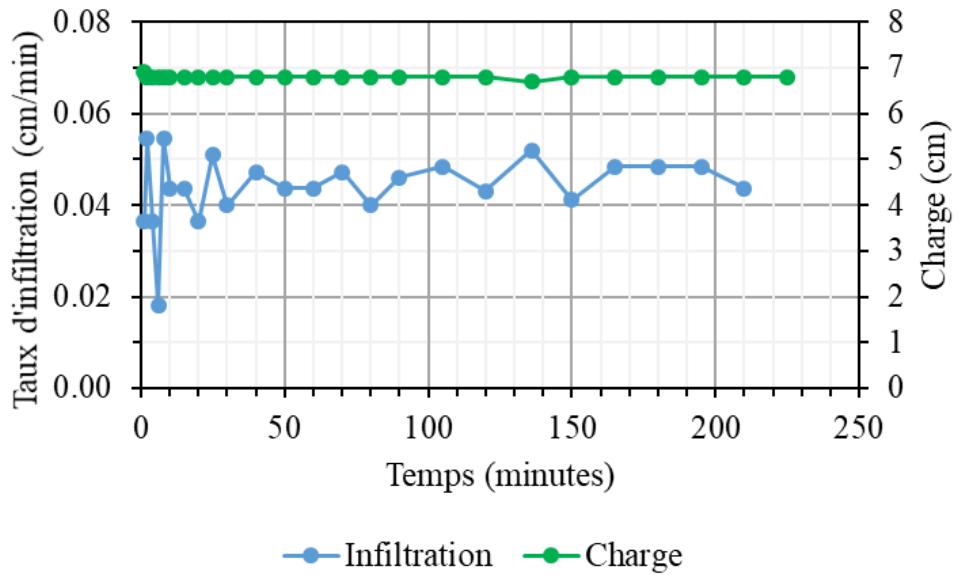


Figure 4.4 Taux d'infiltration mesuré durant l'essai d'infiltration 3 avec l'infiltromètre à simple anneau en fonction de la charge appliquée.

4.3 Essais d'infiltration à grande échelle

Cinq essais d'infiltration à grande échelle ont été réalisés sur la halde expérimentale au cours de trois campagnes de terrain (tableau 4.4). Le volume d'eau appliqué pendant chaque essai était compris entre $6,4 \text{ m}^3$ et 28 m^3 pour une durée d'arrosage entre 1 h et 10 h, soit un flux unitaire moyen compris entre $3,3 \times 10^{-3} \text{ mm/h}$ et $1,1 \times 10^{-2} \text{ mm/h}$. L'essai I-B était celui pour lequel le débit appliqué était le plus élevé soit $6,4 \text{ m}^3/\text{h}$ avec une seule phase d'infiltration en continu (contrairement aux autres essais qui ont été réalisés en 2 ou 3 phases discontinues). Pour les quatre autres essais, un débit moyen de $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau a été appliqué sur la halde expérimentale. Des mesures manuelles de débits ont été prises régulièrement à la sortie de chaque lysimètre pendant et après la fin des essais (section 3.3.2). Les résultats obtenus durant ces essais sont similaires aux autres essais qui ont été décrits précédemment (ce qui implique qu'ils n'ont pas fait l'objet de description détaillée).

Tableau 4.4 Caractéristiques des essais d'infiltration à grande échelle et volumes d'eau appliqués pour chaque essai.

Essai	Date	Nombre de phase d'arrosage durant l'essai	Volume d'eau appliqué (m ³)	Équivalence en hauteur d'eau (mm)	Durée totale de l'essai (avec les pauses)	Volume d'eau moyen appliqué / heure (m ³ /h)
I-A	2016-09-23	2	8,6	15	4h	2,15
I-B	2016-09-27	1	6,4	11	1h	6,40
I-C	2017-06-07	3	28	47	10h	2,80
I-D	2017-06-14	3	16,8	28	9,5h	1,77
I-E	2017-09-19	2	12,8	21	4,25h	3,01

4.3.1 Essai I-C

L'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017) a impliqué le plus grand volume d'eau (28 m³) et la plus longue durée (10h) dans le cadre de ce projet. L'arrosage a été réalisé en trois phases successives, espacées de 2,25 heures et 2 heures. L'objectif était d'appliquer un maximum d'eau à la surface de la halde sur la plus longue période possible. Les précipitations précédant l'essai d'infiltration I-C ont été limitées, soit seulement 18 mm de pluie au total les 3 et 4 juin 2017 (3 jours avant le début de l'essai) (figure 4.5). Ces deux journées représentent 90% du total des précipitations sur une période de 2 semaines précédant l'essai d'infiltration I-C. En d'autres termes, la halde expérimentale se trouvait dans un état relativement sec au début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C, permettant ainsi une meilleure observation de l'avancée du front de mouillage.

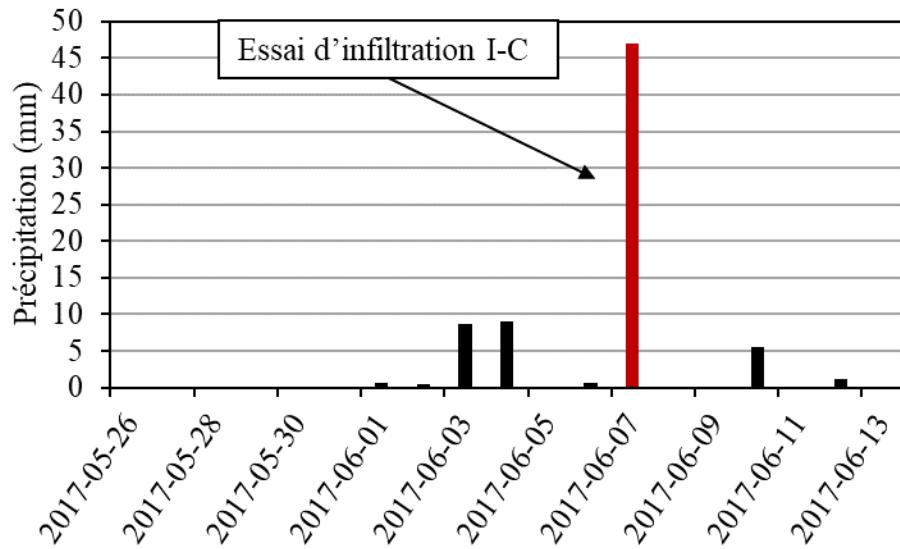


Figure 4.5 Précipitations sur le site de la mine Lac Tio entre le 26 mai 2017 et le 13 juin 2017. L'essai d'infiltration à grande échelle I-C a débuté le 7 juin 2017.

Les volumes d'eau mesurés dans les chaudières placées du côté ouest de la halde étaient en moyenne de 3894 mL contre 1709 mL pour celles placées du côté est (figure 4.6). La répartition latérale de l'eau sur la halde était donc d'environ 70% du côté ouest et 30% du côté est. Cette répartition inégale était principalement due au vent qui soufflait alors dans la direction est-ouest (le même phénomène est observé, à des degrés divers, lors des autres essais). La quantité totale d'eau appliquée au sommet de la halde durant le test a donc été estimée à partir de la hauteur d'eau moyenne mesurée dans les chaudières. Le volume d'eau moyen a été divisé par l'aire d'une chaudière pour déterminer la hauteur d'eau. Cette hauteur d'eau a ensuite été multipliée par l'aire de la surface de la halde expérimentale (600 m^2) pour obtenir une estimation du volume total appliqué pendant l'essai. L'évaporation mesurée en place (contenant gradué) était négligeable pendant le test. Les passages répétés du camion-citerne à la surface de la halde ont été planifiés de façon à minimiser le ruissellement, et il est donc réaliste de considérer que le volume d'eau infiltré correspond au volume d'eau appliqué en surface.

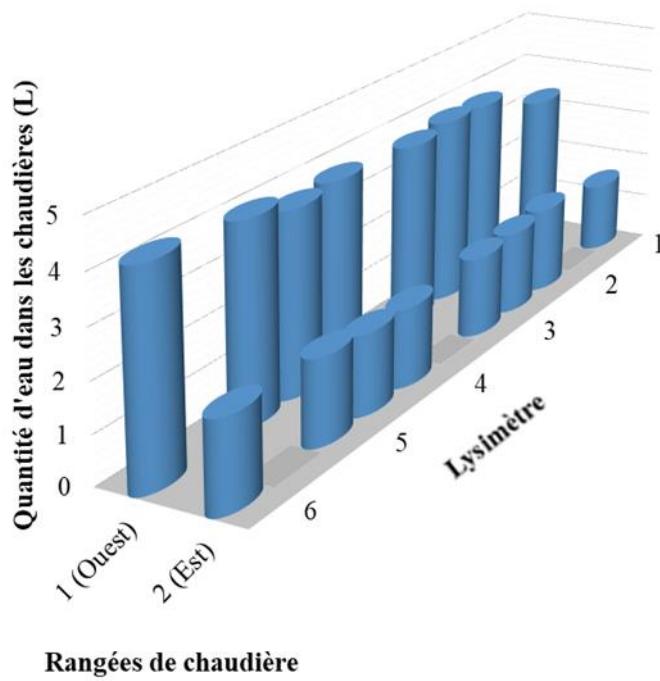


Figure 4.6 Volumes d'eau totaux mesurés dans les chaudières placées à la surface de la halde expérimentale à la fin de l'essai d'infiltration I-C.

Couche de roches stériles concassées

Les mesures de TEV dans la couche de roches stériles concassées n'ont pas pu être calibrées, comme discuté à la section 3.2. Néanmoins, les fluctuations de teneurs en eau volumique mesurées en fonction du temps donnaient des indications sur la vitesse d'infiltration du front de mouillage. La figure 4.7 présente les variations de TEV dans la couche de roches stériles concassées 25 cm sous la surface (5 cm au-dessus de la base de la couche de roches stériles concassées) à partir du début de l'essai d'infiltration I-C et pendant les 6 jours suivants. La sonde placée au-dessus du lysimètre 3 (AC Lys 3) n'a rien enregistré pendant l'essai. Les TEV initiales dans la roche stérile concassée étaient comprises entre 0,164 (AC Lys 2) et 0,212 (AC Lys 5). Le comportement hydrogéologique de la couche de roches stériles concassées a semblé uniforme sur l'ensemble de la halde. Quelques minutes après le début de l'essai (moins de 15 minutes), les TEV ont diminué légèrement avant de remonter rapidement avec l'arrivée du front de mouillage. Le premier front de mouillage (première phase de l'essai) a été enregistré de façon simultanée par les 5 sondes, 45 minutes après le début de l'essai d'infiltration. Puis, les teneurs en eau ont

diminué une fois le premier front de mouillage passé, mais elles sont demeurées supérieures aux valeurs initiales. Le même phénomène a été observé pour les phases d'arrosage suivantes (3 phases au total) qui ont composé l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Le temps d'arrivée du second front de mouillage était compris, selon les sondes, entre 15 et 30 minutes après le début de la deuxième phase d'arrosage. Le front de mouillage de la troisième phase de l'essai a été enregistré 15 minutes après le début de l'arrosage. Les trois phases d'arrosage sont identifiables sur la figure 4.7 par les trois pics successifs d'ampleurs comparables. Les augmentations de TEV dues aux passages des fronts de mouillage étaient comprises entre +0,052 (Lys 5) et +0,167 (Lys 2) (augmentation du degré de saturation d'environ +19 % à +60 %). La courbe AC Lys 5 revient à la TEV initiale environ 18 heures après le début de l'essai alors que les autres courbes demeurent à des valeurs un peu supérieures aux valeurs initiales (+ 0,02 à 0,05). Ces différences dans le retour aux TEV initiales pourraient être attribuables aux TEV initiales différentes (0,16 à 0,21) puisque les vitesses de diminution des TEV étaient comparables. La légère hausse observée le 9 juin 2017 est attribuable à des précipitations survenues durant la fin de semaine du 9 au 10 juin 2017.

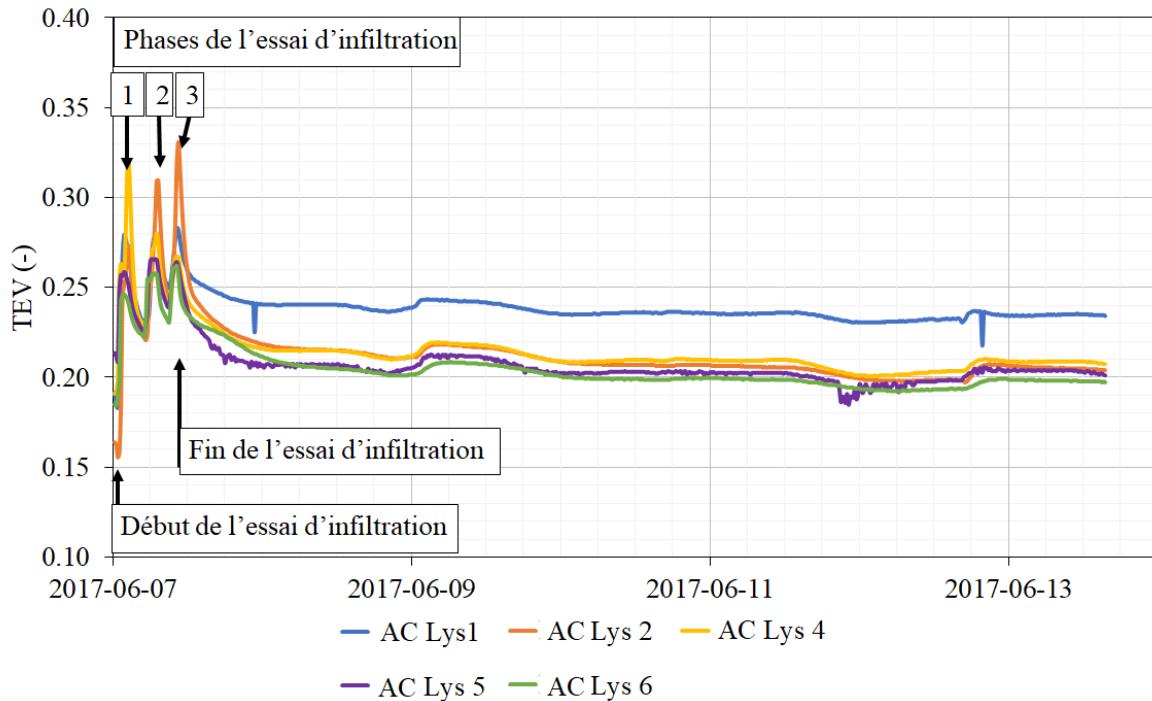


Figure 4.7 Variations des TEV mesurées (valeurs non-calibrées) dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable) près de la surface de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Note : La sonde AC Lys 3 n'a enregistré aucune valeur pendant l'essai.

Couche de sable de la CCE

Les mesures de TEV dans le sable de la CCE ont été corrigées selon l'approche présentée à la section 3.2. Les résultats présentés ici sont donc les valeurs calibrées. Les TEV initiales dans le haut de la couche de sable, 50 cm sous la surface de la halde, au début du test d'infiltration, étaient comprises entre 0,076 et 0,097 (figure 4.8). Ces valeurs étaient relativement faibles en raison de la période sèche observée sur le site de la mine au cours des deux semaines précédant l'essai d'infiltration à grande échelle. Les TEV initiales *in situ* étaient cependant plus de deux fois plus élevées que la TEV résiduelle mesurée au laboratoire ($\theta_r = 0,04$; Bréard Lanoix, 2017). Le temps d'arrivée du front de mouillage dans le haut de la couche de sable était de l'ordre de 1 à 5 heures. Les augmentations de TEV induites par l'essai d'infiltration étaient comprises entre +0,018 et +0,088 (soit entre +5% (S_r de 25%) et +24% (S_r de 50%) en termes du degré de saturation). La période d'influence de l'essai d'infiltration, c'est-à-dire le temps nécessaire pour

observer un retour des TEV à leur valeur initiale, était d'environ 2 jours pour l'ensemble des sondes. Les 3 phases de l'essai I-C (pics successifs) étaient clairement visibles dans les mesures au-dessus du lysimètre 4 (SW-H Lys 4), mais moins distinctes que dans la roche stérile concassée. Elles n'ont pas été observées au-dessus des lysimètres 3 et 5 (SW-H Lys 3 et SW-H Lys 5). La variation de TEV de la sonde SW-H Lys 3 n'a montré que deux pics; il semble que les fronts de mouillage des deuxième et troisième phase de l'essai d'infiltration se soient confondues, ce qui pourrait expliquer la formation d'un plateau (TEV autour de 0,16) pendant environ 6 heures. La TEV mesurée dans le haut de la couche de sable, au-dessus du lysimètre 5, a montré une variation presque trois fois plus faible que SW-H Lys 3 et 4. Ces différences marquées dans les réponses des sondes de TEV suggèrent une variabilité du comportement hydrogéologique de la halde expérimentale et de la CCE en particulier. Ces différences pourraient être liées aux variations d'épaisseur et de densité dans les couches de sable et de roches stériles concassées. L'arrivée du front de mouillage au niveau de la sonde SW-H Lys 5 a également été enregistrée avec plus de trois heures de retard par rapport aux deux autres sondes (SW-H Lys 3 et 4). La vitesse de diminution de TEV- des sondes SW-H Lys 3 et 4 étaient similaire, soient -0,06 et -0,07 respectivement durant les premiers 24 heures. La baisse de TEV enregistrée par la sonde SW-H Lys 5 était plus lente (-0,01 dans les 24 premières heures); ce phénomène serait en partie attribuable à l'augmentation moins importante de TEV dans cette partie de la CCE, en raison d'un front de mouillage inégal. Dans les jours suivants, la diminution de TEV était plus lente (diminutions entre -0,002 et -0,015 sur les 4,5 jours suivants); la TEV tendait alors vers des valeurs légèrement plus basses que les valeurs initiales. Aucune tendance n'a pu être établie entre les résultats et l'emplacement des sondes dans la pente de la CCE. L'augmentation de la TEV était similaire pour SW-H Lys 3 et 4 (mais différente dans la réponse aux trois phases d'infiltration) alors que SW-H Lys 5, en aval, n'enregistre qu'une fraction de l'augmentation de TEV des deux autres sondes.

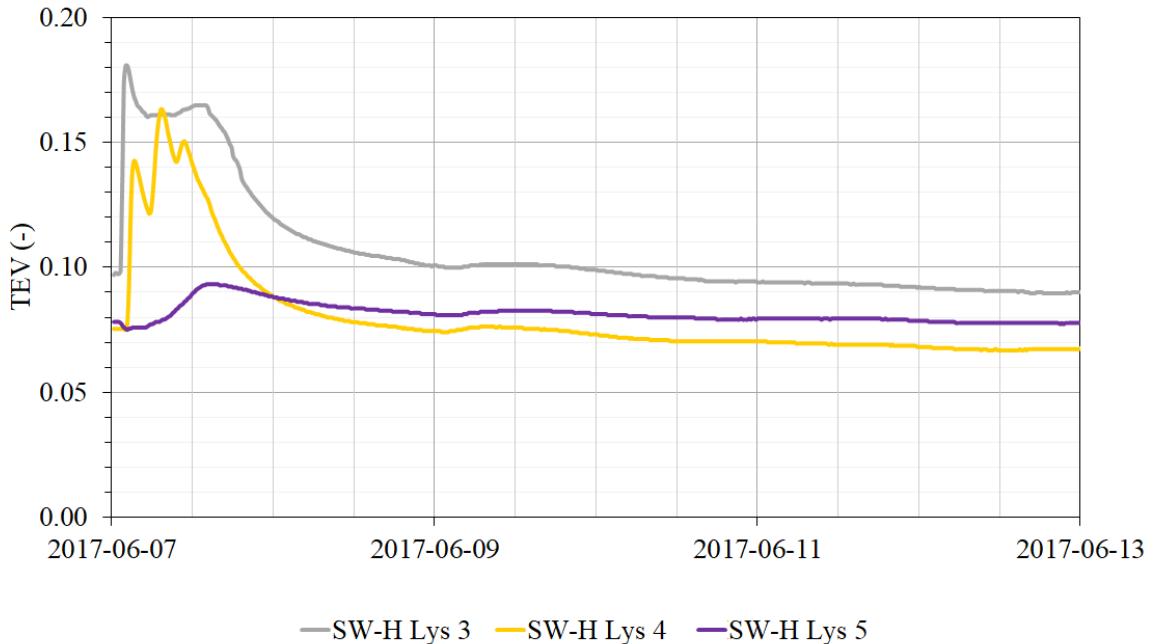


Figure 4.8 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable mesurées au-dessus des lysimètres 3, 4 et 5 (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Note : Les sondes SW-H Lys 1, SW-H Lys 2 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.

Les TEV mesurées dans le bas de la couche de sable, 80 cm sous la surface de la halde (20 cm au-dessus de la base de la CCE) avant le début du test d'infiltration I-C, étaient comprises entre 0,097 et 0,143 (figure 4.9). Ces valeurs initiales ne montraient pas de tendance particulière selon leur position dans la pente. Ainsi, les TEV mesurées au-dessus des lysimètres 2 et 4 étaient plus élevées d'environ 0,04 (maximum) par rapport à celles mesurées au-dessus des autres lysimètres. Le front de mouillage a atteint le bas de la couche de sable entre 4 et 7,5 heures après le début de l'essai. Il ne semble pas non plus y avoir de lien entre la vitesse d'arrivée du front de mouillage et la position dans la pente. L'augmentation de TEV suite à l'essai d'infiltration était comprise entre +0,023 et +0,093. Le temps d'influence de l'essai sur les TEV à cette profondeur variait de 2 jours (SW-b Lys 5 et 6) à plus de 5 jours (Lys 2 et 4). Les trois phases d'arrosage n'étaient plus distinguables à cette profondeur et un seul pic était observé dans les heures suivant le début de l'essai. Deux courbes (SW-b Lys 5 et SW-b Lys 6) montraient une décroissance rapide de la TEV

(-0,04 en 36 heures et -0,08 en 24 heures, respectivement) alors qu'elle était plus lente (-0,01 en 78 heures et -0,08 en 116 heures) pour les quatre autres (Lys 1, Lys 2, Lys 3 et Lys 4).

La baisse rapide de teneur en eau mesurée par les sondes SW-b Lys 5 et SW-b Lys 6 pourrait indiquer un écoulement vertical plus important au-dessus des lysimètres 5 et 6. Les TEV plus élevées au-dessus des lysimètres 1 à 4 pourraient à l'inverse indiquer un écoulement latéral de l'eau le long de la pente.

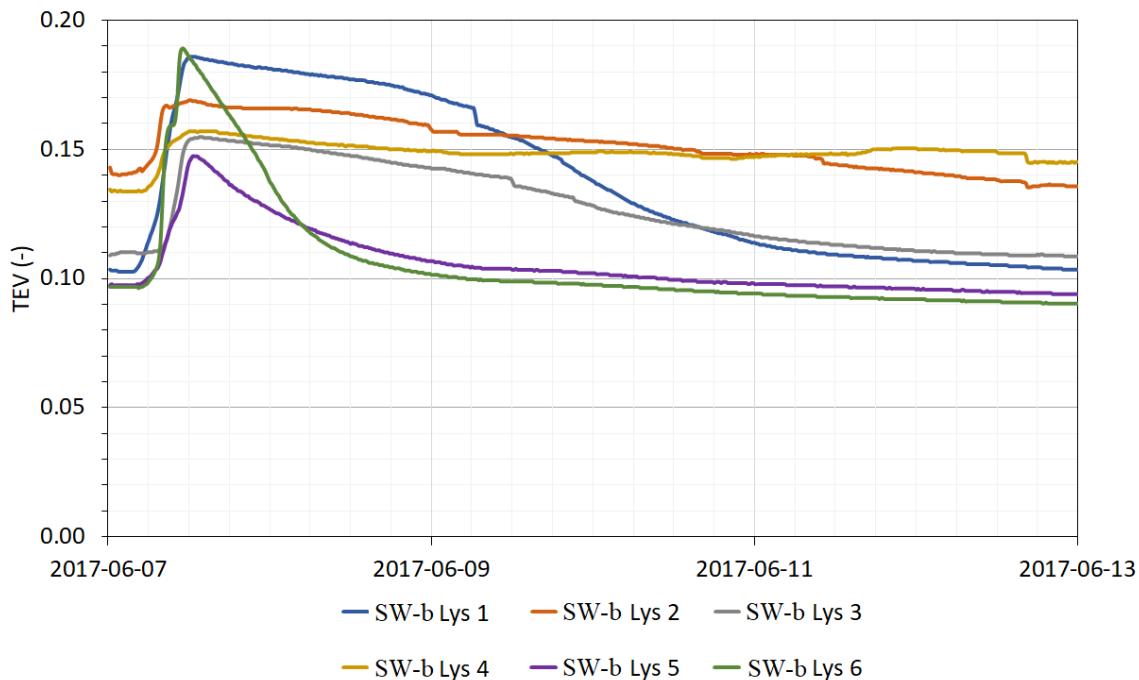


Figure 4.9 Variations de la TEV au-dessus des 6 lysimètres dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des roches stériles) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin au 13 juin 2017).

Les TEV ont été mesurées simultanément dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE au-dessus des lysimètres 3, 4 et 5 seulement (l'une des deux mesures manquait dans le haut de la couche de sable (SW-H)). Les valeurs mesurées de la TEV étaient, de façon générale, sensiblement plus élevées dans le bas de la couche de sable (0,134 et 0,109 pour SW-b Lys 4 et Lys 3 respectivement) que dans le haut (0,097 et 0,076 pour SW-H Lys 3 et 4 respectivement) (figure 4.10), ce qui semble indiquer une certaine accumulation d'eau en profondeur, proche de

l'interface avec les stériles. L'arrivée du front de mouillage dans le bas de la couche de sable a été enregistrée en moyenne 2,5 heures plus tard que dans le haut. L'augmentation initiale de TEV induite par l'essai était supérieure dans le haut de la couche (maximum +0,088) que dans le bas (maximum +0,05). Par contre, les TEV initiales (avant le début de l'essai) étaient plus faibles dans le haut de la couche. Le temps d'influence de l'essai a été plus court dans le haut de la couche de sable (environ 2 jours) que dans le bas (de 4 à plus de 6 jours). Il semblerait donc que le temps d'influence soit plus grand à proximité de l'interface avec les stériles. La diminution de TEV après la fin de l'essai semblait plus rapide (environ 4 jours) dans le bas de la couche au-dessus du lysimètre 3 (plus haut dans la pente) que du lysimètre 4 (qui n'a pas atteint la valeur initiale dans les 5,5 jours de drainage suivant l'essai). Les deux courbes Lys 3 (haut et bas) et la courbe Sable CCE-haut Lys 4 tendaient vers des valeurs plus faibles que leurs valeurs initiales.

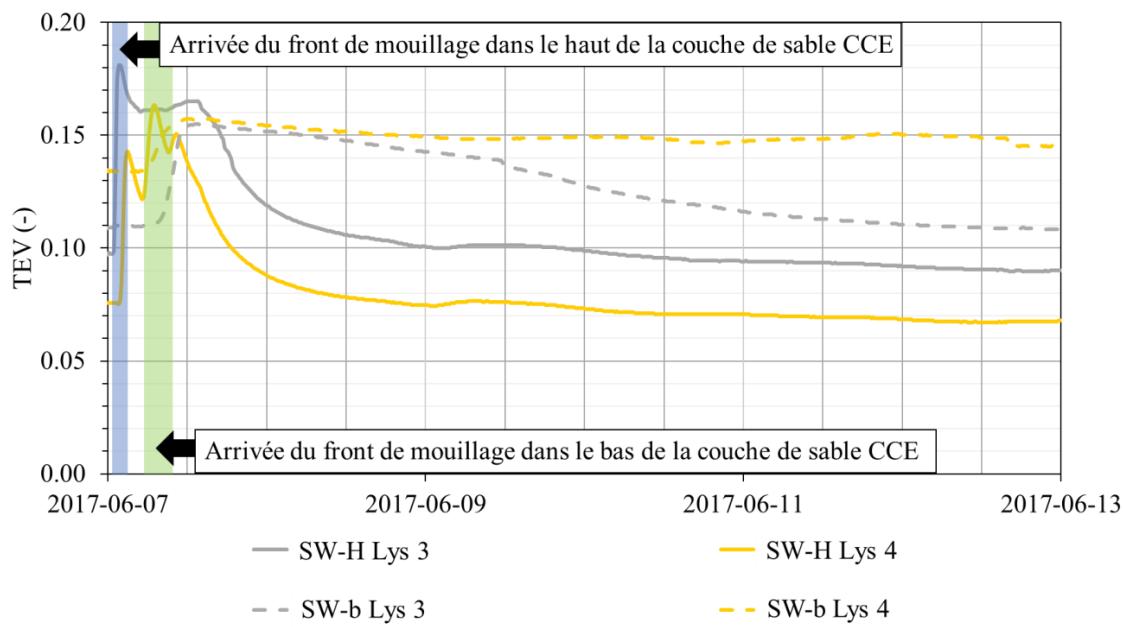


Figure 4.10 Variations des TEV mesurées dans le haut et le bas de la couche de sable au-dessus des lysimètres 3 et 4 pendant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les plages de temps d'arrivée du front de mouillage (augmentation rapide de la TEV) sont également indiquées pour le haut et le bas de la couche de sable. SW-H : haut de la couche de sable ($z = 0,5\text{ m}$) et SW-b : bas de la couche de sable ($z = 0,8\text{ m}$).

Stériles

Les mesures de TEV dans les roches stériles n'ont pas pu être corrigées (section 3.2), mais les résultats ont néanmoins permis d'obtenir quelques informations sur le comportement hydrogéologique des stériles sous la CCE. Les TEV initiales dans les stériles ($TEV = 0,21$ à $0,81$) étaient plus dispersées que dans le sable et la roche stérile concassée, ce qui semble indiquer une plus forte hétérogénéité des propriétés des roches stériles (notamment les propriétés électriques). Les valeurs de TEV présentées à la figure 4.11 ne sont pas réalistes (certains résultats dépassent notamment la porosité des stériles) et peuvent s'expliquer par le fait que la relation entre la TEV et la constante diélectrique a été établie pour un sol et non pour des roches stériles d'ilménite peu résistives avec une eau interstitielle contaminée. Cependant, les variations de TEV sont jugées réalistes puisqu'elles ne sont pas dépendantes de la valeur initiale (Chen et al. 2018).

Le front de mouillage a pénétré dans les stériles (1,1 m sous la surface de la halde expérimentale, soit 10 cm sous la surface des roches stériles) entre 5,8 heures et 10,5 heures après le début de l'essai I-C (figure 4.11). Les hausses de TEV étaient comprises entre $+0,05$ et $+0,18$ et ne montraient pas de lien particulier avec la position dans la pente de la halde. Les variations de TEV au-dessus du lysimètre 1 différaient du reste de la halde et ont montré une légère baisse ($-0,02$) plutôt qu'une augmentation suite à l'essai d'infiltration. Les différentes sondes ont montré des vitesses de diminution de TEV sensiblement différentes mais la période d'influence de l'essai était d'environ 6 jours et était relativement similaire d'une sonde à l'autre. Les taux de diminution de la TEV ne semblent pas être corrélés à la position dans la halde. Ainsi, les TEV au-dessus des lysimètres 2 (haut de pente) et 6 (bas de pente) ont atteint à nouveau leur valeur initiale 50 heures après leur pic, alors que le phénomène a pris plus de 140 heures au-dessus des lysimètres 3 et 4. Les résultats au-dessus du lysimètre 3 en particulier indiquent que la TEV est restée constante ($TEV = 0,81$) pendant 30 heures avant qu'une diminution et un retour progressif à l'état initial soit observé.

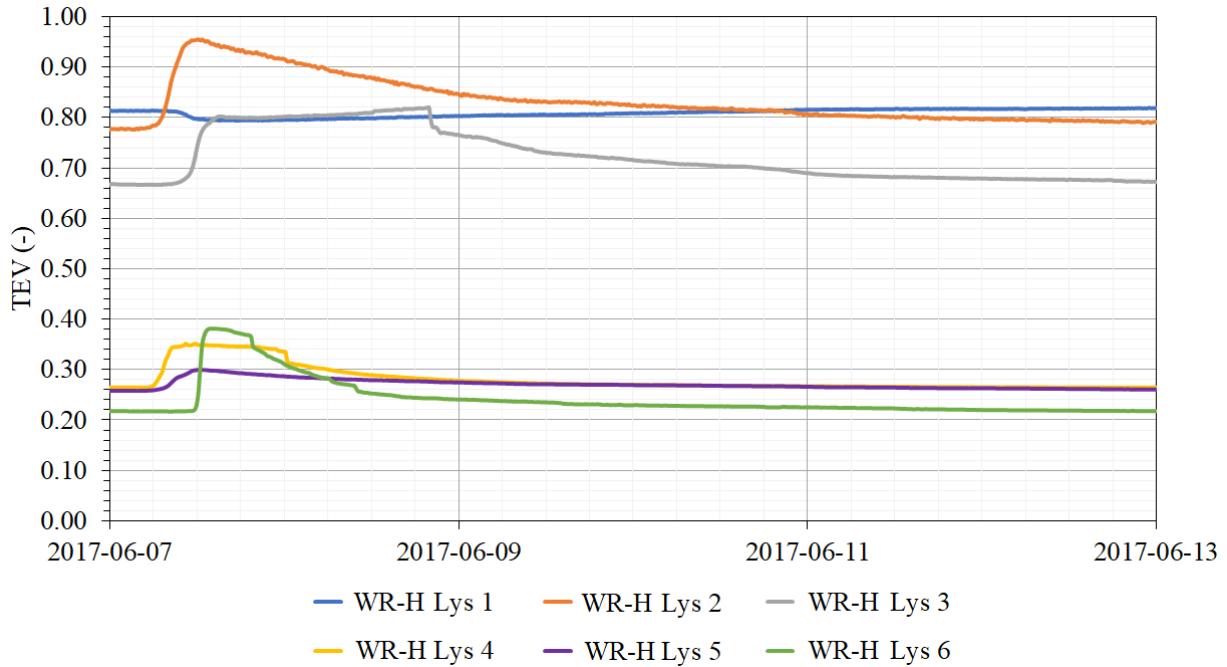


Figure 4.11 Variations de TEV dans le haut des roches stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous la CCE) lors de l'essai d'infiltration I-C et pour les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).

L'arrivée du front de mouillage 1,3 m sous la surface de la halde (30 cm sous la surface des roches stériles) a été enregistrée environ 8 heures après le début de l'essai (figure 4.12). Les hausses maximales de TEV provoquées par le passage du front de mouillage étaient de l'ordre de +0,02 (Lys 5) à +0,80 (Lys 4). Le retour à la TEV initiale a pris entre 3,5 jours (Lys 5) et plus de 6 jours (Lys 2 et 3). L'augmentation de la TEV et la vitesse de la baisse de TEV pendant l'essai n'étaient pas clairement liées à la position dans la pente de la halde. Ainsi, la courbe WR-b Lys 4 montrait une augmentation de TEV rapide (+0,08 en moins de 2 heures) atteignant un plateau (TEV = 0,31) pendant environ 36 heures et une diminution de TEV plus rapide (-0,05 en 24 heures) que les autres courbes situées autant en amont qu'en aval dans la pente (de -0,01 à -0,02 en 24 heures).

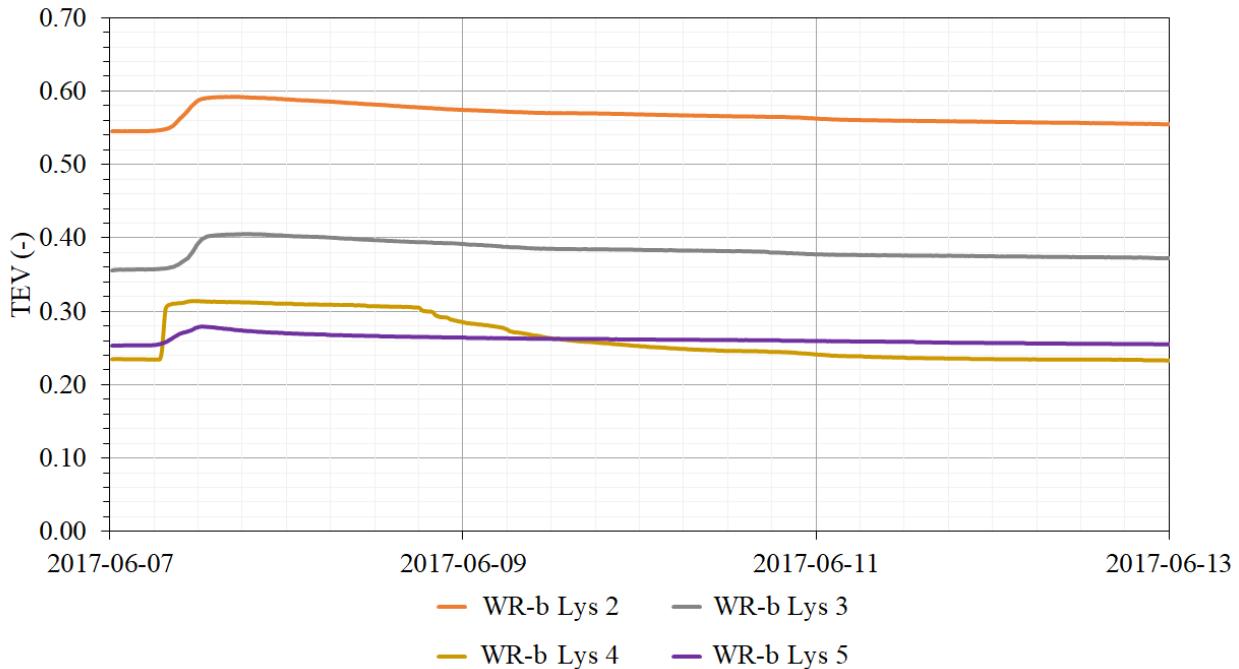


Figure 4.12 Variations des TEV mesurées dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la CCE) à partir du début de l'essai d'infiltration I-C et durant les 6 jours suivants (7 juin 2017 au 13 juin 2017). Note : Les sondes WR-b Lys 1 et WR-b Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).

Le front de mouillage a été enregistré de façon presque simultanée (environ 8 heures après le début de l'essai) 10 cm et 30 cm sous la surface des stériles au-dessus du lysimètre 3 (figure 4.13). L'arrivée quasi simultanée du front de mouillage à deux profondeurs différentes pourrait indiquer la présence de chemins d'écoulements préférentiels dans les stériles (Broda et al., 2014). L'augmentation de TEV à 1,1 m de profondeur (10 cm sous la surface des stériles) était supérieure (0,176 et 0,152 pour WR-H Lys 2 et 3) à celles enregistrées à 1,3 m de profondeur (0,046 et 0,037 pour WR-b Lys 2 et 3 respectivement). La diminution de TEV au haut des stériles (-0,11 en 2 jours et -0,10 en 1 jour) était plus rapide que 20 cm au-dessous (-0,05 en 5,5 jours). Par contre, le temps d'influence de l'essai semblait similaire pour toutes les sondes (environ 5,5 jours).

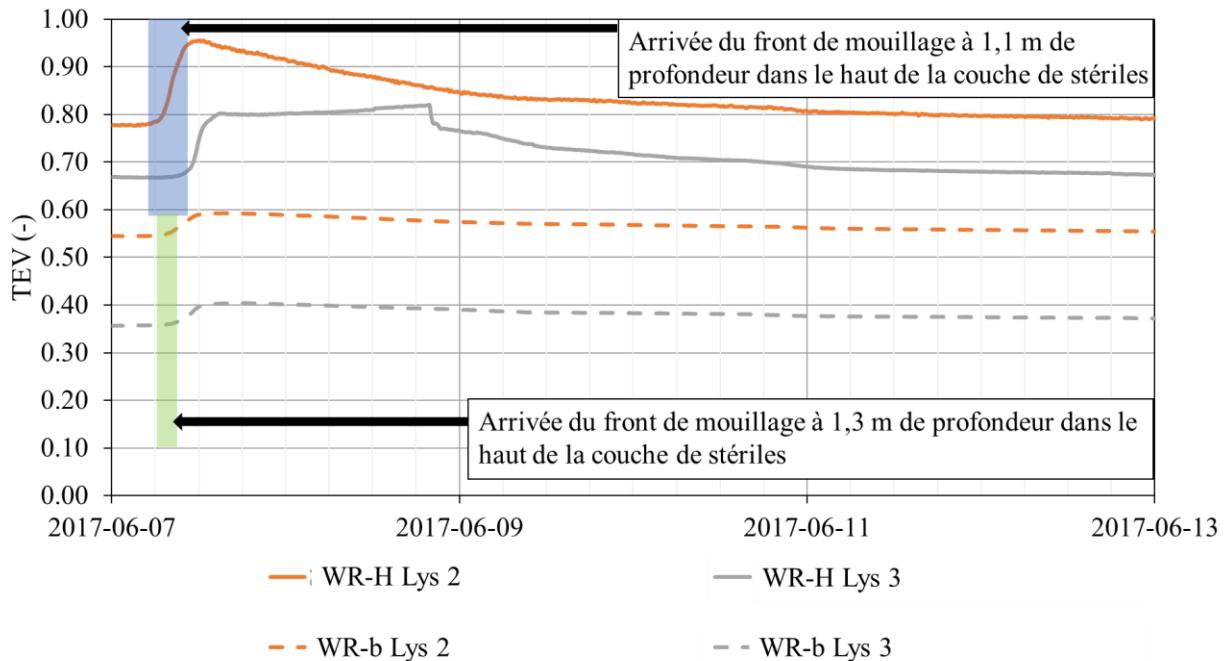


Figure 4.13 Variations des TEV mesurées dans le haut des stériles (à des profondeurs de 1,1 m et 1,3 m sous la surface de la halde soit 10 cm et 30 cm sous la CCE) au-dessus des lysimètres 2 et 3 pour les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les plages de temps d'arrivée du front de mouillage (augmentation rapide de la TEV) sont également indiquées pour WR-H et WR-b. WR-H : haut des stériles ($z = 1,1$ m) et WR-b : niveau inférieur des sondes dans le haut des stériles ($z = 1,3$ m).

L'ensemble des temps d'arrivées des fronts de mouillage pour chaque sonde et chaque essai d'infiltration à grande échelle sont présentés à l'annexe D.

Lysimètres

Les TEV mesurées avec les sondes GS3 dans le sable des lysimètres n'ont pas pu être comparées avec des mesures directes (voir aussi section 3.2), et les résultats présentés ici correspondent donc aux mesures brutes obtenues. Chaque lysimètre contient 2 sondes de TEV nommées Lys X-a et Lys X-B. Les sondes dans un même lysimètre n'ont pas nécessairement donné les mêmes résultats, bien qu'il soit réaliste de penser que le sable des lysimètres soit relativement uniforme. Par exemple, dans le lysimètre 6 la sonde Lys 6-a a indiqué une hausse de TEV de l'ordre de

0,083 alors que la sonde Lys 6-b a enregistré une hausse de 0,119 (figure 4.14). Autre exemple, la TEV initiale mesurée par la sonde Lys 1-a était de 0,285 alors qu'elle était de 0,335 avec la sonde Lys 1-b, pourtant installée dans le même lysimètre; soit une différence de 0,050. L'arrivée du front de mouillage a été plus rapide (environ 13 heures après le début de l'essai I-C) dans le lysimètre 6 situé près du pied de la halde que dans les autres lysimètres (de 30 à 60 heures). Il ne semblait cependant pas y avoir d'autres tendances entre le temps d'arrivée du front de mouillage (entre 13 heures et 2,5 jours après le début de l'essai d'infiltration) et la position au pied de la halde. Les augmentations de TEV dans les lysimètres étaient comprises entre +0,026 et +0,119.

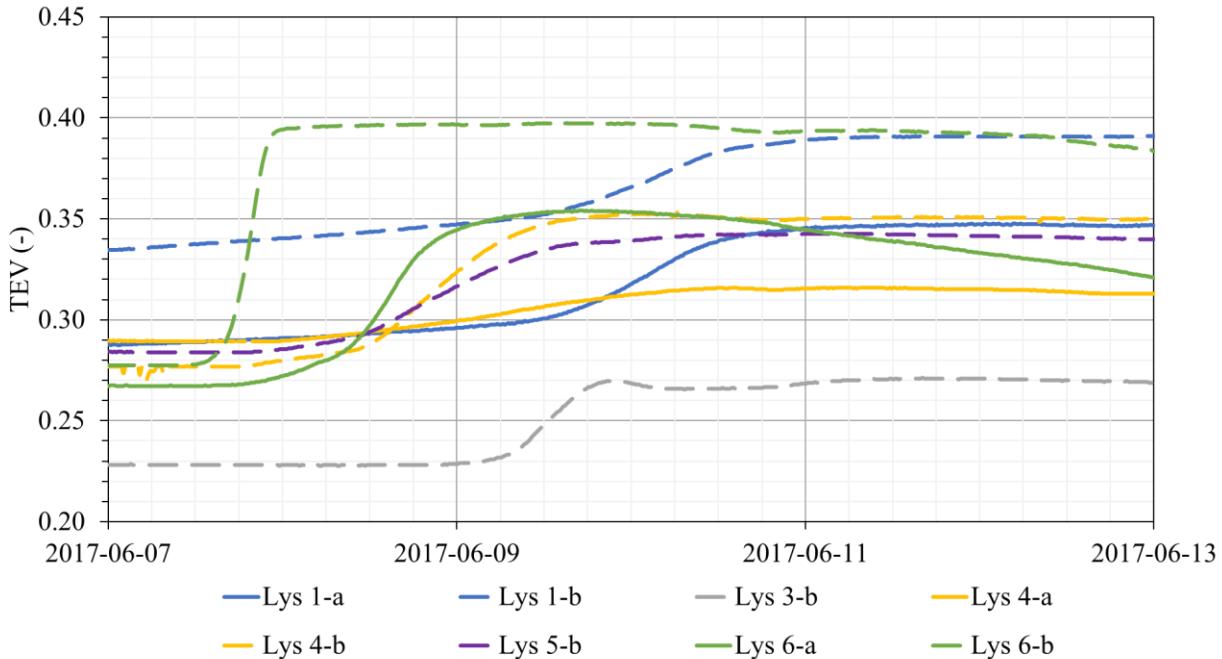


Figure 4.14 Variations de TEV dans le sable des lysimètres à la suite de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et durant les 7 jours suivants. Les TEV dans les lysimètres n'ont pas pu être calibrées et les valeurs mesurées doivent être considérées avec précaution. Note : Les sondes Lys 2-a, Lys 2-b, Lys 3-a et Lys 5-a n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.

Succion

Les succions mesurées proche de l'interface sable/stériles (10 cm au-dessus et 10 cm au-dessous de l'interface) au-dessus de l'ensemble des lysimètres ont montré des fluctuations relativement

similaires (Annexe E). Les fluctuations au-dessus du lysimètre 4 sont représentatives de l'ensemble des résultats durant la période de 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C (figure 4.15). L'arrivée du front de mouillage dans le bas de la couche de sable (10 cm au-dessus des stériles) a entraîné une petite augmentation des pressions (+0,1 kPa) environ 5 heures après le début de l'essai. Cette période de temps d'arrivée concordait avec l'augmentation de TEV observée dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde). L'arrivée du front de mouillage a été enregistrée 8,75 heures après le début de l'essai ce qui correspondait aussi aux temps auquel les TEV mesurées atteignaient un pic ou commençaient à augmenter (figure 4.9 et 4.11). La hausse de pression était de 0,4 kPa dans le bas de la couche de sable et de 0,5 kPa dans le haut des stériles. Les deux courbes (SW-b et WR-H) n'étaient pas revenues aux succions initiales sept jours après l'essai d'infiltration (+0,3 kPa dans le sable et dans les stériles) alors que les TEV dans le bas de la couche de sable (SW-b) et dans le haut des stériles (WR-H).

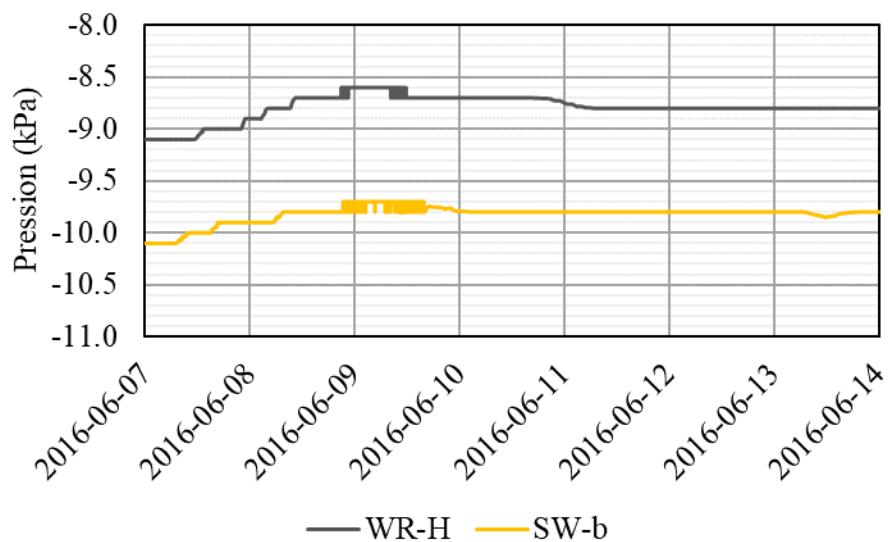


Figure 4.15 Variations des pressions à 10 cm au-dessus et 10 cm en-dessous de l'interface sable/stériles au-dessus du lysimètre 4 (1,1 m et 0,9 m sous la surface de la halde).

Les variations enregistrées par les sondes de succion n'ont pas été utilisées dans le cadre de l'analyse des essais d'infiltration à grande échelle, car la résolution des mesures était trop faible (variations d'environ $\pm 0,5$ kPa). La valeur maximale de pression mesurée de ce type de sonde

(-9 kPa) a limité les mesures possibles dans le cadre de cette étude. De même, les variations enregistrées (~0,5 kPa) sont comprises dans la marge d'erreur de la sonde (\pm (25 % de la mesure +2 kPa); Decagon Devices Inc, 2017b). Enfin, les variations de pression mesurées étaient encore plus faibles (voir nulles) pour les autres essais d'infiltration.

Débits de sortie

Les débits à la sortie des lysimètres ont été mesurés en continu avec des débitmètres à auget (mesures débitmètres) et ponctuellement au moyen d'un cylindre gradué (mesures manuelles de 2 à 3 fois par jour ; section 3.2). Les mesures des débitmètres étaient systématiquement inférieures aux mesures manuelles dans tous les lysimètres (figure 4.16), avec des différences comprises entre 0,1 m³ (Lysimètre 2) et 3,5 m³ (Lysimètre 6) après 6 jours. Les débits enregistrés pour les Lysimètres 2, 3 et 4 montraient une tendance similaire pour les deux méthodes de mesures, c'est-à-dire une augmentation rapide des débits un ou deux jours après le début de l'essai d'infiltration. Les débits enregistrés par les débitmètres des trois autres lysimètres (1, 5 et 6) indiquaient cependant des retards de 2 à 4 jours par rapport aux mesures manuelles ; les débits cumulés après 6 jours étaient également nettement inférieurs aux valeurs mesurées manuellement (entre 0,5 et 3,5 m³ plus faibles). Pour ces raisons, les débits manuels ont été préférés (lorsque disponibles) pour analyser le comportement hydrogéologique de la halde suite aux essais d'infiltrations. Les résultats ont été interprétés pour les 6 jours suivant l'essai d'infiltration à grande échelle avant le début de l'essai I-D le 14 juin (section 3.3.2).

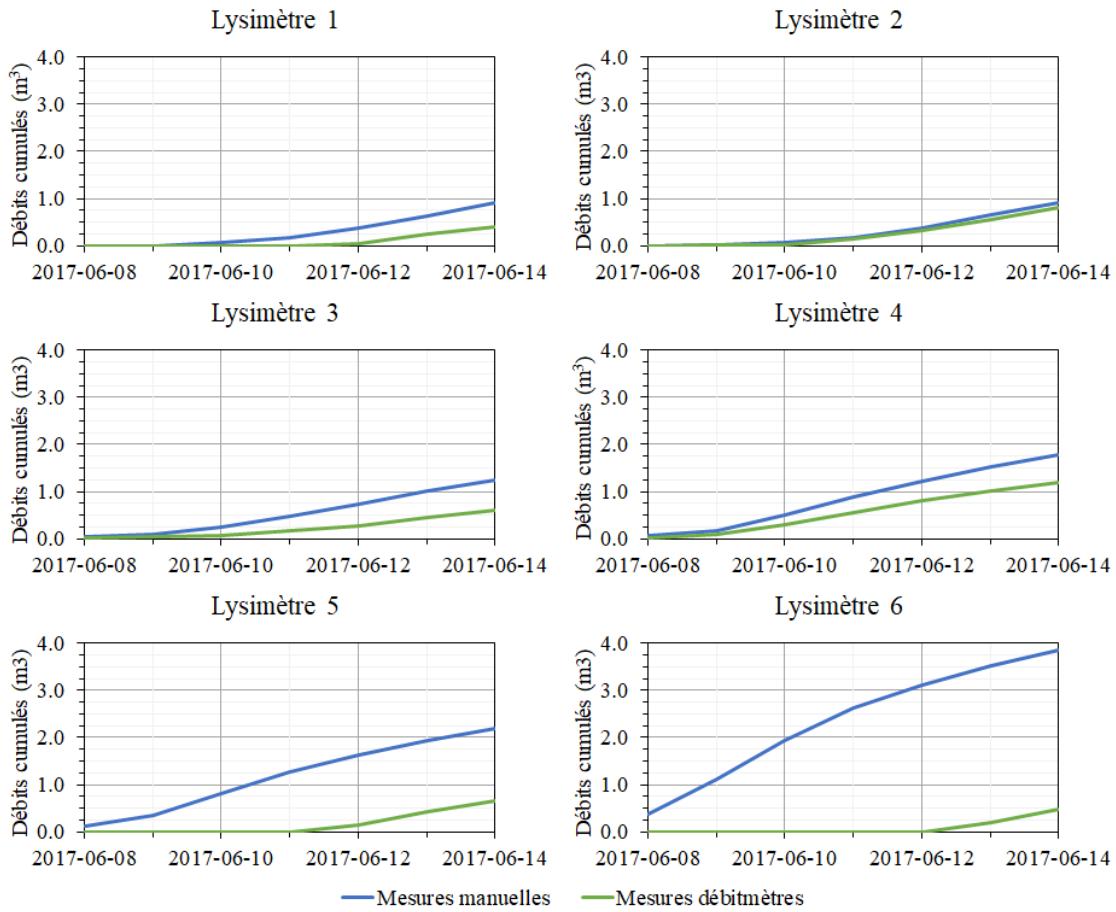


Figure 4.16 Débits cumulés mesurés avec les débitmètres et manuellement sur une période de 6 jours suivant l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Les résultats sont présentés pour chaque lysimètre de la halde expérimentale.

Les mesures manuelles réalisées (2 à 3 fois par jour; Annexe F) dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-C montraient de façon générale une augmentation rapide des débits à la sortie des lysimètres suivie d'une diminution plus lente (figure 4.17). Les débits n'ont pas pu être mesurés manuellement durant la fin de semaine du 10 et 11 juin 2017 (tirets sur la figure 4.17) et les mesures automatisées (débitmètres) n'étaient pas assez fiables pour intercaler plus précisément l'évolution des débits de sortie (figure 4.16). Les débits ponctuels (figure 4.17) et cumulés mesurés augmentaient à mesure qu'on se rapprochait du pied de la halde expérimentale : ainsi, les débits les plus importants ont été mesurés dans le lysimètre 6 et les plus faibles dans le lysimètre 1. Les lysimètres 4, 5 et 6 ont été les premiers à enregistrer une augmentation de débit

(des hausses de +10 mL/min, +23 mL/min et +192 mL/min respectivement) dans les 20 premières heures suivant le début de l'essai d'infiltration, ce qui correspondait bien aux variations de TEV observées dans le sable des lysimètres (figure 4.14). Les trois autres lysimètres ont enregistré une augmentation de débit (+117 mL/min, +132 mL/min et +146 mL/min respectivement) quelques jours plus tard, entre le 10 et le 12 juin. Les débits dans les lysimètres 1 à 5 sont devenus très proches à partir du 13 juin 2017, 6 jours après le début de l'essai d'infiltration (entre 175 mL/min et 225 mL/min). Les débits mesurés dans le lysimètre 6 sont demeurés plus élevés (entre 286 mL/min et 298 mL/min) malgré une baisse importante après un pic autour de 530 mL/min le 9 juin.

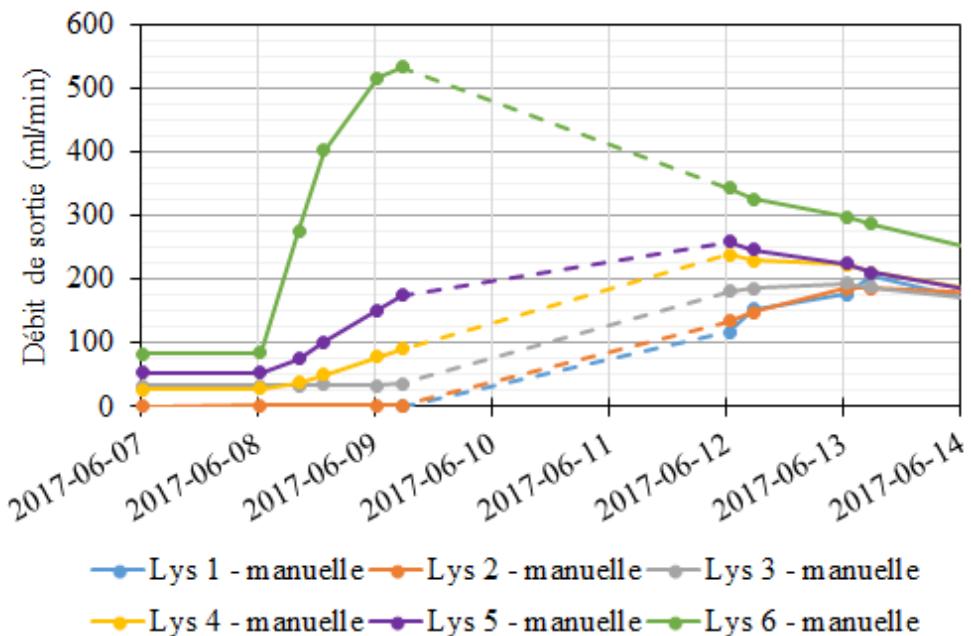


Figure 4.17 Débits ponctuels mesurés manuellement à la sortie des lysimètres durant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration à grande échelle I-C.

La quantité d'eau totale récupérée pour chaque lysimètre pendant les 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C a été calculée à partir de la moyenne journalière des mesures manuelles (les mesures des 10 et 11 juin 2017 ont été interpolées). Ces valeurs ont été comparées aux 28 m³ d'eau appliquée à la surface de la halde expérimentale au cours de l'essai (figure 4.18). Le taux de récupération total a atteint 39% à la fin de la période de 7 jours. Le reste de l'eau était soit en

train de s'écouler à travers la halde (environ 20% en extrapolant les résultats des derniers jours du suivi), soit perdue (en termes de bilan) par évaporation ou écoulements latéraux, soit encore retenue dans les matériaux de la halde ou de la CCE. La récupération augmentait de manière relativement constante d'une journée à l'autre (+4-7 % par jour).

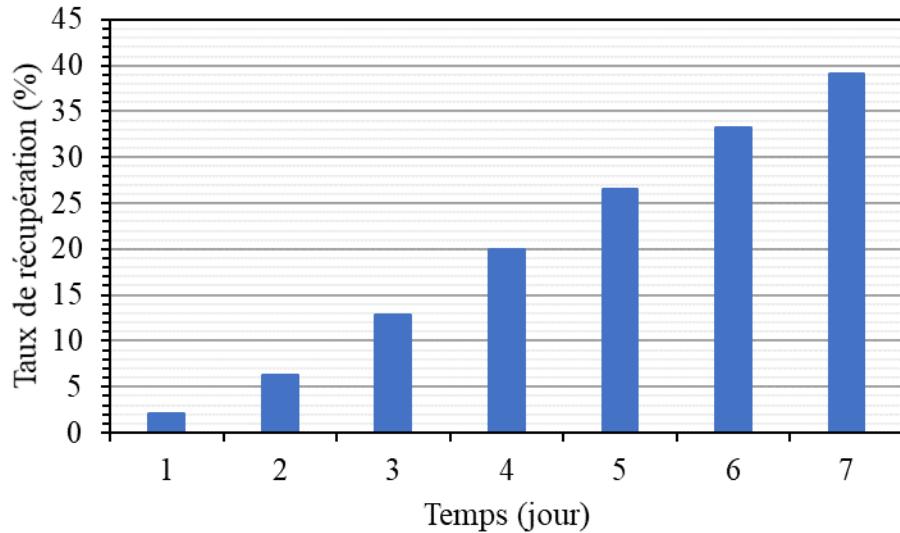


Figure 4.18 Taux de récupération total du volume infiltré lors de l'essai d'infiltration I-C sur une période de 7 jours (8 au 14 juin 2017).

Les débits cumulés montraient généralement la même tendance que la mesure moyenne de débit par jour (figure 4.17) à savoir que les volumes récupérés étaient plus élevés dans les lysimètres du pied de la halde (Lys 6) et moins importants sous le haut de la pente (Lys 1) (les mesures des 10 et 11 juin 2017 ont été interpolées). Les débits cumulés totaux étaient d'environ $10,9 \text{ m}^3$, 7 jours après l'essai d'infiltration, et le lysimètre 6 comptait pour 35% de ce total (figure 4.19). La proportion d'eau récupérée dans le lysimètre 6 était donc 2 fois plus élevée que la répartition normale par lysimètre en fonction de la surface (~17% chacun). La proportion des débits des lysimètres du pied de la halde (lysimètres 5 et 6) était de 55%, soit encore 22% de plus que la répartition normale selon la surface. Ces différences pourraient être liées (du moins en partie) à la déviation latérale de l'eau dans la CCE et/ou aux variations d'épaisseur des stériles en fonction de la pente de la halde.

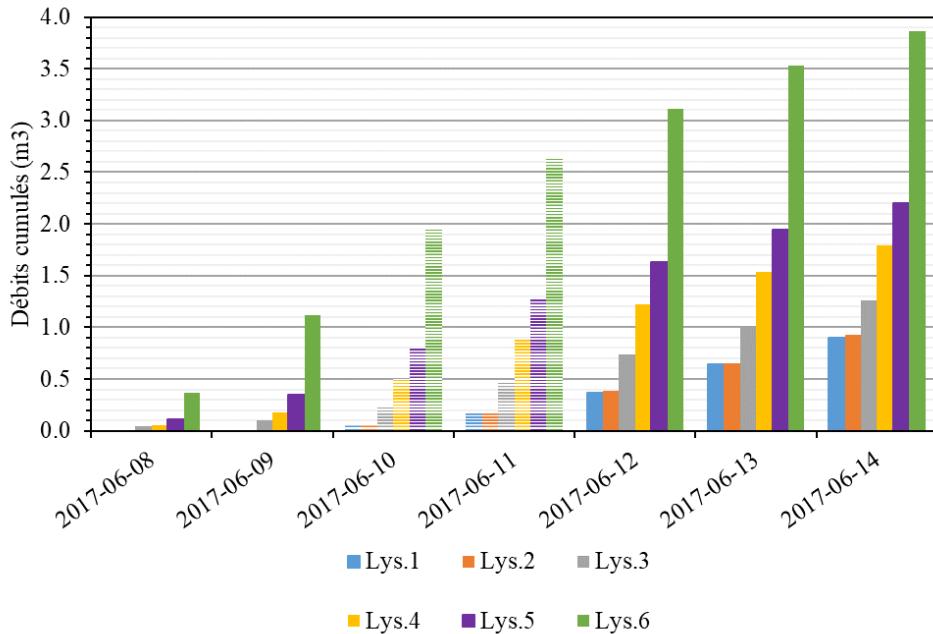


Figure 4.19 Taux de récupération, par lysimètre, des débits cumulés dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-C (8 au 14 juin 2017). Les histogrammes lignés représentent les jours pour lesquels les débits de sortie ont été estimés.

4.3.2 Essai I-E

L'essai d'infiltration à grande échelle I-E a simulé une précipitation pendant une période de temps relativement courte, soit environ 20 mm en 4,25 heures pour un total de 12,8 m³ sur l'ensemble de la halde. Les TEV initiales dans la halde (CCE et stériles) étaient faibles au début de l'essai I-E, en raison notamment de l'installation d'une membrane imperméable en surface entre le 16 juin et le 15 septembre 2017 (section 3.3.2). De plus, il n'y a eu presqu'aucune précipitation entre le retrait de la toile et le début de l'essai le 19 septembre 2017. Cet essai d'infiltration à grande échelle s'est déroulé en deux phases de 2,25 et 1,2 heure entrecoupée d'une pause d'environ 0,8 heure pour un total de 4,25 heures.

Le volume d'eau mesuré dans les chaudières placées du côté ouest de la halde était en moyenne de 2124 mL mais seulement de 887 mL pour celles placées du côté est (figure 4.20). La répartition de l'eau versée sur la halde était donc de 71% ouest et 29% est, comme pour l'essai I-C (section 4.3.1). Cette répartition de l'eau peut s'expliquer par les vents dominants orientés

dans la direction est-ouest. La quantité totale d'eau qui a été appliquée au sommet de la halde durant le test a été estimée à partir d'une hauteur d'eau moyenne calculée à partir des mesures dans les chaudières. L'évaporation en place a été négligée durant l'essai. Les passages répétés du camion-citerne à la surface de la halde ont été planifiés de façon à minimiser le ruissellement. Il est donc réaliste de considérer que le volume d'eau infiltré correspond au volume d'eau appliquée en surface. Le volume d'eau moyen a été divisé par l'aire d'une chaudière pour déterminer la hauteur d'eau. Cette hauteur d'eau a ensuite été multipliée par l'aire de la surface de la halde expérimentale (600 m^2) pour obtenir l'estimation du volume total. Pour le test E, le volume moyen mesuré dans chaque chaudière était de 1506 mL soit un volume total estimé de $12,8 \text{ m}^3$.

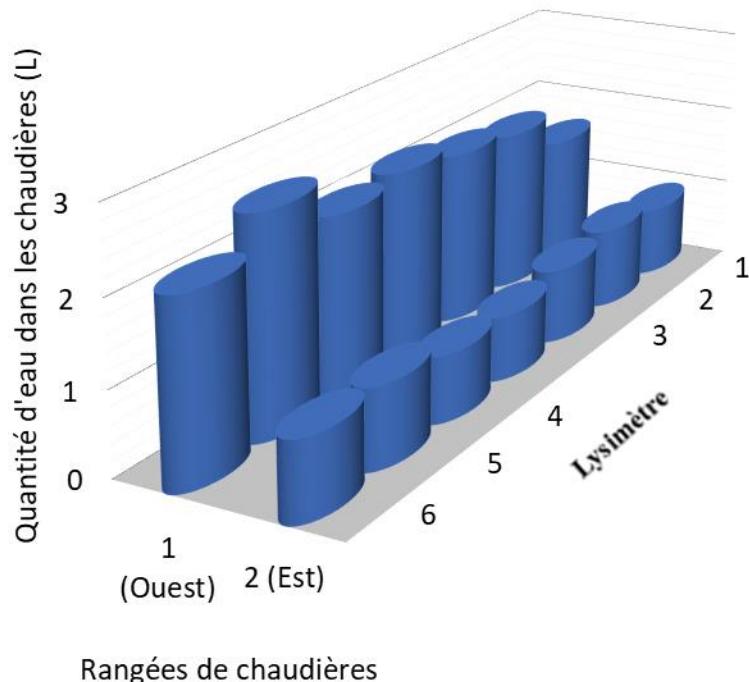


Figure 4.20 Volumes d'eau totaux mesurés dans les chaudières placées à la surface de la halde expérimentale pendant l'essai d'infiltration I-E (19 septembre 2017).

Couche de roches stériles concassées

Les mesures de TEV dans la couche de roches stériles concassées n'ont pas pu être calibrées (section 3.2). Néanmoins, les variations de TEV en fonction du temps permettent d'estimer la vitesse d'infiltration du front de mouillage sous la surface de la CCE. Le comportement hydrogéologique de la roche stérile concassée semblait uniforme sur l'ensemble de la CCE. Le front de mouillage suite à l'essai d'infiltration a atteint la profondeur de 0,25 m dans la roche stérile concassée après environ 1,25 heure (figure 4.21). Ce premier front de mouillage a été suivi par un sommet d'environ 6 heures durant laquelle les TEV fluctuaient faiblement ($\pm 0,01$). La hausse maximale de TEV induite par cet essai était comprise entre 0,047 et 0,075. La baisse des valeurs de TEV initiales se passaient au moins 3 jours après le début de l'essai pour toutes les sondes. La sonde AC Lys 5 n'a enregistré aucune valeur pendant la durée de l'essai.

L'augmentation de TEV dans la roche stérile concassée était sensiblement plus faible lors de l'essai I-E que dans l'essai I-C ce qui concorde avec les volumes d'eau plus faibles appliqués au sommet de la halde (28,0 m^3 pour l'essai I-C contre 12,8 m^3 pour l'essai I-E). Le temps d'arrivé du front de mouillage de l'essai I-E à la hauteur des sondes dans la roche stérile concassée (AC) était de 15 à 30 minutes plus long que le premier front de l'essai I-C.

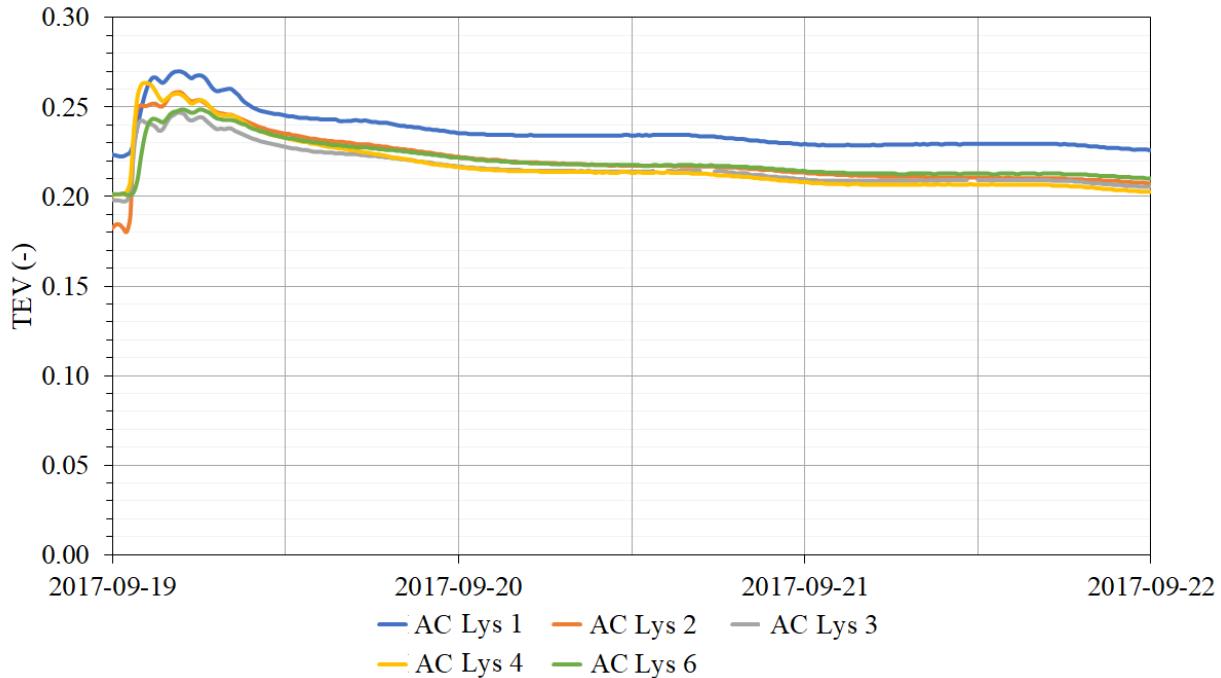


Figure 4.21 Variations de TEV dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable CCE) au sommet de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E. Les mesures de TEV dans la roche stérile concassée n'ont pas pu être calibrées et que les valeurs mesurées doivent donc être considérées avec précaution. La sonde AC Lys 5 n'a enregistré aucune valeur pendant l'essai.

Couche de sable de la CCE

Les mesures de TEV dans le sable de la CCE ont été corrigées selon l'approche présentée à la section 3.2 (calibration de terrain). Les TEV initiales dans le sable au début de l'essai d'infiltration, 50 cm sous la surface de la halde (20 cm sous la couche de stériles concassés), étaient comprises entre 0,064 et 0,084 (figure 4.22). Ces valeurs étaient relativement faibles en raison de la présence de la toile imperméable installée à la surface de la halde pendant l'été précédent l'essai (16 juin et le 15 septembre 2017, section 3.3.2). Ces valeurs de TEV initiale *in situ* étaient cependant plus élevées que la TEV résiduelle du sable caractérisé au laboratoire ($\theta_r = 0,04$; Bréard Lanoix, 2017). Le temps d'arrivée du front de mouillage dans le haut de la couche de sable était compris entre 3 heures et 9,5 heures après le début de l'essai d'infiltration. Le sommet observé dans la roche stérile concassée à la suite de l'arrivée du front de mouillage

n'a pas été observé dans le sable. Les augmentations de TEV induites par l'essai étaient comprises entre +0,006 et +0,065 (soit une hausse comprise entre +2 % (S_r de 20%) et +22 % (S_r de 40%) en termes de degré de saturation). Les TEV après le passage du front de mouillage tendaient vers des valeurs légèrement plus élevées que les valeurs initiales, après 5 jours de drainage. La diminution de TEV s'est produite essentiellement dans les 30 heures suivant le maximum de TEV, sauf pour la sonde SW-H Lys 5 qui a montré un comportement différent. Les trois sondes de TEV ont donné des réponses très différentes suite à l'essai d'infiltration I-E et n'ont pas permis de corrélérer les réponses hydrogéologiques avec leur position dans la pente. Les réponses différentes étaient potentiellement dues aux différences de porosité et d'épaisseur dans la couche de sable.

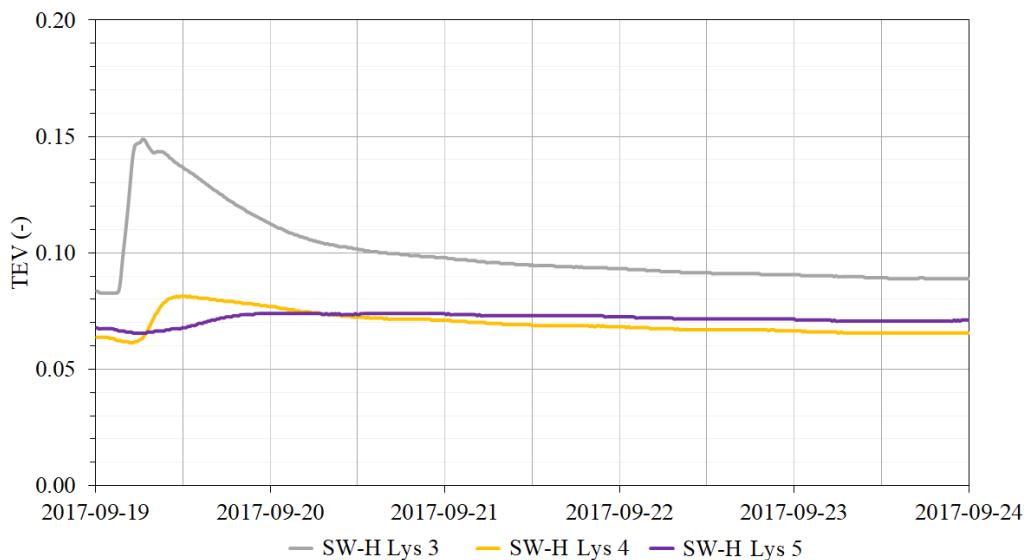


Figure 4.22 Variations de TEV dans le haut de la couche de sable de la CCE (0,5 m sous la surface de la halde; 20 cm sous la surface de la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E. Note : Les sondes SW-H Lys 1, SW-H Lys 2 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.

Les TEV mesurées dans le bas de la couche de sable, 80 cm sous la surface de la halde (20 cm au-dessus des stériles) avant le début du test d'infiltration E, étaient comprises entre 0,078 et 0,110 (figure 4.23). Ces valeurs initiales ne montraient pas de tendance claire selon leur position

dans la pente. Par exemple, les TEV mesurées au-dessus des lysimètres 2 et 4 (SW-b Lys 2 et 4) étaient plus élevées (+0,03) qu'au-dessus des autres lysimètres. Le front de mouillage a atteint le bas de la couche de sable entre 8,5 heures et 20,5 heures après le début de l'essai d'infiltration I-E sans lien apparent avec la position dans la pente. L'augmentation de TEV induite par l'essai était comprise entre +0,007 et +0,026. Les TEV dans le bas de la couche de sable sont restées relativement constantes (-0,002) pendant les 5 jours suivant l'essai d'infiltration à l'exception de la sonde SW-b Lys 6 qui a diminué d'environ -0,017.

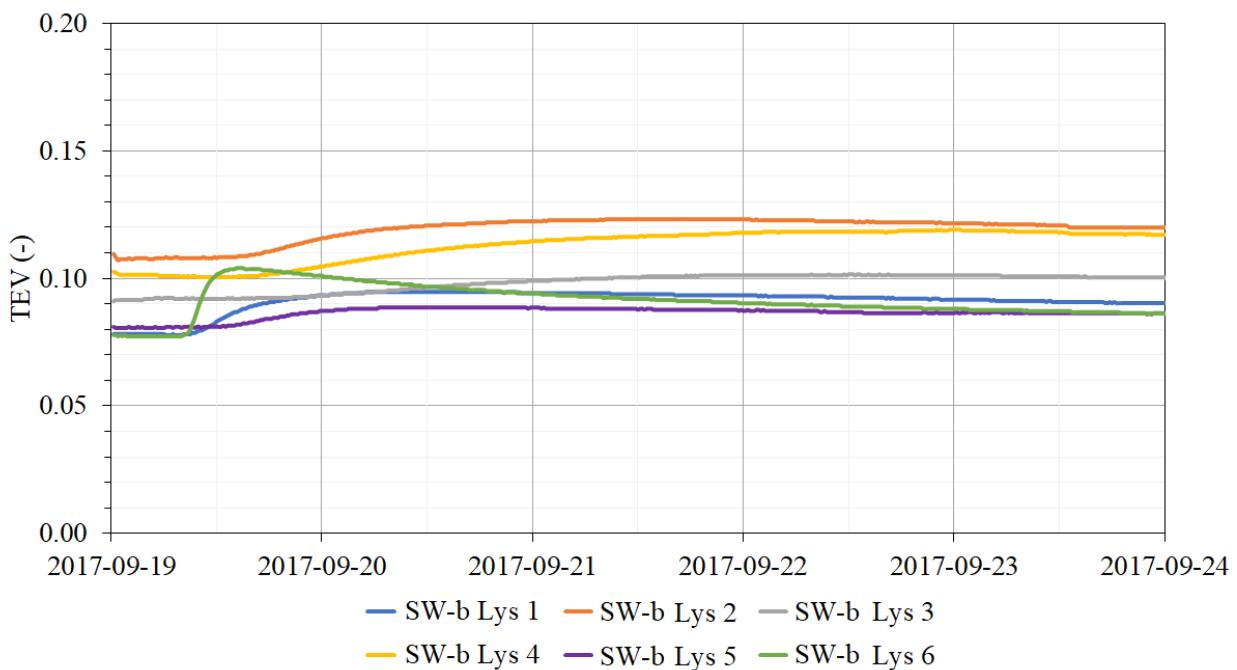


Figure 4.23 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E.

Les TEV ont été mesurées simultanément dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE au-dessus des lysimètres 4 et 5 (des mesures manquaient pour le haut de la couche de sable (SW-H)). Les TEV étaient, de façon générale, sensiblement plus élevées dans le bas de la couche de sable (0,103 et 0,081 pour SW-b Lys 4 et SW-b Lys 5 respectivement) que dans le haut (0,064 et 0,068) (figure 4.24), ce qui semblait indiquer une certaine accumulation d'eau en profondeur,

proche de l'interface avec les stériles. L'arrivée du front de mouillage dans le bas de la couche de sable se produit en moyenne 8 heures plus tard que dans le haut de la couche. L'augmentation de TEV induite par le test était similaire dans le haut et le bas de la couche de sable (+0,02 pour les sondes SW-H Lys 4 et SW-b Lys 4 et +0,01 pour SW-H Lys 5 et SW-b Lys). Le temps d'influence de l'essai était plus court dans le haut de la couche de sable (environ 2 jours) que dans le bas (de 4 à plus de 6 jours).

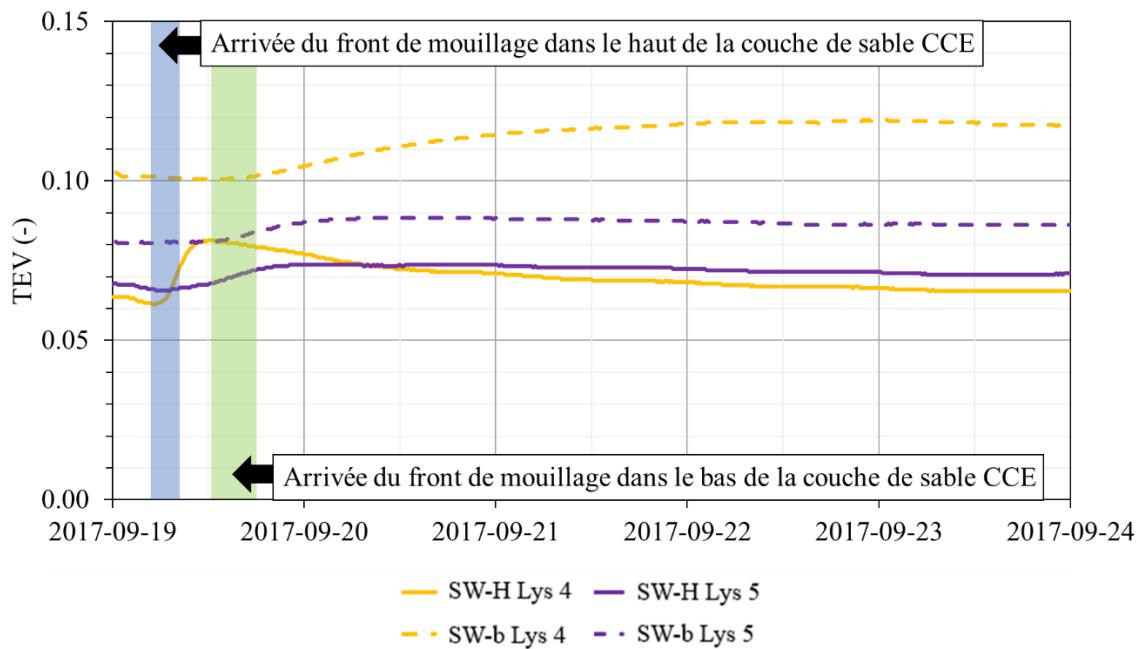


Figure 4.24 Variations de TEV mesurées dans le haut et le bas de la couche de sable au-dessus des lysimètres 4 et 5 pendant les 6 jours suivant l'essai d'infiltration I-E. Les temps d'arrivée moyens du front de mouillage sont indiqués pour le haut et le bas de la couche de sable.

Les valeurs de TEV initiales étaient environ 15 % plus faibles dans le haut de la couche de sable et 20 % à 25 % dans le bas de cette même couche lors de l'essai I-E que lors de l'essai I-C, ce qui reflète l'effet de la toile imperméable (section 3.3.2). L'arrivée du front de mouillage a été généralement plus rapide lors de l'essai I-C (entre 1,25 heure et 6 heures) que lors de l'essai I-E (entre 3 heures et 9,5 heures). L'augmentation moyenne de TEV était également légèrement plus faible lors de l'essai I-E (+0,030) que pour l'essai I-C (+0,063). Un phénomène semblable a été

observé dans le bas de la couche alors que la variation de TEV induite par l'essai I-C était environ 70% plus élevée que celle de l'essai I-E. Les sondes ont montré des comportements très différents d'un essai à l'autre; par exemple la sonde SW-H Lys 4 a montré une réaction de grande ampleur lors de l'essai I-C alors que cette même sonde a réagi plus faiblement à l'essai I-E (en comparaison avec les autres sondes installées à une profondeur similaire). Le retour aux valeurs de TEV initiales après l'essai était plus rapide pour l'essai I-C (environ 2 à 5 jours) que pour l'essai I-E (plus de 5 jours).

Stériles

Les mesures de TEV dans les stériles sous la CCE n'ont pas pu être corrigées (section 3.2), mais les résultats donnent néanmoins quelques informations sur l'écoulement de l'eau sous la CCE. Seules les sondes au-dessus des lysimètres 1, 4 et 5 ont enregistré des (faibles) variations de TEV durant l'essai d'infiltration à grande échelle I-E. Le front de mouillage a été observé dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous la CCE) entre 12 heures et 24 heures après le début de l'essai (Annexe I). Les hausses de TEV étaient comprises entre 0,004 (WR-H Lys 4) et 0,048 (WR-H Lys 2) (soit de 2% à 24% en termes de degrés de saturation) et ne montraient pas de corrélation particulière avec la position dans la pente de la halde. Les augmentations de TEV étaient généralement très faibles et ces dernières sont demeurées constantes au cours des 7 jours suivant leur hausse.

L'arrivée du front de mouillage dans les stériles 1,3 m sous la surface (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la CCE) a été enregistrée entre 14 heures et 2 jours après le début de l'essai (Annexe I). Les variations de TEV à la suite de l'essai d'infiltration I-E étaient à peine perceptibles pour la plupart des sondes. Les faibles augmentations de TEV observées (de +0,004 pour WR-b Lys 5 à +0,027 pour WR-b Lys 2) demeurent ensuite constantes pour les 5 jours suivant l'essai.

L'augmentation maximale de la TEV dans le haut des stériles était plus faible pour l'essai I-E (+0,07) que pour l'essai I-C (+0,16). Les variations de TEV dans les stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la CCE) lors de l'essai I-E étaient aussi plus faibles (+0,02) que dans l'essai I-C (+0,04). L'arrivée du front de mouillage dans le haut des stériles (aux profondeurs de 1,1 m et 1,3 m sous la surface de la halde) lors de l'essai I-E était entre 6,25 heures et

13,25 heures plus tardive que dans l'essai I-C. De façon générale, l'effet de l'essai d'infiltration à grande échelle sur le comportement hydrogéologique des stériles était plus perceptible pour l'essai I-C que pour l'essai I-E.

Lysimètres

Les TEV mesurées dans le sable des lysimètres n'ont pas pu être calibrées et aucune variation de TEV n'a été enregistrée dans cette dernière pour la période de 5 jours suivant l'essai d'infiltration I-E. Le front de mouillage dû à l'essai d'infiltration n'a donc pas été détecté sous les stériles pendant cette période. En comparaison, les augmentations de TEV dans le sable des lysimètres dues à l'essai I-C étaient comprises entre +0,04 et +0,12.

Débits de sortie

Les mesures manuelles réalisées dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-E montraient de façon générale une augmentation importante du débit à la sortie du lysimètre 6 alors que les autres lysimètres montraient des variations presqu'imperceptibles (figure 4.25). Les débits n'ont pu être mesurés manuellement durant la fin de semaine du 23 et 24 septembre 2017 (tirets dans la figure 4.25) et les mesures automatisées (débitmètres) n'étaient pas assez fiables pour interpoler plus précisément l'évolution des débits de sortie (voir aussi discussion à la section 4.3.1). Les mesures de débits instantanés et cumulés les plus importants ont été mesurées dans le lysimètre 6 et les plus faibles dans le lysimètre 1. Le lysimètre 6 a été le premier à enregistrer une augmentation de débit (des hausses de +19 mL/min) dans les 20 premières heures suivant le début de l'essai d'infiltration ce qui n'a pas été observé dans le sable des lysimètres (aucune variation de TEV; annexe I). Les lysimètres 4 et 5 ont enregistré une petite augmentation de débit (+12 mL/min, +4 mL/min respectivement) quelques jours plus tard, entre le 25 et le 26 septembre. Les débits dans les lysimètres 1 à 3 sont restés constants pendant toute la période (0 mL/min, 15 mL/min et 35 mL/min respectivement).

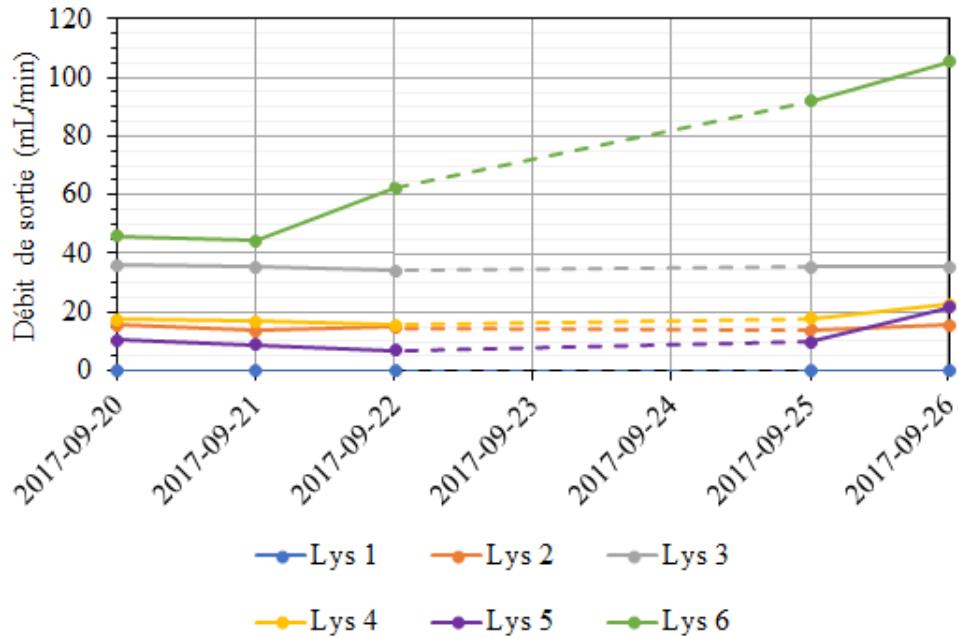


Figure 4.25 Débits mesurés manuellement à la sortie des lysimètres à la suite de l'essai d'infiltration I-E et dans les 6 jours suivant. Les courbes pointillées représentent une approximation des valeurs durant la fin de semaine du 23 et 24 septembre 2017.

La quantité d'eau totale récupérée pour chaque lysimètre pendant les 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-E a été calculée à partir de la moyenne journalière des mesures manuelles (les mesures des 23 et 24 septembre 2017 ont été interpolées). Ces valeurs ont été comparées aux 12,8 m³ d'eau appliqués à la surface de la halde expérimentale au cours de l'essai I-E (figure 4.26). Le taux de récupération total a atteint 14% à la fin de la période de 7 jours. Le reste de l'eau était soit en train de s'écouler à travers les stériles, soit encore retenu dans les matériaux de la halde et de la CCE ou perdu par évaporation ou par des écoulements à l'extérieur des lysimètres. La récupération augmentait relativement constamment d'une journée à l'autre (+2% par jour).

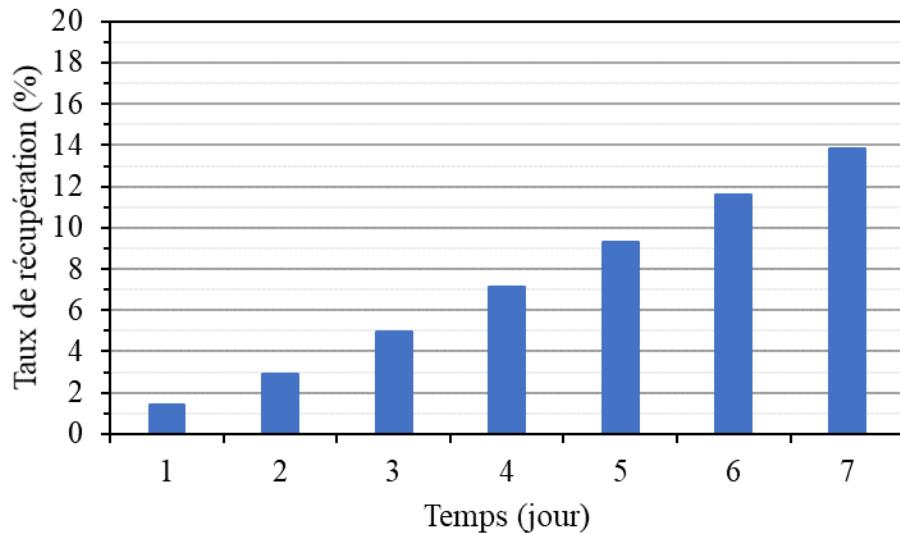


Figure 4.26 Taux de récupération du volume infiltré lors de l'essai I-E sur une période de 7 jours (20 juin 2017 au 26 juin 2017).

Les variations dans les mesures moyennes de débit par jour (figure 4.27). Le cumul des débits totaux était de $1,8 \text{ m}^3$ 7 jours après l'essai d'infiltration et le lysimètre 6 comptait pour 51% de ce total (les mesures des 23 et 24 septembre 2017 ont été interpolées). La proportion du lysimètre 6 était donc 3 fois plus grande que la répartition normale par lysimètre en fonction de la surface (~17% chacun). Cette proportion passait à 60% lors de l'ajout des débits cumulés du lysimètre 5. À ce moment, 60% des débits étaient enregistrés dans 33% des lysimètres. Les débits cumulés des autres lysimètres n'ont pas montré de lien apparent avec leur position sous la pente à l'exception du lysimètre 1 pour lequel aucun débit n'a été enregistré.

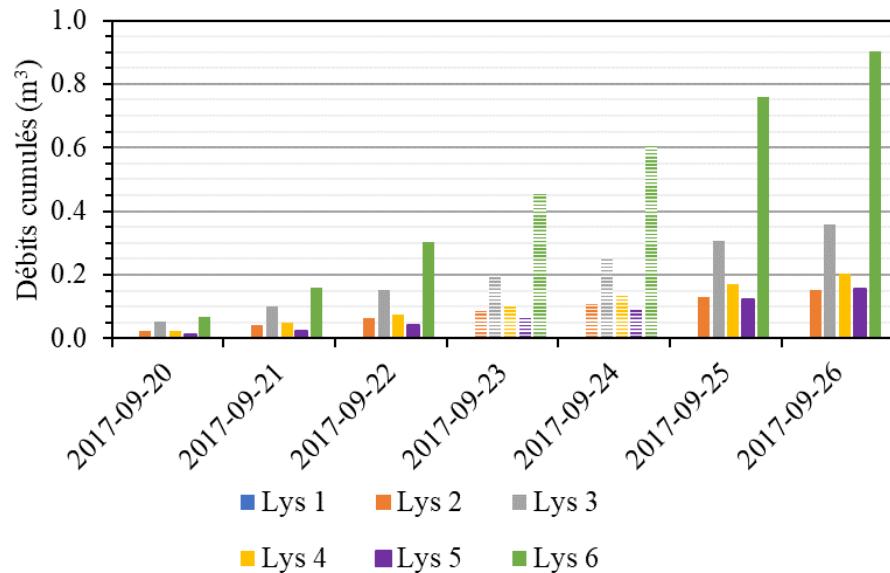


Figure 4.27 Taux de récupération, par lysimètre, des débits cumulés dans la semaine suivant l'essai d'infiltration I-E (19 septembre 2017 au 26 septembre 2017). Les histogrammes lignés représentent les jours pour lesquels les débits de sortie ont été interpolés.

Seul le lysimètre 6 semble avoir enregistré une augmentation de débit significative lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E, alors que l'augmentation de débit était générale à l'échelle de la halde lors de l'essai I-C (figure 4.19). De plus, la hausse de débit mesuré dans le lysimètre 6 lors de l'essai I-C était cinq fois plus importante que celle enregistrée après l'essai I-E (environ +450 mL/min et +60 mL/min respectivement). Le taux de récupération (après sept jours) du volume d'eau infiltré à la suite de l'essai I-C était trois fois supérieur à celui de l'essai I-E (45% contre 14%). Cet écart est probablement dû aux conditions initiales très sèches de l'essai I-E (cet essai a fait suite à l'imperméabilisation de la halde durant l'été précédent). Les débits de sortie suivant l'essai I-E n'ont pas montré de relation claire entre la position des lysimètres sous la pente et leur répartition (sauf pour les lysimètres 1 et 6) alors que ceux de l'essai I-C ont montré une telle relation.

4.3.3 Représentativité des moyennes de TEV

Les courbes moyennes de TEV dans la couche de roches stériles d'anorthosite concassée et dans la couche de sable ont été utilisées pour faire ressortir des tendances lors des essais infiltration à grande échelle et des événements de précipitation, notamment en termes d'avancée de front de mouillage. Cette approche permet notamment de pallier (en partie) au manque de données pendant certains essais et à certains endroits de la halde (absence de mesures, comportement variable d'une sonde à l'autre, sans corrélation avec la position dans la pente). Ces courbes moyennes ont été utilisées uniquement pour fins de comparaison et de calibration des simulations numériques. Les résultats dans le bas de la couche de sable en particulier pourraient être influencés par les effets de pente (surtout en bas de pente, au-dessus des Lysimètres 5 et 6) mais la variabilité des mesures ne permet pas de dégager de tendances claires. Les données complètes sont présentées aux Annexes J, K, L, M et N.

La courbe des valeurs moyennes de TEV dans le haut et le bas de la couche de sable à la suite de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017) a été calculée à partir des résultats de chaque sonde (SW-H Lys 3 à SW-H Lys 5; figure 4.28) (SW-b Lys 1 à SW-b Lys 6; figure 4.29). Un intervalle de $\pm 0,03$ a été considéré afin de prendre en compte l'incertitude des mesures des sondes GS3 (section 3.2). Le calcul de cette moyenne est justifié par le fait qu'aucune tendance n'a été observée selon la position dans la halde.

Les résultats indiquent que la courbe moyenne représente bien le comportement hydrogéologique dans la couche de sable. Ainsi, les trois pics d'infiltration liés à chacune des phases d'arrosage sont clairement visibles et l'augmentation rapide puis la diminution progressive des TEV suivent une tendance similaire aux résultats de chaque sonde prise individuellement. Il apparaît également que les mesures de chaque sonde sont généralement comprises dans l'intervalle d'incertitude de la TEV moyenne (bande bleue dans la figure 4.28). Cette incertitude de TEV de 0,03 ne s'applique pas aux variations mais bien aux valeurs absolues.

Ainsi, seule la courbe moyenne de TEV dans le sable est présentée par la suite, afin d'alléger les figures et de permettre une meilleure comparaison des résultats des simulations numériques (qui ne montrent pas non plus de tendances spatiales particulières, voir section 5.1) avec les mesures de terrain. L'ensemble des résultats (pour chaque sonde) sont disponibles aux Annexes J, K, L, M et N.

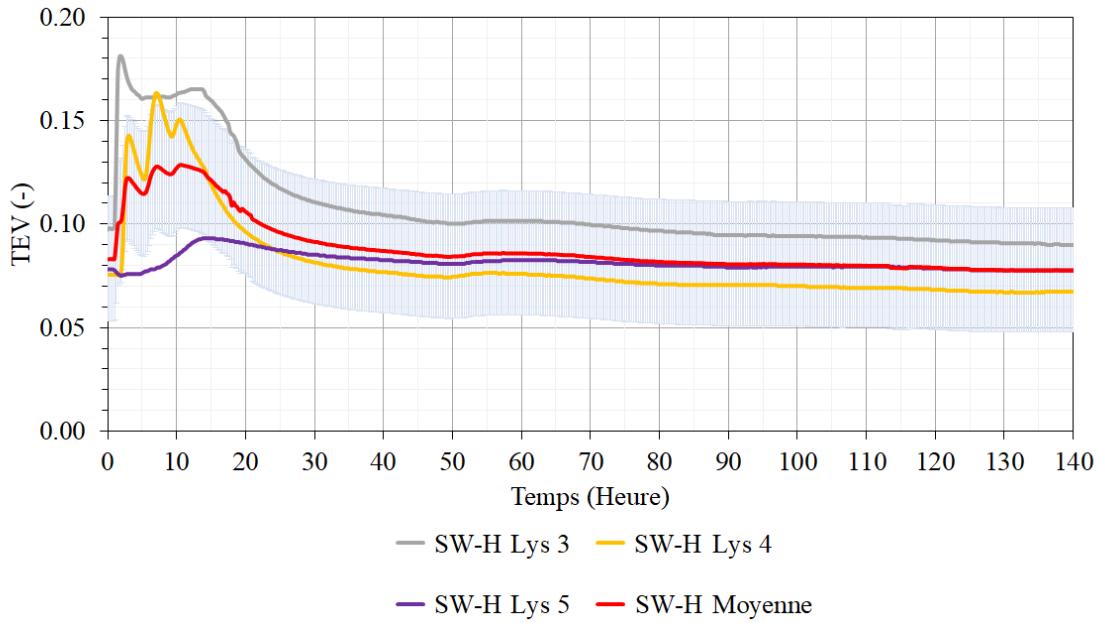


Figure 4.28 Résultats de TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface de la halde, 20 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les courbes sont comparées à la moyenne des résultats \pm la marge d'erreur de la sonde ($\pm 0,03$). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

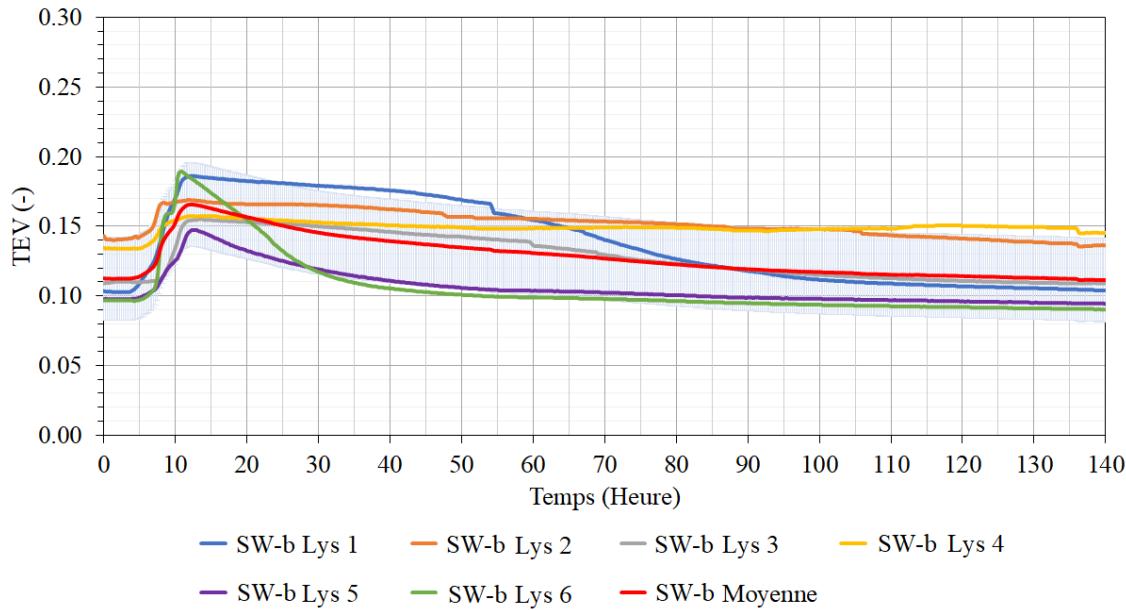


Figure 4.29 Résultats de TEV dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-C. Les courbes sont comparées à la moyenne des résultats \pm la marge d'erreur de la sonde (0,03). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

4.3.4 Résultats des essais d'infiltration à grande échelle I-A, I-B et I-D

L'analyse des essais d'infiltration à grande échelle I-A, I-B et I-D s'est concentrée sur les mesures de TEV dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE (sondes SW-H et SW-b). L'ensemble des résultats de TEV sont disponibles aux Annexes J, K et L. Le volume d'eau appliqué dans le cadre de ces essais a été calculé à partir de la hauteur d'eau dans les chaudières disposées sur la halde, comme pour les essais C et E.

L'essai I-A a été réalisé en deux phases d'arrosage de 45 minutes entrecoupées d'une pause de 2,5 heures. Un total de $8,6 \text{ m}^3$ d'eau a été appliqué sur la halde (équivalent à une précipitation de 14 mm) en 3,25 heures (en incluant la pause) (tableau 4.5). Les TEV initiales étaient de l'ordre de 0,087 dans le haut de la couche de sable et de 0,115 dans le bas (figure 4.30). La TEV initiale dans le bas de couche était la plus élevée enregistrée parmi tous les essais d'infiltration à grande échelle réalisés sur la halde (tableau 4.5) et semblait indiquer que l'essai I-A (17 septembre 2016) suivait une période plus humide sur le site de la mine. Le front de mouillage a été observé par les

sondes SW-H environ 2,5 heures après le début de l'essai alors que les sondes SW-b ont enregistré ce même front 5 heures plus tard (7,5 heures après le début de l'essai). La hausse de TEV induite par le front de mouillage était de +0,017 dans le haut de la couche de sable et de +0,004 dans le bas. Le temps total d'influence de l'essai était similaire pour les deux sondes, soit environ 51 heures. Cet essai n'a pas été retenu pour la calibration des simulations numériques, car les variations de TEV induites par l'essai étaient inférieures à la marge d'incertitude des sondes utilisées ($\pm 0,03$; section 3.2).

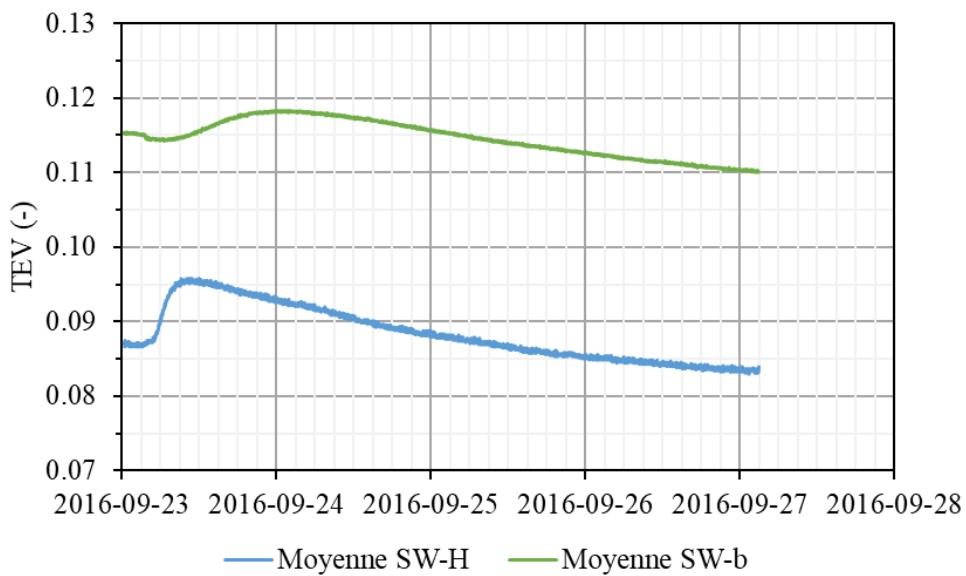


Figure 4.30 Valeurs de TEV moyennes mesurées dans le haut de la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, soient respectivement 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-A.

L'essai I-B a été réalisé en une seule phase d'arrosage de 62 minutes, sans pause. Un total de 6,4 m³ d'eau a été appliqué sur la halde (équivalent à une précipitation de 11 mm) en un peu plus d'une heure. Les TEV initiales étaient de 0,090 dans le haut de la couche de sable et 0,108 dans le bas (figure 4.31). Le front de mouillage a été observé par les sondes SW-H (haut de la couche) environ 2 heures après le début de l'essai et 7 heures plus tard dans le bas de la couche (SW-b) (soit 9 heures au total après le début de l'essai). La hausse de TEV induite par le front de mouillage était de +0,013 dans le haut de la couche de sable et semblait être de +0,002 dans le

bas. Le temps total d'influence de l'essai n'a pas pu être enregistré (problème d'enregistrement des sondes deux jours après le début de l'essai). Par contre, la TEV dans le haut de la couche (SW-H) a diminué d'environ -0,010 sur une période de 39 heures (à partir de la TEV maximale atteinte) alors qu'aucune diminution n'a été enregistrée dans le bas de la couche de sable (SW-b) durant la même période. Cet essai n'a pas été retenu pour la simulation numérique, car les variations de TEV induites par l'essai étaient inférieures à la marge d'incertitude des sondes utilisées ($\pm 0,03$; section 3.2).

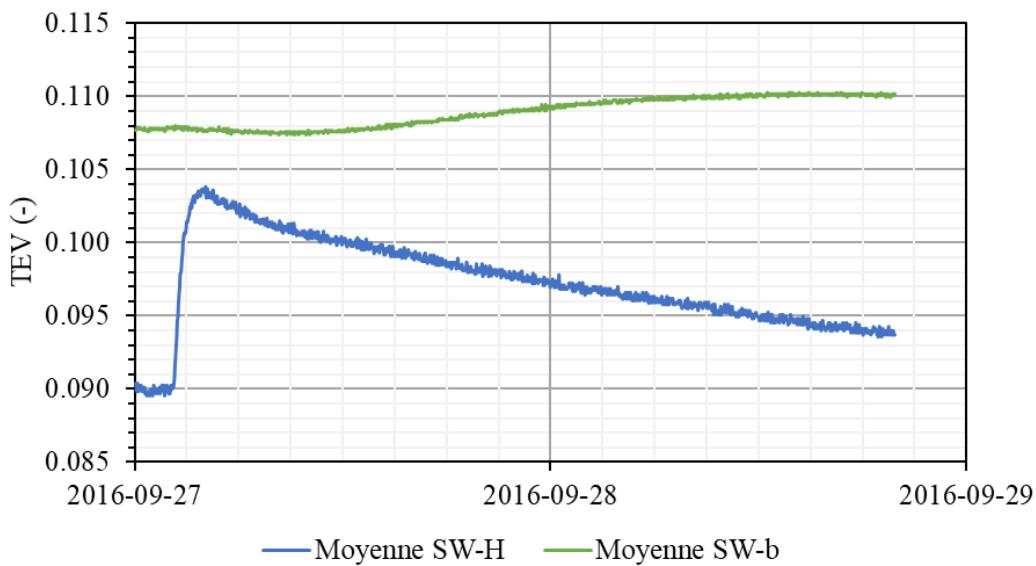


Figure 4.31 Valeurs de TEV moyennes dans le haut et le bas de la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-B.

L'essai I-D a été réalisé en trois phases d'arrosage de 120, 110 et 68 minutes entrecoupées de deux pauses d'une durée de 150 et 180 minutes. Un total de $16,8 \text{ m}^3$ d'eau a été appliqué sur la halde (équivalent à une précipitation de 28 mm) en 9,5 heures (en incluant les pauses). Les TEV initiales étaient de 0,078 dans le haut de la couche de sable et 0,110 dans le bas de cette dernière (figure 4.32). Le front de mouillage a été observé dans le haut de la couche de sable (SW-H) environ 3 heures après le début de l'essai alors que le même front a été enregistré 5 heures plus tard (8 heures au total) dans le bas de la couche de sable (SW-b). La hausse de TEV induite par le

front de mouillage était de +0,027 dans le haut de la couche de sable et de +0,014 dans le bas de cette même couche. Le temps total d'influence de l'essai était d'environ 6 jours pour le haut (SW-H) et 5 jours pour le bas de la couche de sable (SW-b). Les TEV tendaient ensuite vers des valeurs plus basses que les valeurs initiales pour la période de 16 jours suivant l'essai I-D. Ces observations ont été rendues possibles par l'installation de la membrane faiblement perméable (section 3.3.2). Les hausses de TEV dans le haut de la couche de sable (SW-H) attribuable à deux des trois phases de l'essai étaient distinguables par des pics dans la figure 4.32 tout comme pour l'essai I-C (section 4.3.1).

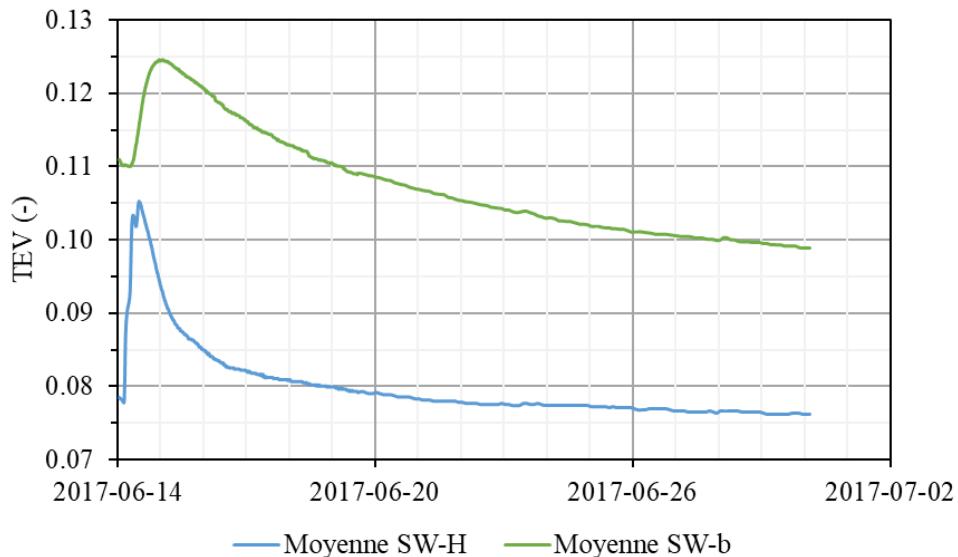


Figure 4.32 Valeurs de TEV moyennes de TEV dans la couche de sable (0,5 m et 0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm et 50 cm sous la surface du sable) dans les jours suivant l'essai d'infiltration I-D.

Les principaux résultats des essais d'infiltration sont regroupés dans le tableau 4.5. Les TEV initiales des essais étaient comprises entre 0,071 et 0,090 dans le haut de la couche de sable (SW-H) et de 0,090 à 0,115 pour le bas (SW-b). La TEV initiale lors des essais A et B a entraîné une progression plus rapide du front de mouillage que lors des essais D et E qui étaient pourtant plus volumineux (de 40% à 160% plus importants). La hausse de TEV induite par le passage du

front de mouillage était toutefois directement proportionnelle à la quantité d'eau appliquée sur la halde pendant les essais.

L'ensemble des temps d'arrivées des fronts de mouillage pour chaque sonde et chaque essai d'infiltration à grande échelle sont présentés à l'annexe D.

Tableau 4.5 Résumé de l'influence des essais d'infiltration sur les sondes de teneur en eau dans la couche de sable de la CCE.

Essai	Temps d'atteinte		TEV initiale (-)		Variation de TEV		Temps	
	du front de mouillage				(-)		d'influence de l'essai	
Sonde	Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas
I-A	2h30m	7h30m	0,087	0,115	0,017	0,004	2j3h	2j3h
I-B	2h	9h	0,090	0,108	0,013	0,002	N/D*	N/D*
I-C	1h	4h	0,084	0,113	0,050	0,050	2j	5j
I-D	3h	8h	0,078	0,110	0,027	0,014	6j	5j
I-E	4h	9h	0,071	0,090	0,024	0,013	N/D*	N/D*

*Les valeurs de TEV n'étaient pas disponibles pour identifier la fin de l'influence de l'essai.

4.4 Teneurs en eau volumique naturelle dans la halde expérimentale

L'instrumentation dans la halde expérimentale a permis la mesure des TEV en continu depuis la fin de la construction de la halde expérimentale en novembre 2015 (figure 4.33 et 4.34) jusqu'à août 2017. Les courbes présentées dans cette section correspondent aux moyennes des TEV dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE (voir aussi section 4.3.3 sur le calcul des moyennes de TEV).

De façon générale, les variations de TEV dans la CCE étaient bien corrélées aux événements de précipitation (figure 4.33). Les TEV augmentaient peu de temps après chaque événement de précipitation, et plus les précipitations étaient importantes et/ou rapprochées, plus l'augmentation de TEV était importante et rapide. Pendant les deux années de suivi, la TEV était généralement maximale à la fin du printemps (fonte des neiges) et atteignait 0,19 pour le haut de la couche de sable et 0,18 pour le bas (soit environ 51% et 49% en termes de degré de saturation). La vitesse de diminution de la TEV après une précipitation était relative à l'ampleur de la hausse et aux précipitations subséquentes. Durant les mois d'été et d'automne, la valeur moyenne dans le haut et le bas de la couche de sable était d'environ 0,09 et 0,11 respectivement (soit un degré de saturation d'environ 24% et 29% respectivement). Durant les mois d'hiver, la TEV non gelée diminuait et atteignait des valeurs proches de 0 dans le haut de la couche de sable. Elle restait légèrement plus élevée ($\approx 0,04$) dans le bas de la couche de sable. Les variations de TEV dans les stériles étaient similaires à celles observées dans la couche de sable de la CCE. Selon les cas, les augmentations étaient plus ou moins importantes mais elles étaient toujours liées aux événements de précipitation (figure 4.34). Une diminution de TEV dans les roches stériles était également observée durant les mois d'hiver (de façon plus ou moins importante selon la sonde).

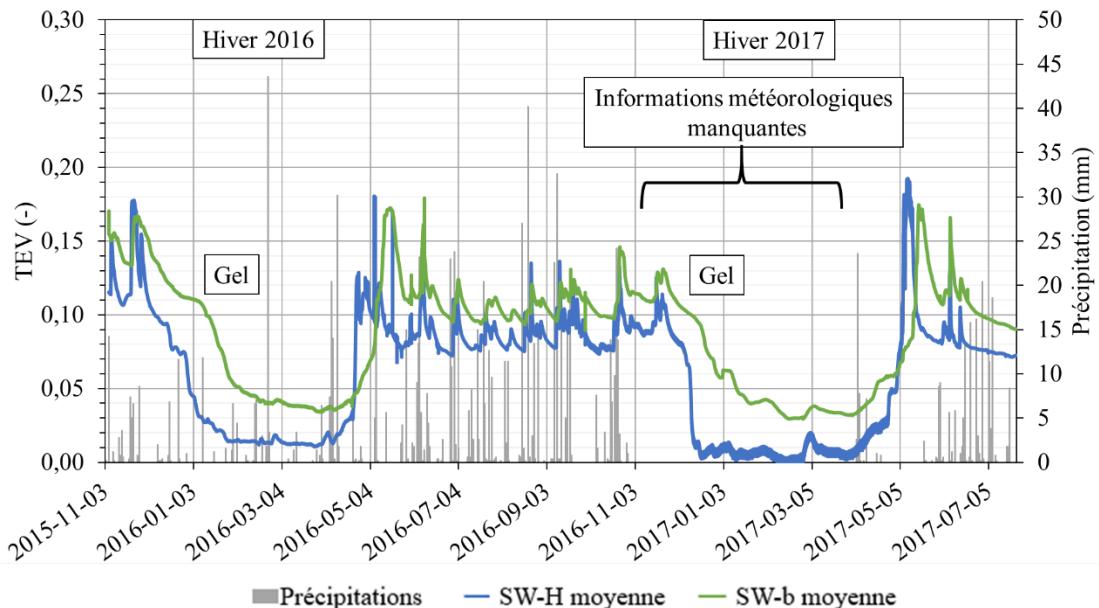


Figure 4.33 Variations de TEV dans le sable de la CCE et précipitations enregistrées sur le site de la mine du Lac Tio entre novembre 2015 et juillet 2017.

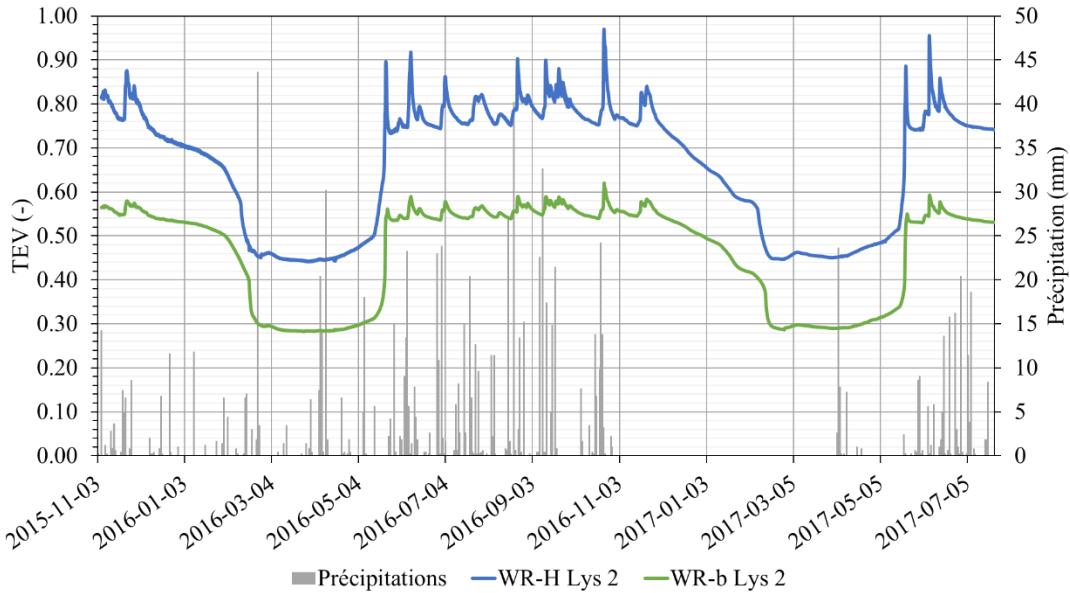


Figure 4.34 Variations de TEV dans le haut des stériles et précipitations enregistrées sur le site entre novembre 2015 et juillet 2017. On rappelle ici que les mesures de TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et que les valeurs mesurées doivent donc être considérées avec précaution.

4.4.1 Analyse des événements de précipitation intenses

Deux événements de précipitation ont été sélectionnés et isolés (section 3.3.3) afin d'évaluer la réponse hydrogéologique de la CCE à des événements de précipitations intenses réels. Ces résultats viennent compléter les essais d'infiltration à grande échelle. Les résultats présentés correspondent aux moyennes des valeurs mesurées par les sondes de TEV dans la couche de sable. L'ensemble des TEV mesurées sont disponibles aux Annexes M et N.

Précipitation du 2016-06-06 au 2016-06-13

Durant la période de précipitation P1 du 6 au 14 juin 2016, 53 mm de pluie ont été enregistrés. Sur l'ensemble de la halde, cette hauteur d'eau équivaut à 32 m^3 . La teneur en eau initiale dans le bas de la couche de sable (0,110) était plus élevée que dans le haut (0,085) (figure 4.35 et tableau 4.6). Le front de mouillage a atteint le haut de la couche de sable (SW-H) 7 heures après le début des précipitations puis le bas de la couche (SW-b) 11 heures plus tard (soit 18 heures après le début des précipitations). La hausse de TEV due à l'essai était en moyenne de +0,057 pour la

courbe SW-H et de +0,050 pour SW-b. Le temps d'influence de l'événement de précipitation était similaire dans le haut et le bas de la couche de sable et environ de 7 jours.

Cet événement de précipitation était d'une envergure similaire à l'essai d'infiltration I-C (32 m^3 et 28 m^3 respectivement). Cependant, les précipitations de cet événement ont été étalées sur une période de 3 jours alors que l'essai d'infiltration n'a duré qu'une dizaine d'heures. Cette différence d'intensité a entraîné une augmentation des TEV pendant 3 jours lors de l'événement P1 alors que l'augmentation des TEV de l'essai I-C n'a duré au maximum qu'une journée. Les augmentations de TEV observées dans l'événement P1 et dans l'essai I-C étaient similaires (soit respectivement 0,054 et 0,050 en moyenne) malgré des temps de réponse différents.

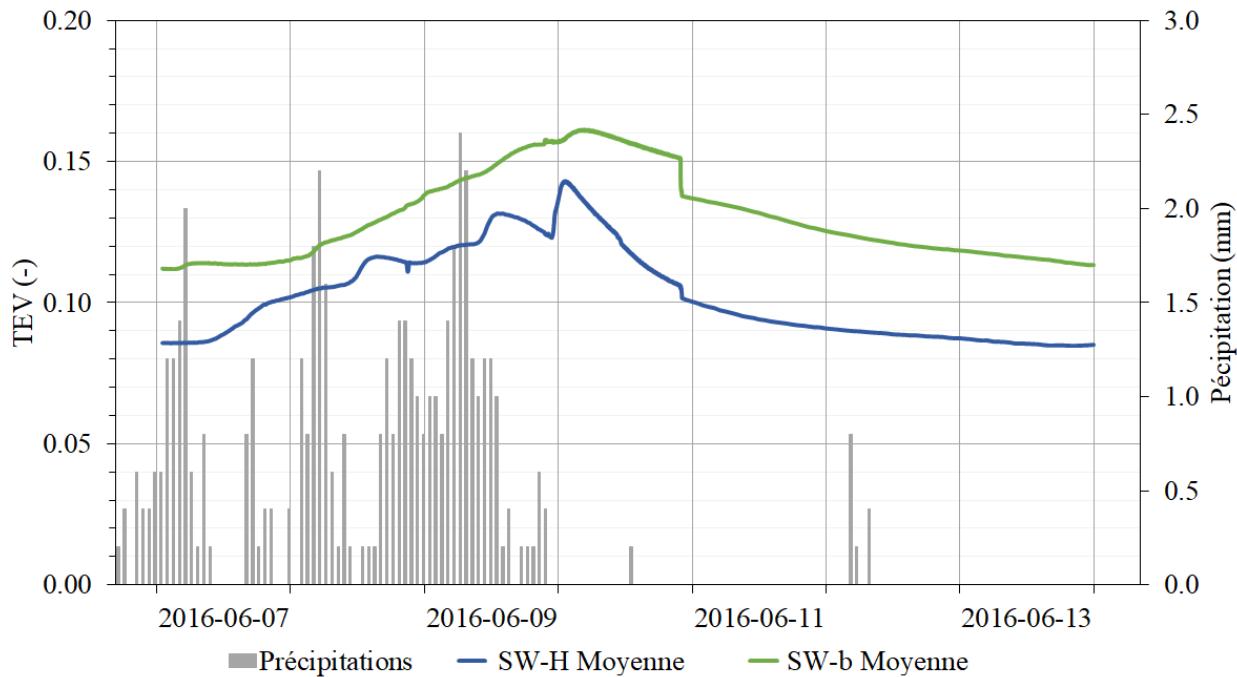


Figure 4.35 Variations de TEV suite à l'événement P1 (du 6 juin 2016 et le 14 juin 2016) dans le haut et le bas de la couche de sable de la CCE.

Précipitation du 2016-08-07 au 2016-08-09

Durant la période de précipitation P2 du 7 au 9 août 2016, 25 mm de pluie ont été enregistrés. Sur l'ensemble de la halde, cette hauteur d'eau équivaut à 15 m^3 . La teneur en eau initiale dans le bas de la couche de sable (0,096) était plus élevée que dans le haut de cette même couche (0,079) (figure 4.36 et tableau 4.6). Le front de mouillage a atteint le haut de la couche de sable (SW-H) 30 heures après le début des précipitations et il a ensuite atteint le bas de la couche (SW-b) 18 heures plus tard (48 heures au total). La hausse de TEV due à l'essai était de +0,011 pour SW-H et de +0,007 pour SW-b. Le temps d'influence de l'essai du haut de la couche de sable (SW-H) était de 96 heures et était de 168 heures (7 jours) pour le bas de la couche de sable (SW-b).

Cet événement de précipitation était d'une envergure similaire à l'essai d'infiltration I-E (15 m^3 et 12 m^3 respectivement). Cependant, les précipitations de cet événement ont été étalées sur une période de 3 jours alors que l'essai d'infiltration n'a duré que 4,25 heures. Cette différence d'intensité a induit une augmentation des TEV pendant un peu plus d'une journée pour la sonde SW-H et d'environ 2 jours pour la sonde SW-b durant l'événement P1 alors que l'augmentation des TEV de l'essai I-C n'a duré au maximum qu'une journée (dans le cas des sondes SW-b). Les hausses de TEV observées dans l'événement P2 étaient supérieures à celles associées à l'essai I-E (soit respectivement 0,090 et 0,019 en moyenne) en dépit du fait que l'infiltration s'est produite à une intensité plus faible sur une plus longue période.

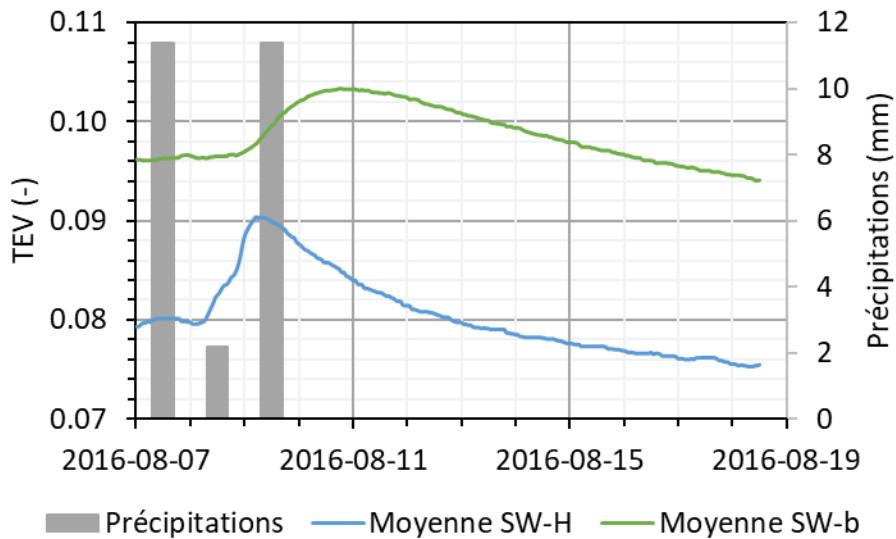


Figure 4.36 Variations de TEV suite à l'événement P2 (du 7 août 2016 au 9 août 2016) dans la couche de sable de la CCE sur une période de 11,5 jours.

Tableau 4.6 Réponse hydrogéologique de la CCE à des événements de pluie.

Position dans la CCE	Temps d'arrivée du front de mouillage		TEV initiale (-)		Augmentation de TEV (-)		Temps d'influence de l'essai	
	Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas	Haut	Bas
P1 (2016-06-06)	7h	18h	0,085	0,110	0,057	0,050	5j	5j 12h
P2 (2016-08-07)	1j 6h	2j	0,079	0,096	0,011	0,007	4j 8h	7j

CHAPITRE 5 SIMULATIONS NUMÉRIQUES DU COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DE LA HALDE EXPÉRIMENTALE

5.1 Validation du modèle numérique

Les résultats de l'essai à grande échelle I-C ont été utilisés afin d'évaluer et calibrer le modèle numérique de la halde expérimentale réalisé avec le code SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016; section 2.5.2). Les teneurs en eau volumiques, la vitesse d'avancée du front de mouillage et les débits de sortie aux lysimètres ont été simulés et comparés aux mesures expérimentales. L'essai d'infiltration à grande échelle I-C représente cependant une précipitation à la limite d'un événement extrême; les résultats induits par cet essai sont donc peu représentatifs des précipitations usuelles à cet endroit. Cet essai a été sélectionné puisqu'il présentait les plus grandes variations entre les valeurs initiales et les variations induites. Ces plus grands contrastes ont facilité les comparaisons avec les résultats des simulations numériques. Le modèle numérique a ensuite été vérifié sur la base des variations de TEV mesurées dans la couche de sable pendant l'été 2016.

5.1.1 Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C avec les propriétés mesurées (avant calibration)

Les propriétés des matériaux de la halde expérimentales (sable, roches stériles concassées et roches stériles) ont été caractérisées au laboratoire et/ou sur le terrain (section 2.5.1 et 3.1). Ces propriétés ont été utilisées pour simuler, avec SEEP/W, l'essai d'infiltration à grande échelle I-C afin d'évaluer le comportement global de la CCE (entre les sondes ponctuelles). Une faible précipitation (1×10^{-12} m/s) a été appliquée en régime permanent afin de permettre une meilleure convergence du modèle et d'établir un régime de succion initial (TEV initial réaliste proche de la teneur en eau résiduelle comme observée sur le terrain). Les TEV initiales mesurées *in situ* dans la roche stérile d'anorthosite concassée ont été corrigées (-0,14) afin de faciliter la comparaison avec les résultats des simulations numériques (plus de détails sur cette correction sont présentés

dans la section 5.1.2). Des corrections ont aussi été apportées aux résultats dans la roche stérile dans la même optique.

Le comportement hydrogéologique simulé avec les propriétés mesurées diffère significativement des résultats obtenus sur le terrain. Par exemple, l'eau de l'essai d'infiltration tendait à s'accumuler dans la couche de roches stériles concassées, au sommet de la CCE, alors que l'écoulement vertical observé *in situ* était beaucoup plus rapide (figure 5.1 et 5.2). Cette rétention d'eau dans la couche supérieure de la CCE entraînait un retard de plus 10 heures de l'arrivée du front de mouillage dans le haut de la couche de sable par rapport aux observations de terrain. Dans le modèle appelé Propriétés Mesurées (figure 5.1 et 5.2), l'infiltration a entraîné une hausse de TEV de 0,23, soit plus de quatre fois la hausse observée avec les sondes installées au sommet de la halde expérimentale, dans la couche de roches stériles concassées. L'eau a également été retenue de façon plus importante dans la couche de sable avec les Propriétés Mesurées et aucun écoulement significatif n'a été observé dans les stériles pendant et après l'essai d'infiltration, contrairement aux mesures sur le terrain (figure 5.4). Le profil de pression de la simulation au niveau du lysimètre 1 montrait une pression de -0,1 kPa dans le bas de la couche de roches stériles concassées en contraste avec une pression de -11 kPa dans le haut de la couche de sable (figure 5.1). Un deuxième contraste de pression était visible dans ce profil entre le bas de la couche de sable et le haut des stériles (-8 kPa et -14 kPa). Ces contrastes ont entraîné la formation d'un effet de barrière capillaire entre chacun des matériaux. La rétention d'eau plus importante simulée dans la CCE avec les Propriétés Mesurées semblait donc attribuable à un effet de barrière capillaire entre les propriétés du sable de la CCE et celles des stériles.

Ces différences entre les résultats simulés et mesurés indiquent qu'il est nécessaire de calibrer les modèles numériques et d'ajuster les propriétés des matériaux afin de mieux représenter numériquement les observations de terrain.

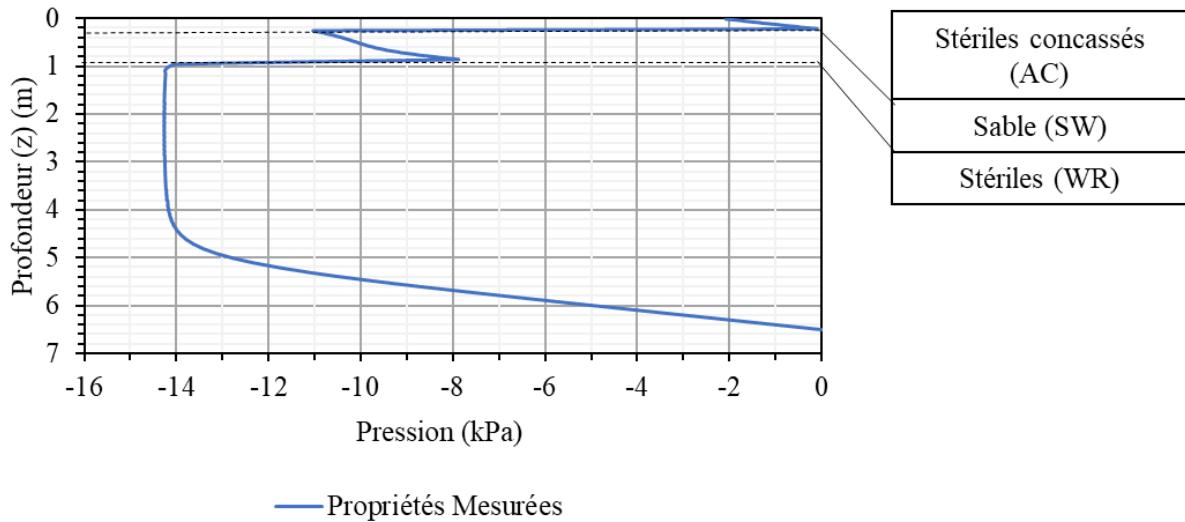


Figure 5.1 Profils de succions dans la halde au-dessus du lysimètre 1 ($x=10$ m) 140 heures après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les propriétés mesurées au laboratoire et sur le terrain.

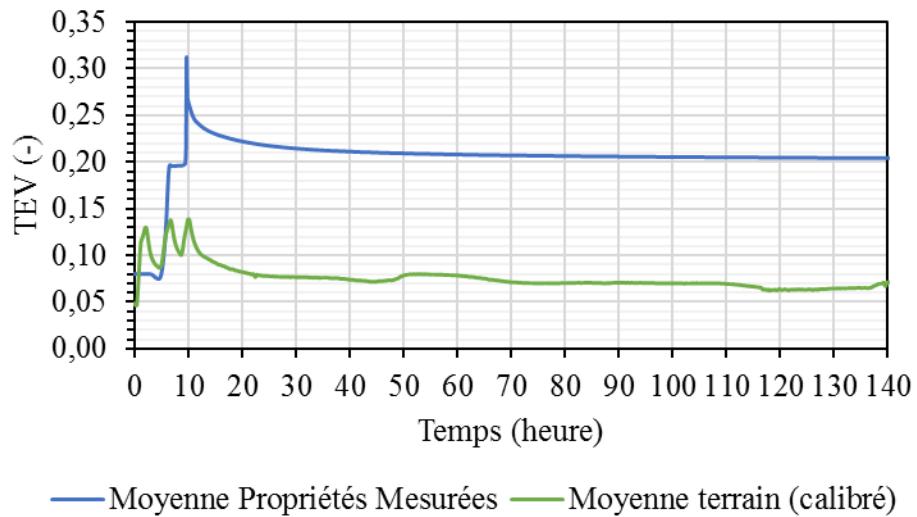


Figure 5.2 Variations moyennes de TEV dans la couche de roches stériles concassées (0,2 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées.

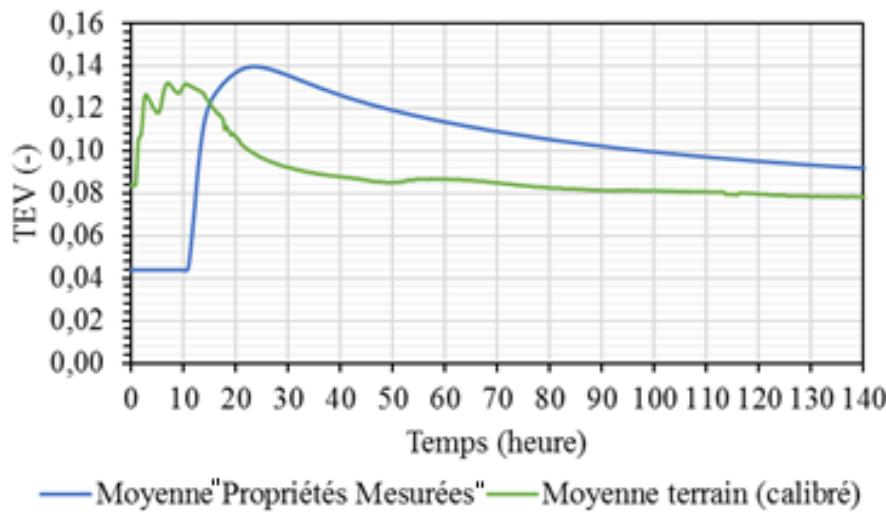


Figure 5.3 Variations moyennes de TEV dans la couche de sable (0,4 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées.

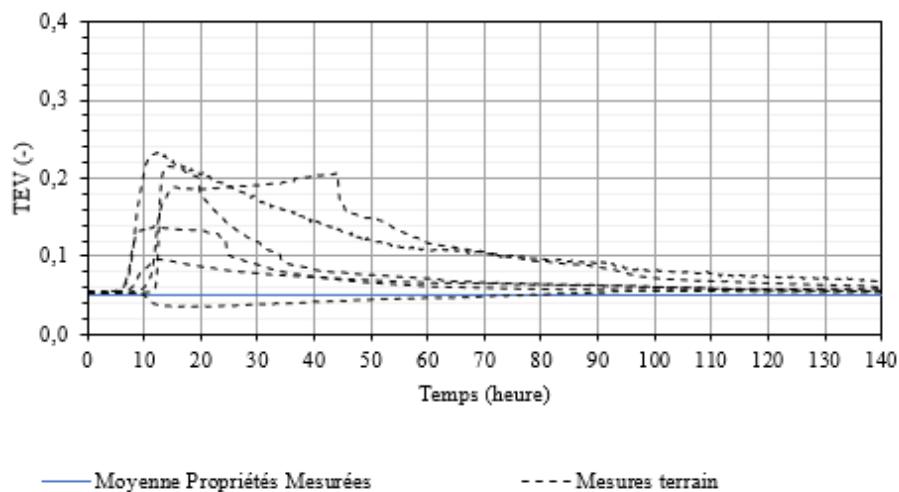


Figure 5.4. Variations moyennes de TEV dans le haut des stériles (0,95 m sous la surface de la halde) suite à l'essai d'infiltration I-C, simulées avec les propriétés mesurées. La valeur initiale des mesures de terrain (en pointillés) a été ramenée à la celle du modèle numérique. Ces valeurs non-corrigées sont présentées dans la section 4.3.1.

5.1.2 Ajustements entre les propriétés mesurées et calibrées

Les propriétés hydrogéologiques de la roche stérile concassée, du sable de la CCE (Bréard Lanoix 2017) et des stériles riches (ilménite) (Peregoedova 2012) ont été ajustées dans les simulations numériques afin de mieux représenter le comportement hydrogéologique observé sur la halde expérimentale (figure 5.5 et 5.6). Cette calibration a été faite au moyen d'ajustements successifs (itératifs) des propriétés des matériaux pour reproduire de façon acceptable les comportements observés sur le terrain (jugés représentatifs du comportement hydrogéologique réel de la halde expérimentale; section 3.2). Un tel ajustement (ou calibration) se justifie par l'hétérogénéité intrinsèque des matériaux utilisés pour la construction de la halde, les incertitudes liées à la caractérisation de terrain, les effets d'échelles et les caractéristiques du code numérique ; il s'agit d'une approche relativement courante pour les résidus miniers dans le domaine (p.ex. Ouangrawa, 2008; Pabst, 2011; Ethier, 2017). Les modifications ont principalement porté sur la porosité, la CRE (décrise avec le modèle de van Genuchten (1980)) et la conductivité hydraulique saturée. La fonction de perméabilité est définie en fonction des nouvelles valeurs de conductivité hydraulique et de la CRE ajustée. La conductivité hydraulique non saturée a été limitée à une valeur minimale de 10^{-14} m/s dans le but de respecter la physique de l'écoulement (Fredlund, 2006) et pour favoriser la convergence des simulations numériques. Les ajustements de propriétés ont été réalisés en fonction des critères et des objectifs suivants :

- La teneur en eau résiduelle a été ajustée pour reproduire au plus près la teneur en eau initiale mesurée dans les différents matériaux.
- La pression d'entrée d'air (AEV) des matériaux de la CCE a été ajustée pour reproduire la capacité de rétention d'eau de ces matériaux et mieux représenter l'avancée du front de mouillage dans la couche de sable et les stériles.
- La pente de la CRE des matériaux de la CCE a été modifiée pour reproduire la vitesse de saturation et de désaturation des matériaux pendant et après l'essai d'infiltration.
- La conductivité hydraulique saturée (et la fonction de perméabilité) des matériaux de la CCE a été ajustée pour mieux représenter la vitesse de progression du front de mouillage. Elle a été ajustée pour l'ensemble des matériaux de la halde dans le but d'ajuster le contraste entre les matériaux fins de la CCE et les roches stériles plus grossières. Ce

contraste était un élément déterminant l'infiltration de l'eau dans les stériles à partir de la CCE (voir aussi section 5.3). L'augmentation du contraste des propriétés entre le sable et les roches stériles favorisait une rétention d'eau dans le sable alors qu'un contraste moins marqué favorise un écoulement gravitaire vers les stériles.

- La porosité a été ajustée pour tenir compte de la vitesse de progression du front de mouillage, de la capacité d'absorption et du contraste entre les propriétés des différents matériaux de la halde.

Par ailleurs :

- Les modifications apportées aux différents matériaux ont été minimisées dans le but de rester le plus près possible des propriétés mesurées au laboratoire ou sur le terrain.
- La géométrie des différentes couches n'a pas été modifiée afin de simplifier l'ajustement du modèle numérique. Les épaisseurs minimales des matériaux de la CCE ont été retenues à la base de la conception du modèle numérique, à savoir 60 cm pour la couche de sable, et 25 cm pour la couche de roches stériles d'anorthosite concassées.

Les simulations réalisées dans le cadre de cette calibration ont montré des sensibilités différentes selon les paramètres.

La porosité (n), la TEV résiduelle (θ_r) et la valeur d'entrée d'air (AEV) de la roche stérile concassée (haut de la CCE) ont été légèrement modifiées (diminution pour n et θ_r et augmentation pour l'AEV) (figure 5.5 et tableau 5.1). Par contre, la succion résiduelle (ψ_r) a été augmentée de manière plus importante à 15 kPa, ce qui a entraîné une réduction significative de la pente de la CRE. La conductivité hydraulique saturée des stériles d'anorthosite concassés (k_{sat}) a été augmentée de 2 ordres de grandeur par rapport aux mesures *in situ* jusqu'à 5×10^{-4} m/s. Les modifications les plus importantes concernaient les propriétés des stériles d'anorthosite concassés qui montraient le plus grand degré d'incertitude, par exemple la conductivité hydraulique a été estimée à partir de seulement 4 essais d'infiltration à petite échelle.

La CRE du sable de la CCE a été très légèrement ajustée par rapport aux résultats de la caractérisation au laboratoire et sur le terrain (Bréard Lanoix, 2017) (figure 5.5 et tableau 5.2). La conductivité hydraulique saturée ajustée correspond à la valeur maximale mesurée sur le terrain ($k_{sat} = 9 \times 10^{-5}$ m/s; Bréard Lanoix, 2017). De façon générale, les propriétés du sable de la CCE

ont été peu modifiées durant la calibration du modèle; c'est aussi le matériau qui a fait l'objet d'une caractérisation *in situ* plus poussée.

La porosité et la TEV résiduelle des stériles (ilménite) ont été modifiée très légèrement et la valeur d'entrée d'air (AEV) et la succion résiduelle (ψ_r) ont été augmentées de respectivement +0,27 kPa et +6,5 kPa (figure 5.5 et tableau 5.3). L'angle de la pente de la CRE n'a pas été modifié de façon notable. Leur conductivité hydraulique a été légèrement augmentée dans les simulations : $k_{sat} = 5 \times 10^{-3}$ m/s, comparativement à une valeur mesurée (au laboratoire) autour de 1×10^{-3} m/s (Peregoedova, 2012). Les propriétés des roches stériles sont relativement incertaines, car ils n'ont pas fait l'objet d'une caractérisation très poussée sur la halde expérimentale et la caractérisation en laboratoire a été réalisée sur une portion de la granulométrie complète (≤ 50 mm, Peregoedova 2012). Par ailleurs, la succion résiduelle, bien qu'importante pour la simulation du comportement hydrogéologique des stériles, est difficile à évaluer avec précision sur le terrain et au laboratoire. Une caractérisation plus poussée lors d'un éventuel démantèlement de la halde expérimentale permettrait d'améliorer significativement la représentativité des modèles numériques en validant la calibration réalisée ici.

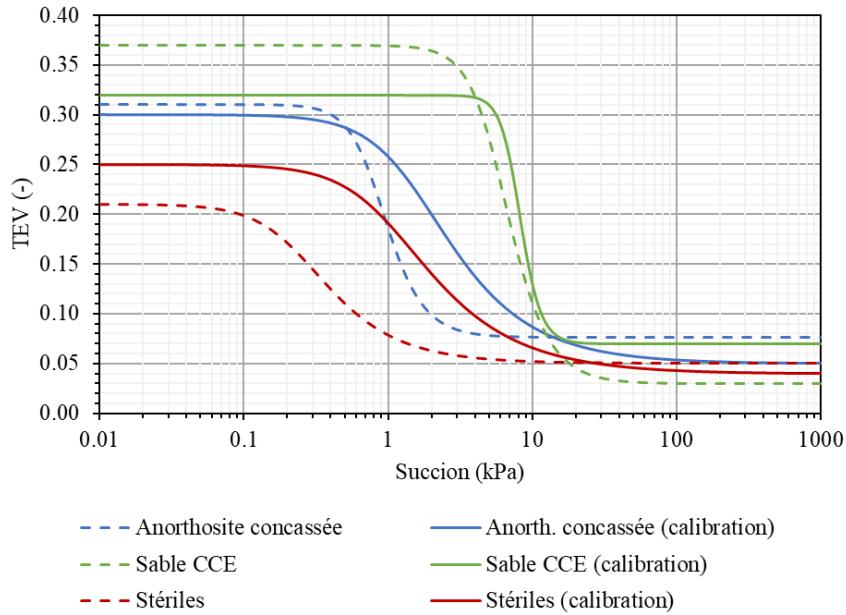


Figure 5.5 CRE mesurées au laboratoire et calibrées suite aux simulations numériques. Les valeurs mesurées ont été adaptés de : Anorthosite concassée (Lévesque, 2015 et cette étude), Sable CCE (Bréard Lanoix, 2017) et Stériles (Peregoedova, 2012).

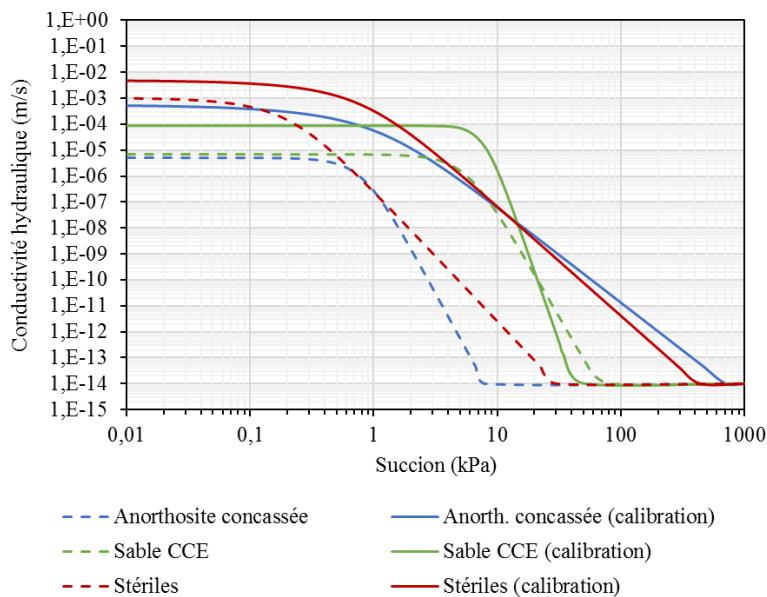


Figure 5.6 Fonctions de perméabilités estimées à partir des essais au laboratoire et *in situ*, et calibrées dans les simulations numériques. Adapté de : Anorthosite concassée (Lévesque, 2015 et cette étude), Sable CCE (Bréard Lanoix, 2017) et Stériles (Peregoedova, 2012).

Tableau 5.1 Caractéristiques de la roche stérile concassée mesurées en laboratoire et calibrées suite aux ajustements découlant des simulations. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée.

Propriétés	Matériaux	
	Roches stériles concassées (laboratoire et/ou terrain)	Roches stériles concassées (calibration)
n	0,31	0,30
θ_r	0,08	0,05
AEV (kPa)	0,55	0,71
ψ_r (kPa)	2	15
k_{sat} (m/s)	$5,00 \times 10^{-6}$	$5,00 \times 10^{-4}$

Tableau 5.2 Propriétés des caractéristiques du sable de la CCE mesurées en laboratoire et calibrées. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée (Bréard Lanoix, 2017).

Propriétés	Matériaux	
	Sable CCE (laboratoire et terrain)	Sable CCE (calibration)
n	0,37	0,32
θ_r	0,03	0,07
AEV (kPa)	3,8	6,0
ψ_r (kPa)	10,2	10,2
k_{sat} (m/s)	$7,00 \times 10^{-6}$	$9,00 \times 10^{-5}$

Tableau 5.3 Caractéristiques des stériles mesurées en laboratoire et calibrées. n : Porosité; θ_r : Teneur en eau volumique résiduelle; AEV : Valeur d'entrée d'air; ψ_r : Suction résiduelle; k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée (Peregoedova, 2012).

Propriétés	Matériaux	
	Stériles (laboratoire)	Stériles (calibration)
n	0,21	0,25
θ_r	0,05	0,04
AEV (kPa)	0,13	0,4
ψ_r (kPa)	1,5	8
k_{sat} (m/s)	$1,00 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-3}$

5.1.3 Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C avec les propriétés calibrées

L'essai d'infiltration à grande échelle I-C (section 3.3.2) a été simulé numériquement avec SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016). Cet essai a été sélectionné pour la calibration parce que les résultats de TEV et de débits mesurés montraient les variations et les contrastes les plus marqués parmi l'ensemble des essais réalisés sur la halde expérimentale. Les comparaisons entre les observations de terrain et les résultats numériques s'en trouvaient donc facilitées, ce qui a aussi permis de réduire les incertitudes sur les résultats.

L'essai d'infiltration I-C a été simulé en trois phases successives, comme lors de l'essai sur le terrain. Une première période d'infiltration avec un flux de $2,5 \times 10^{-6}$ m/s et une durée de 2 heures (soit 18 mm au total) a été appliquée à la surface du modèle 2D, suivi de 2 autres périodes d'infiltration de 2×10^{-6} m/s et d'une durée de 2 heures (soit 14,4 mm pour chaque période). Les trois périodes d'infiltration ont été entrecoupées de pauses d'une durée de 2 heures chacune, correspondant au temps pendant lequel le camion à eau était occupé à d'autres tâches sur le site de la mine.

Profils de TEV et de succion

Les profils simulés de TEV au début de l'essai d'infiltration et après 15 heures ont été comparés aux TEV mesurées sur le terrain dans chacun des matériaux au-dessus du lysimètre 3 (valeurs ponctuelles; figure 5.7). Généralement, les TEV simulées dans la CCE étaient similaires à celles observées sur le terrain pour l'ensemble de la CCE avec des écarts de moins de 0,04. Le profil vertical de TEV simulé au début de l'essai (conditions initiales) ne montrait pas d'écart important entre le haut et le bas de la couche de sable contrairement aux mesures de terrain qui enregistraient une TEV plus élevée dans le bas de la couche que dans le haut. Le profil simulé de TEV après 15 heures montrait une accumulation d'eau dans le bas de la couche de sable à l'interface avec les stériles. Cette accumulation se traduisait par une TEV de 0,192, soit une valeur supérieure de +0,030 (+10% en termes de degré de saturation) à la mesure de terrain 20 cm au-dessus des stériles et était attribuable à un effet de barrière capillaire. La TEV avait cependant aussi augmenté après 15 heures dans le haut des stériles (sous la couche de sable)

d'environ +0,06 (+24% en termes de degré de saturation) ce qui indiquerait une certaine infiltration dans les stériles. Les TEV mesurées dans les stériles sur le terrain étaient beaucoup plus élevées que les valeurs simulées (jusqu'à +0,22), car les valeurs de terrain n'ont pas pu être calibrées (section 3.2). Les résultats des simulations à $t = 6$ h et $t = 168$ h présentaient des tendances similaires aux résultats du terrain (écart de TEV maximaux d'environ 0,03) et ont permis d'observer la progression du front de mouillage dans la CCE bien que la différence de TEV dans haut et le bas de la CCE ne soit pas autant marquée que pour les résultats de terrain.

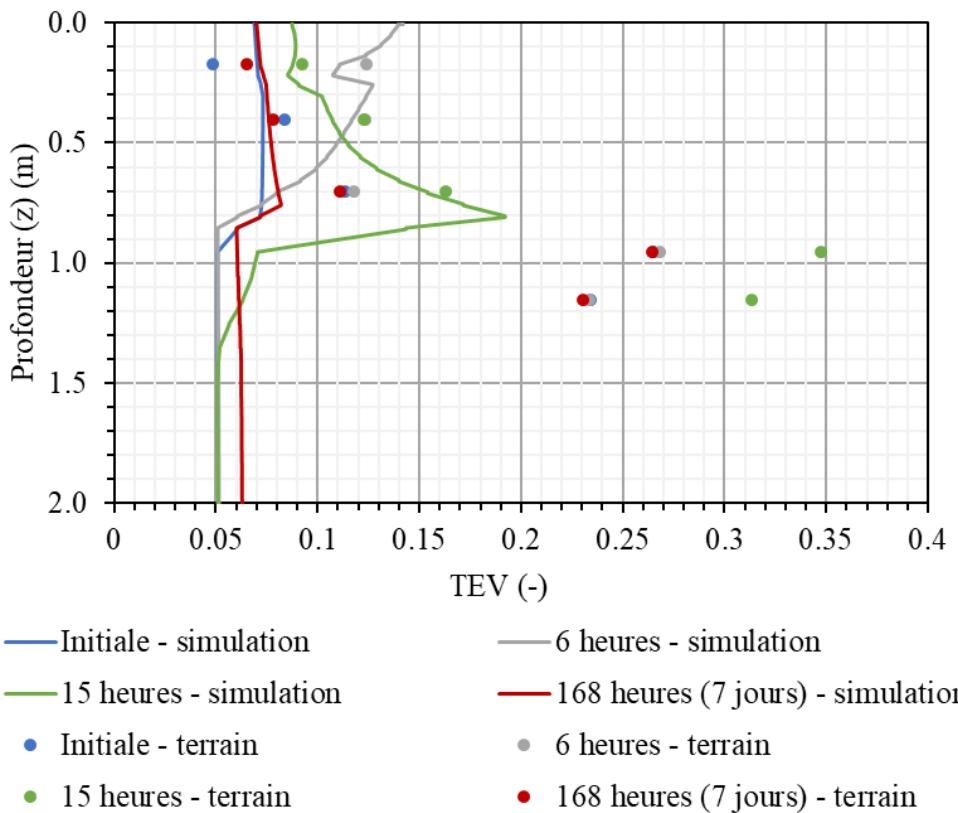


Figure 5.7 Profil de TEV simulées dans le haut de la halde (à $x = 30$ m; courbes) et valeurs moyennes mesurées sur le terrain (points) au début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et après 15h.

Les profils de succion simulés dans la partie amont de la halde expérimentale ($x = 10$ m, au-dessus du Lysimètre 1 afin de mieux observer les variations de succions dans des stériles

initialement plus secs) ont été comparés, à quatre moments différents ($t = 0$ h, 6 h, 8 h, 48 h et 168 h), durant et après l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (figure 5.8). Le profil initial (au début de l'essai) montrait une pression plus élevée dans la CCE (entre -17,6 kPa et -19,6 kPa) que dans le haut des stériles (- 27,1 kPa), ce qui indiquait le développement d'un effet de barrière capillaire et une certaine rétention d'eau dans la CCE. L'écart entre la succion dans le bas de la CCE et le haut des stériles était maximum (14,7 kPa d'écart) environ 6 heures après le début de l'essai. La pression a ensuite commencé à augmenter dans le haut des stériles, indiquant l'infiltration progressive de l'eau dans les stériles et le bris (partiel) de l'effet de barrière capillaire avec le sable. La succion dans le haut des stériles (environ 5 cm sous l'interface avec le sable), 8 h après le début de l'essai d'infiltration, était d'environ 11,5 kPa, soit une diminution de 15,7 kPa par rapport à $t = 6$ h. Durant les jours suivant l'essai d'infiltration, la succion a continué à augmenter dans la CCE (diminution de la TEV) et à diminuer dans les stériles (infiltration). Après 168 heures (7 jours), les pressions dans la couche de roches stériles concassées et dans la couche de sable étaient pratiquement revenues aux valeurs initiales. La pression dans les stériles demeurait cependant plus élevée (jusqu'à +15 kPa) que les valeurs initiales, jusqu'à une profondeur de 4 m sous la surface des stériles. Les conséquences de l'essai d'infiltration I-C sur le profil de succion dans les stériles tendait à s'estomper après environ 60 jours (par une infiltration nulle à la surface de la halde).

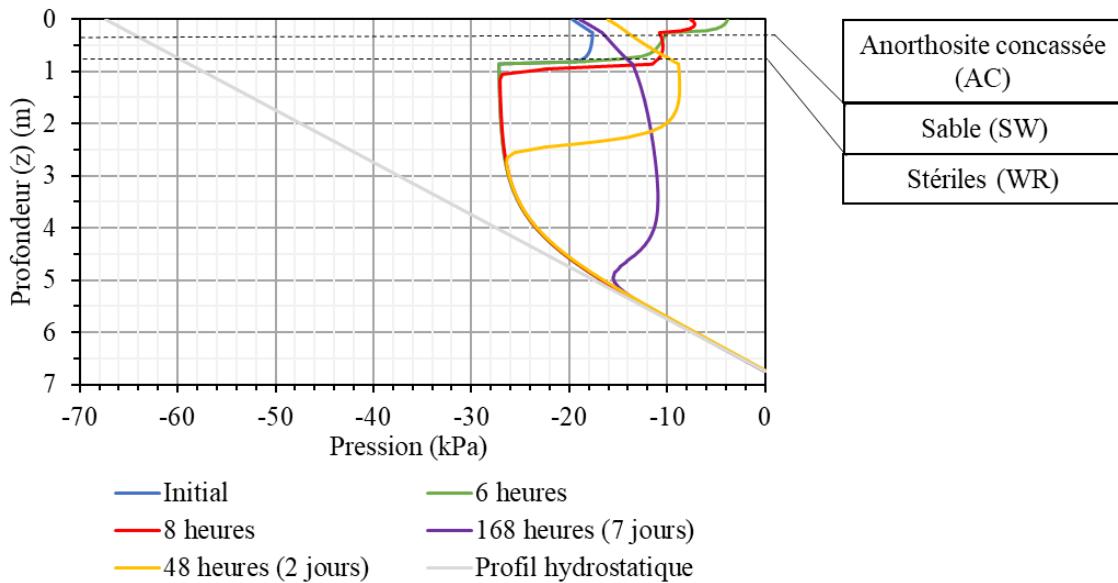


Figure 5.8 Profils de succion simulés dans la halde expérimentale ($x = 10$ m) au début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C et après 6, 8, 48 et 168 heures.

La figure 5.9 montre la répartition des TEV sur l'ensemble de la halde expérimentale 2 jours après le début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Les TEV étaient généralement plus élevées dans le bas de la couche de sable et dans le bas des stériles (juste au-dessus de la hauteur de la nappe simulée). L'eau d'infiltration s'est accumulée au bas de la couche de sable où les TEV ont atteint une valeur de 0,14 dans le bas de la couche de sable alors que la TEV dans la couche de roches stériles concassées (environ 0,8 m au-dessus) était d'environ 0,06. L'infiltration de l'eau s'est aussi propagée dans les stériles sous la CCE où la TEV était aussi en augmentation (+0,02) sur une profondeur d'environ 2 m sous la CCE.

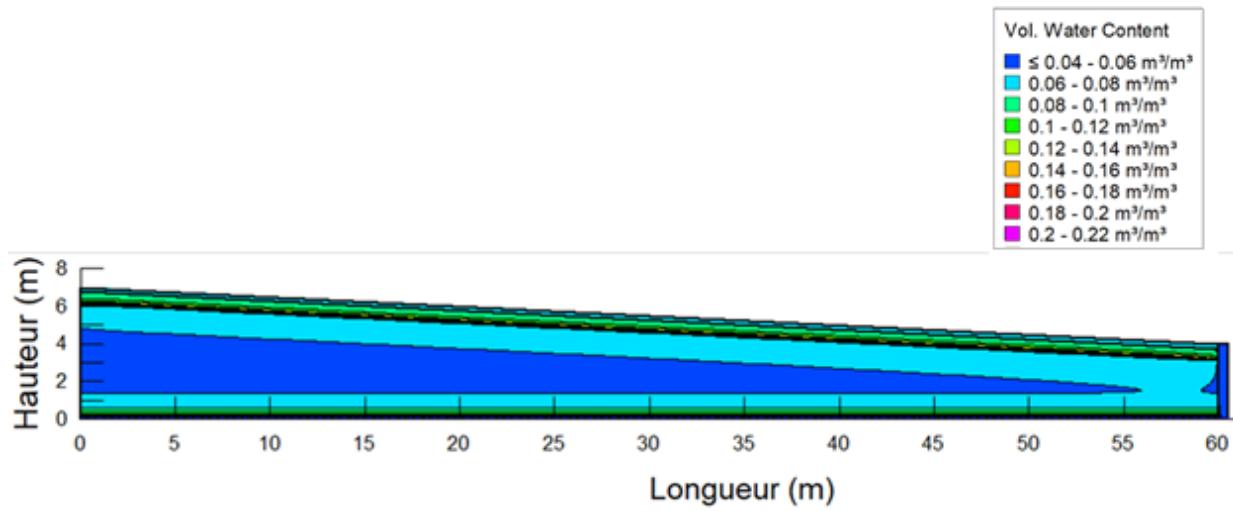


Figure 5.9 Résultats, en isocontours de TEV, de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C 2 jours après le début de l'essai.

Les vecteurs de flux simulés au sommet de la halde ont montré une certaine déviation latérale de l'eau vers le bas de la pente, le long de l'interface entre le sable et les stériles (figure 5.10). Cette déviation accompagnée d'une rétention d'eau (TEV de 0,14) a cependant été suivie d'une propagation relativement uniforme du front de mouillage dans les stériles (comme indiqué par les flèches verticales dans la figure 5.10).

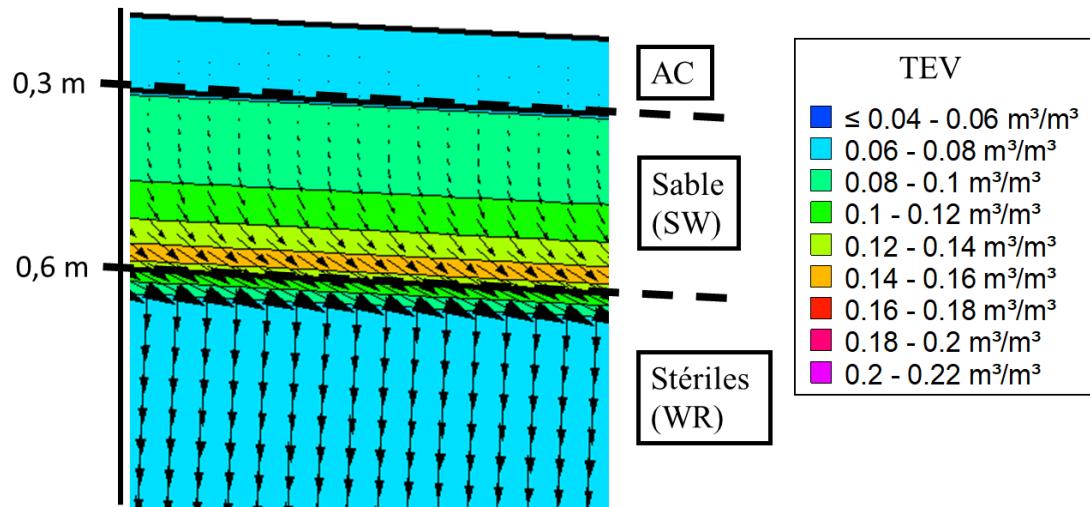


Figure 5.10 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation de terrain 2 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : roches stériles concassées.

L'infiltration du front de mouillage dans les stériles à la suite de l'essai I-C est également visible dans la figure 5.11 qui présente les variations de TEV dans le haut de la halde expérimentale à différents temps ($t = 0$ -14 j). La TEV a augmenté progressivement dans la CCE (accumulation d'eau dans le bas de la couche de sable) jusqu'à $t=24$ heures après le début de l'essai d'infiltration. L'eau a ensuite commencé à s'infiltrer dans les stériles (augmentation de TEV) ce qui a provoqué une baisse de TEV dans la CCE ($t = 96$ heures). L'infiltration d'eau entre la CCE et les stériles s'est produite d'une façon uniforme sur toute la longueur de la halde. Aucune infiltration localisée (point ou zone *DDL*) n'a pu être observée dans ces simulations. Le front de mouillage s'est ensuite propagé jusqu'au bas de la halde ; les TEV dans les roches stériles sont également demeurées supérieures aux valeurs initiales jusqu'à $t = 168$ heures. La TEV a ensuite commencé à diminuer dans les stériles deux semaines après le début de l'essai ($t = 336$ heures).

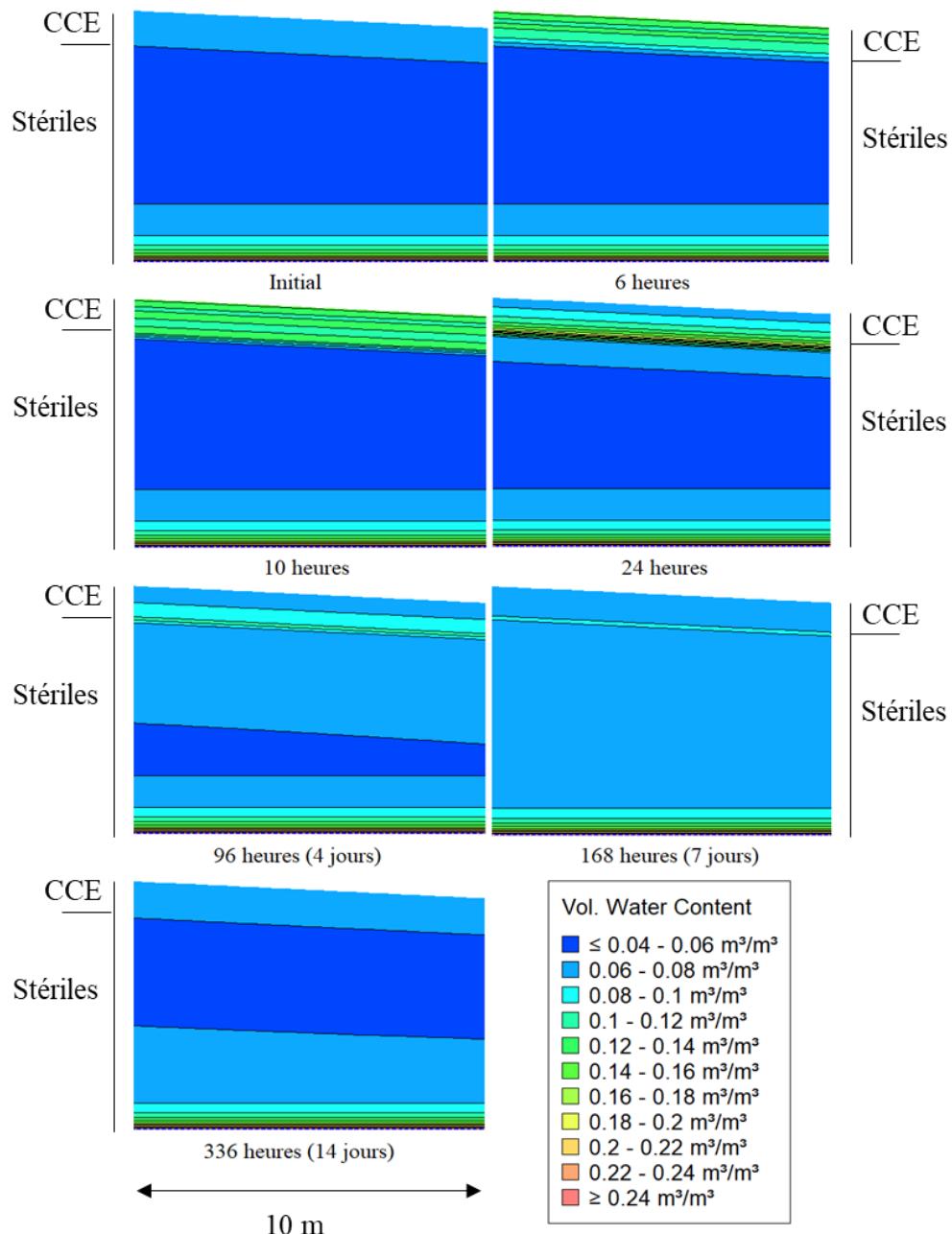


Figure 5.11 Isocontours de TEV au centre de la halde ($x =$ de 20 m à 30 m) 6, 10, 24, 96, 168 et 336 heures après le début de l'essai d'infiltration I-C ($t = 0$).

Les TEV simulées étaient identiques (courbes superposées) pour une même profondeur sous la surface de la halde, indépendamment de la position longitudinale dans la halde (par exemple dans le sable de la CCE, figure 5.12). Ces résultats ont été comparés (lorsque possible) à la moyenne

des courbes de TEV mesurées sur le terrain (la courbe moyenne est jugée représentative de l'ensemble des résultats pour une élévation donnée ; section 3.3.2). La zone bleue dans les figures présentées dans ce chapitre indique la plage d'incertitude de lecture des sondes GS3 ($\pm 0,03$; Decagon Devices Inc., 2017a), appliquée à la courbe moyenne.

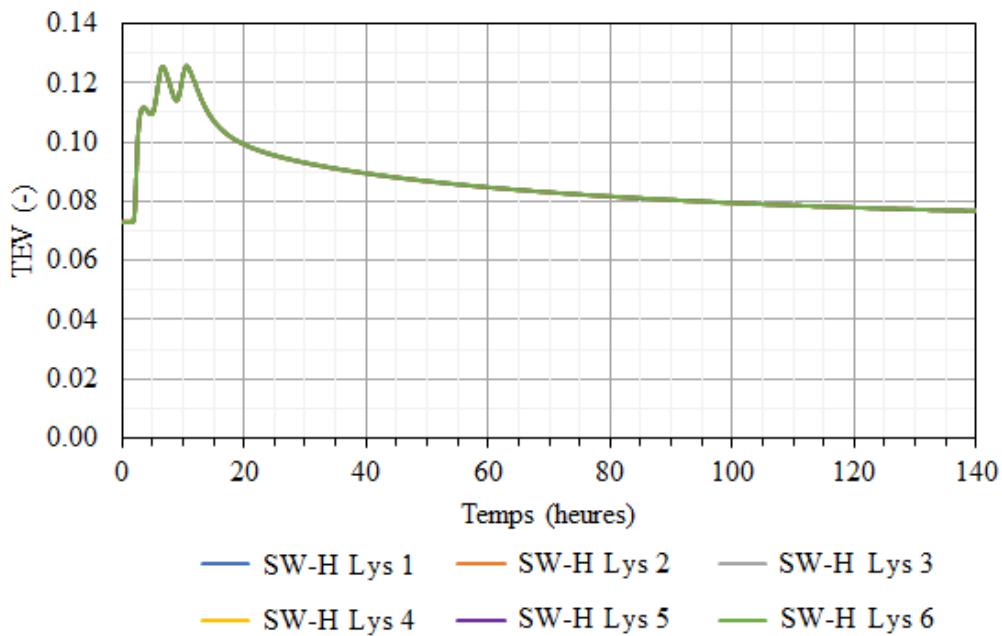


Figure 5.12 TEV simulées dans le haut de la couche de sable (40 cm sous la surface) de la CCE lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C. Toutes les courbes sont superposées dans la figure.

Couche de sable de la CCE

La teneur en eau initiale dans le haut de la couche de sable de la CCE (0,5 m sous la surface de la halde) était de 0,073 dans le modèle numérique, soit une valeur relativement similaire à la TEV moyenne de 0,083 mesurée sur le terrain (figure 5.13). Le front de mouillage dans le modèle a atteint une profondeur de 0,5 m environ 1,25 heure après le début de l'infiltration, contre 1 heure en moyenne sur la halde expérimentale. Les 3 pics correspondant aux 3 phases d'arrosage étaient bien visibles dans les simulations. L'augmentation moyenne de TEV était de 0,054 pour le modèle numérique, soit sensiblement la même valeur que sur le terrain (0,051). Le temps

nécessaire pour la TEV pour revenir à sa valeur initiale (temps d'influence de l'essai) dans le modèle numérique était d'environ 140 heures, soit presque le double du temps observé sur le terrain (environ 80 heures). Cette différence était essentiellement due à la TEV initiale plus faible dans les simulations, car les taux de diminution de la TEV étaient similaires dans le modèle et sur le terrain.

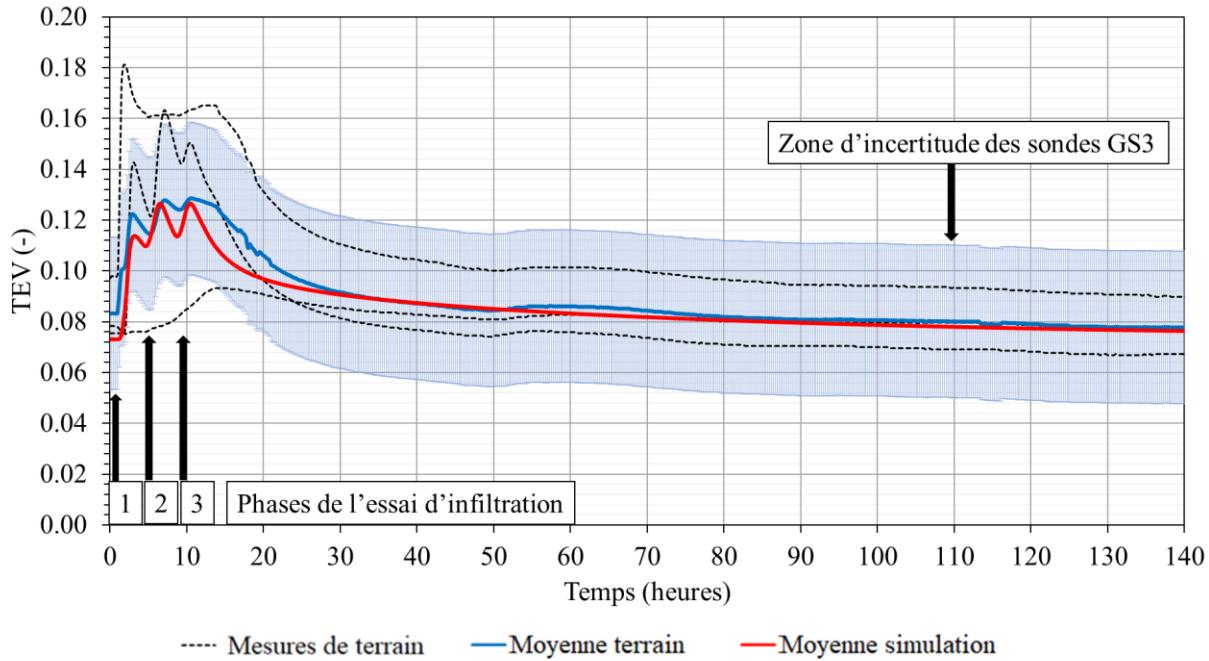


Figure 5.13 Variations de teneurs en eau volumiques simulées et mesurées dans le haut de la couche de sable de la CCE (0,5 m sous la surface de la halde, 15 cm sous l'interface sable/roches stériles concassées) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone ombragée (en bleu) représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

La TEV initiale simulée dans le bas de la couche de sable de la CCE était de 0,073, soit une valeur significativement plus faible que la moyenne des TEV mesurées sur le terrain (0,112; figure 5.14) même en considérant la zone d'incertitude. Le temps d'arrivée du front de mouillage était d'environ 4 heures dans les simulations numériques, soit une valeur similaire au temps d'arrivée moyen de 4,25 heures mesuré sur le terrain. L'augmentation de TEV dans le bas de la couche de sable induite par l'essai d'infiltration était de 0,08 dans les simulations numériques,

soit légèrement au-dessus de la moyenne des résultats de terrain (environ 0,055). De façon générale, les TEV simulées dans le bas de la CCE concordaient assez bien avec les mesures *in situ*, et étaient comprises dans la marge d'erreur des sondes GS3 et/ou dans l'intervalle des mesures de terrain (à l'exception de quelques valeurs ponctuelles). Le drainage était plus rapide dans le modèle que pour la moyenne des mesures *in situ*, mais les tendances variaient de façon importante selon les sondes, et certains résultats sur le terrain montraient un drainage plus rapide que celui observé dans les simulations.

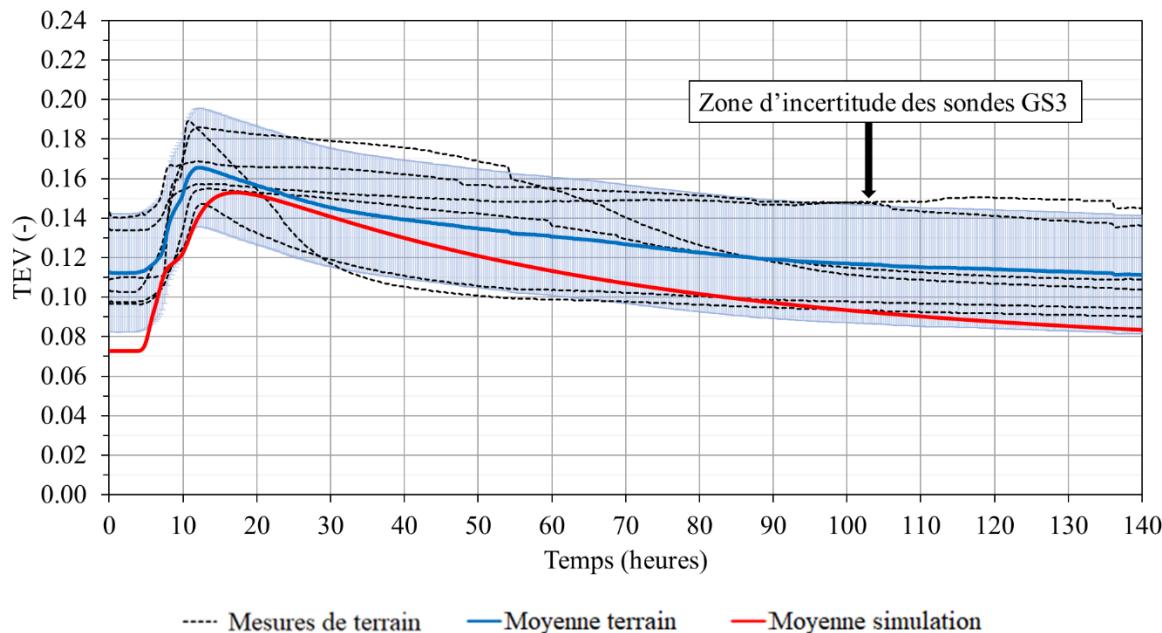


Figure 5.14 TEV simulées et mesurées dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 50 cm sous la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux mesures des sondes de TEV GS3.

Couche de roches stériles concassées de la CCE

Les TEV enregistrées par les sondes GS3 dans la couche de roches stériles concassées n'ont pas pu être corrigées (calibrées) en raison de l'absence de mesures directes (section 3.2.3). Cependant on peut constater qu'il y a un écart assez constant d'environ 0,14 entre la moyenne des valeurs

mesurées et les résultats numériques (figure 5.15). Cet écart était dans le même ordre de grandeur que la correction appliquée aux TEV dans la couche de sable de la CCE (environ -0,16), ce qui laisse penser qu'il serait possible d'ajuster les résultats des sondes placées dans la roche stérile concassée de la même manière.

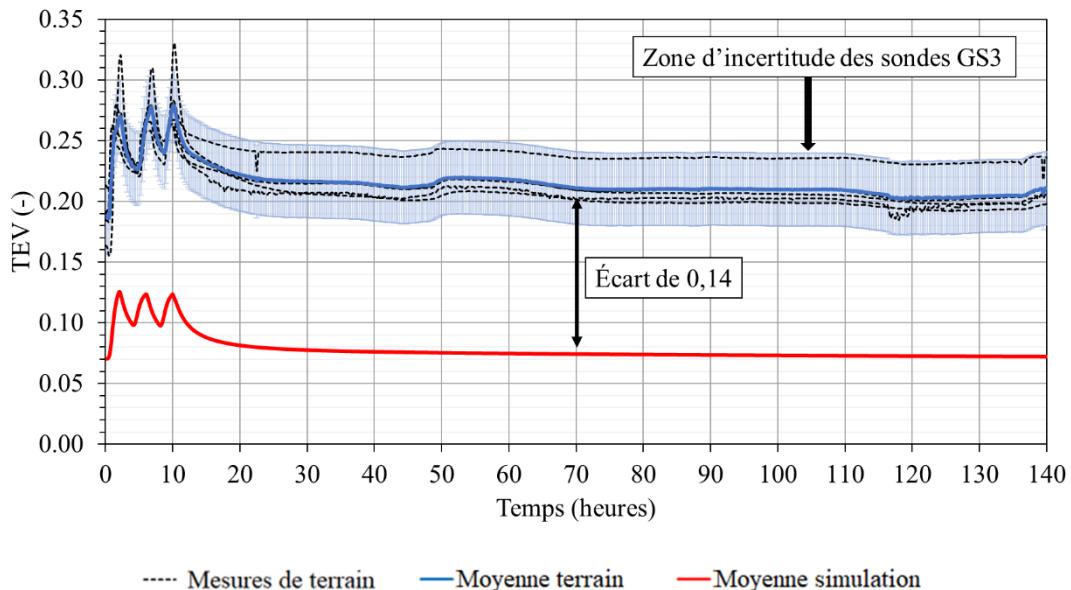


Figure 5.15 TEV simulées et mesurées (avant correction) dans la couche de roches stériles concassées de la CCE (0,25 m sous la surface de la halde, 5 cm au-dessus de la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

La TEV initiale simulée dans la couche de roches stériles concassées au début de l'essai était de 0,070. Cette valeur était légèrement supérieure à la moyenne observée sur le terrain (0,048, après correction) mais restait à l'intérieur de la zone d'incertitude des sondes (figure 5.16). Les trois fronts de mouillage successifs sont arrivés respectivement 0,6, 4,3 et 8,3 heures après le début de l'essai d'infiltration, soient des temps d'arrivée très similaires à ceux observés sur la halde expérimentale (0,8, 5,0 et 9,0 heures respectivement). L'augmentation moyenne des TEV simulées était très proche de l'augmentation de TEV moyennes mesurée sur le terrain (écart

maximaux d'environ 0,015). Les TEV simulées et mesurées tendaient à se stabiliser autour d'une valeur de 0,070 après un peu plus d'une journée.

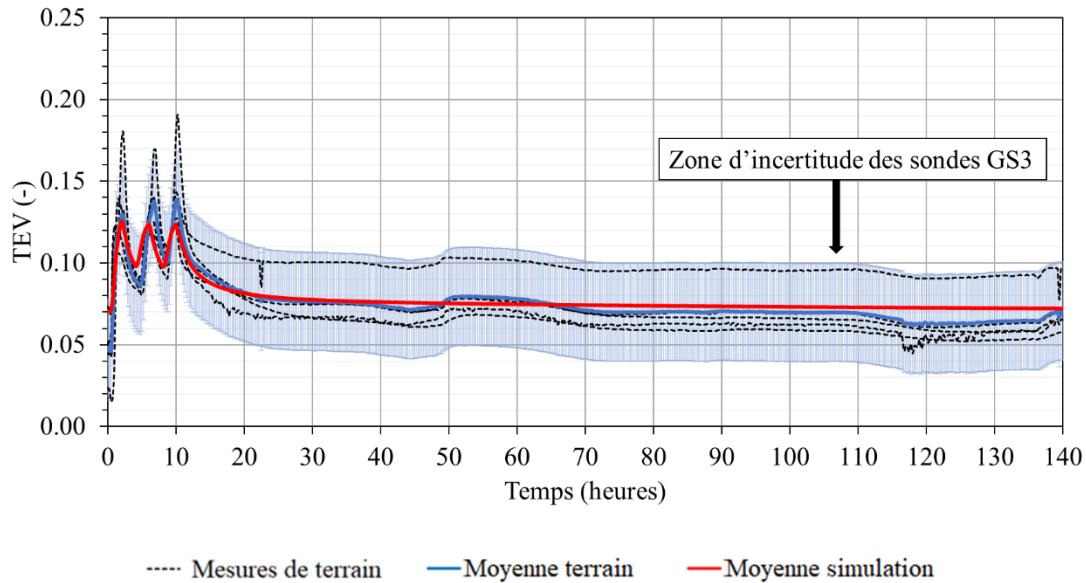


Figure 5.16 TEV simulées et mesurées (après correction) dans la couche de roches stériles concassées de la CCE (0,25 m sous la surface de la halde, 5 cm au-dessus de la surface du sable) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017). La zone en bleu représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

Haut des stériles

Les TEV enregistrées par les sondes GS3 dans les roches stériles n'ont pas pu être corrigées (calibrées) en raison de l'absence de mesures directes (section 3.2). Cependant les valeurs non réalistes données par les sondes de TEV ont été corrigées à la baisse pour permettre les comparaisons entre les variations *in situ* et celles de la simulation numérique (figure 5.17). Les corrections appliquées étaient comprises entre -0,763 (Lys 1) et -0,167 (Lys 6) (figure 5.18 et 5.19).

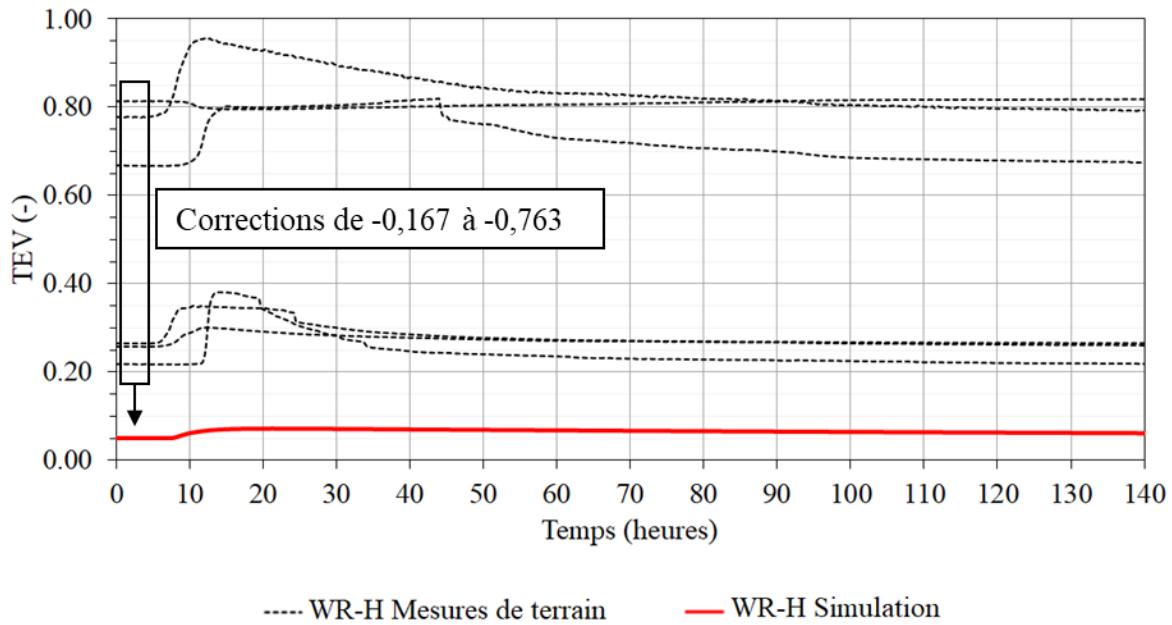


Figure 5.17 TEV simulées et mesurées dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).

La comparaison des variations de TEV induites par l'essai I-C permet d'observer le temps d'arrivée du front de mouillage dans le haut des stériles, 1,1 m sous la surface de la halde (10 cm sous la surface des stériles), était d'environ 7 heures dans les simulations numériques contre 6 à 11 heures sur le terrain (figure 5.18). L'augmentation de TEV simulée était de 0,021 dans le modèle numérique, soit une valeur significativement plus faible que celle enregistrée sur le terrain (en moyenne 0,111). Cependant, les TEV mesurées dans les stériles sur la halde expérimentale variaient de façon importante d'une sonde à l'autre, et ces résultats n'ont pas pu être validés ou calibrés par des mesures directes.

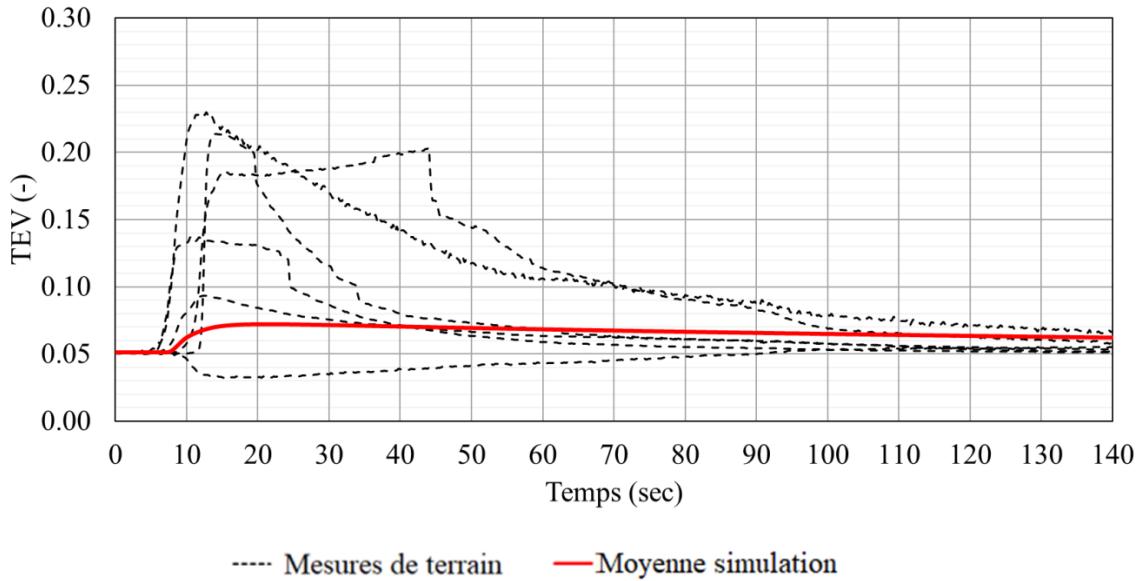


Figure 5.18 TEV simulées et mesurées (après corrections) dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).

Le temps d'arrivée du front de mouillage, 1,3 m sous la surface de la halde (30 cm sous la surface des stériles) était d'environ 8,5 heures dans les simulations contre 4,75 à 11,75 heures *in situ* (figure 5.19). L'augmentation maximale de TEV était de 0,02 dans le modèle, soit moins de la moitié de l'augmentation moyenne (0,048) observée sur le terrain. Le temps de retour à la TEV initiale du modèle numérique (plus de 140 heures) était similaire aux enregistrements de certaines sondes sur le terrain.

De façon générale, l'influence du passage du front de mouillage sur les stériles était donc beaucoup moins marquée dans les simulations numériques qu'observée sur le terrain. Cependant, les TEV mesurées dans les stériles sur la halde expérimentale étaient également très variables, et les mesures des sondes GS3 n'ont pas pu être validées ou calibrées au moyen de mesures directes.

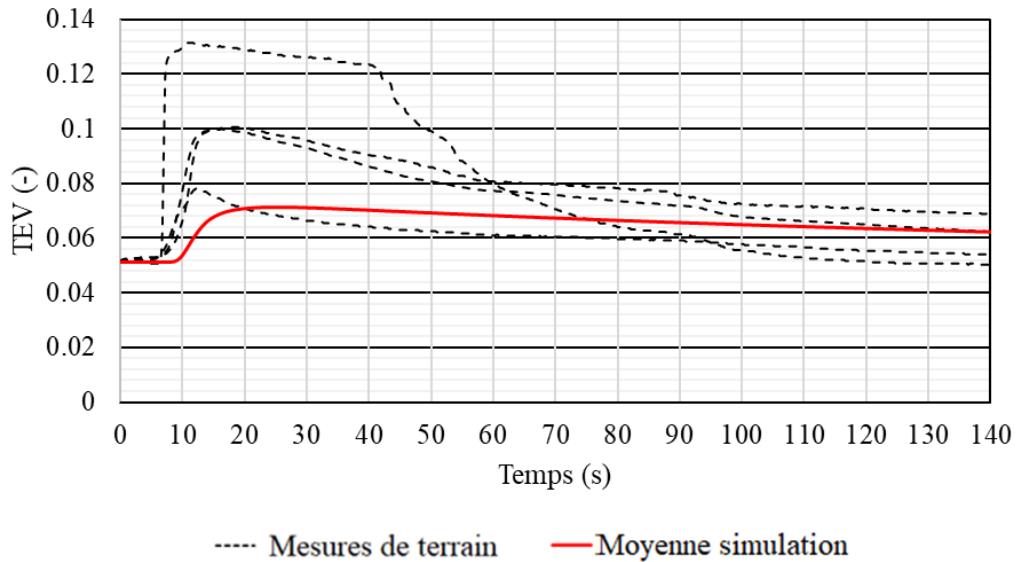


Figure 5.19 TEV simulées et mesurées (après corrections) dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous l'interface sable/ stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-C (7 juin 2017).

Débits de sortie

Les débits cumulés simulés pour chaque lysimètre étaient systématiquement inférieurs aux mesures manuelles réalisées sur le terrain (figure 5.20), avec des différences comprises entre 0,4 m³ (Lysimètre 5) et 1,2 m³ (Lysimètre 6) 6 jours après le début de l'essai. Les débits simulés montraient généralement des retards allant de 2 à 4 jours par rapport aux mesures manuelles. L'augmentation des débits cumulés simulés suivait par la suite les mêmes tendances que les valeurs mesurées. De façon générale, les simulations indiquaient, comme pour les mesures de terrain, une augmentation des débits à mesure qu'on se rapprochait du pied de la halde. L'arrivée du front de mouillage dans les lysimètres était également plus rapide vers le pied de la halde, ce qui s'explique en partie par l'épaisseur plus faible de stériles.

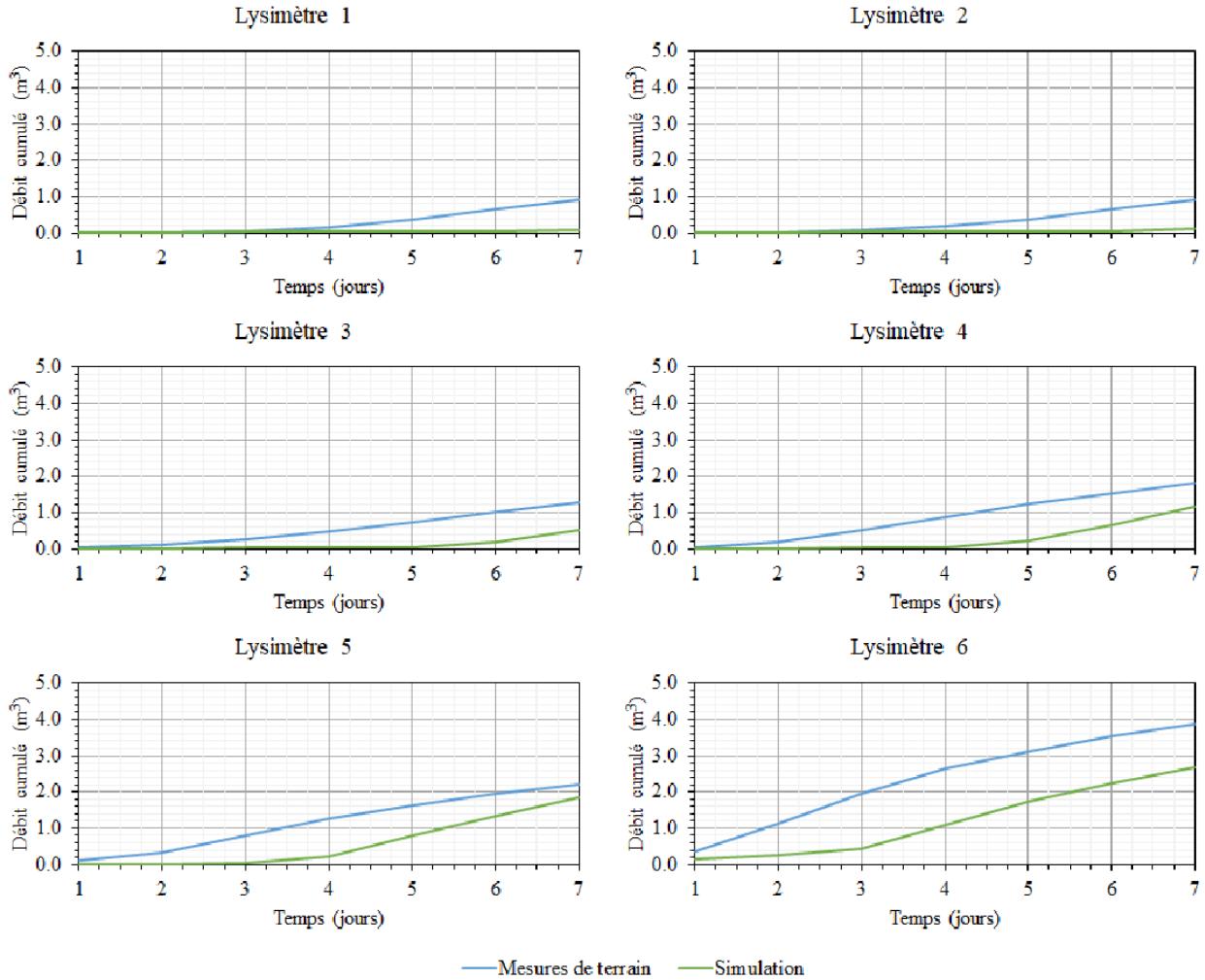


Figure 5.20 Débits cumulés mesurés et simulés par lysimètre pendant une période de 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C.

Les débits cumulés simulés après 7 jours étaient inférieurs à ceux mesurés *in situ* ($6,3 \text{ m}^3$ contre $10,9 \text{ m}^3$) (figure 5.21). Cette différence s'explique notamment par un retard dans les débits d'environ 4 jours constaté dans les simulations. Passés ces quatre jours, les débits quotidiens simulés étaient similaires à ceux enregistrés sur le terrain ($+1,8 \text{ m}^3/\text{jour}$). Le taux de récupération simulé 13 jours après le début de l'essai d'infiltration était d'environ 57% contre environ 59% sur le terrain (extrapolation).

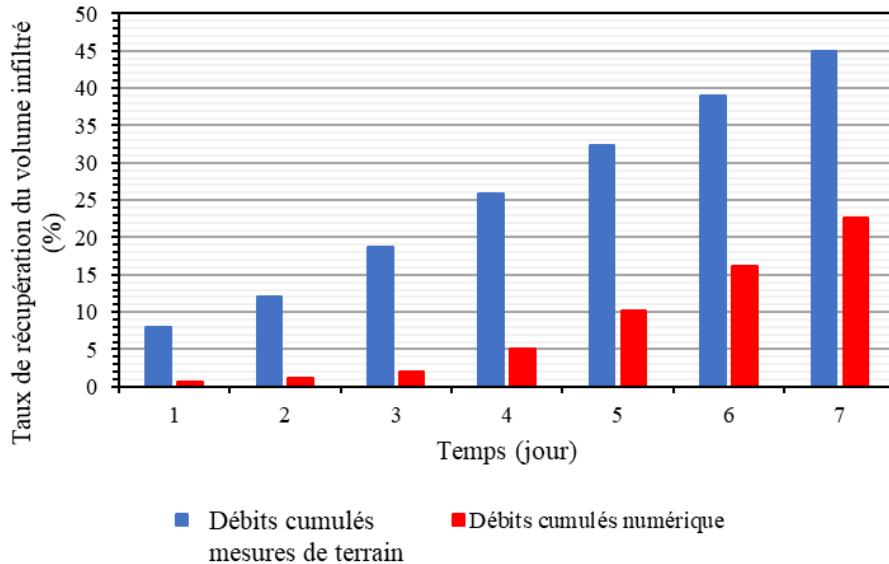


Figure 5.21 Taux de récupération cumulé du volume infiltré mesuré *in situ* et simulé sur une période de 7 jours suivant l'essai d'infiltration I-C.

5.1.4 Simulation numérique de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D

L'essai d'infiltration à grande échelle I-D (section 3.3.2) a aussi été utilisé pour évaluer (en partie) les simulations numériques réalisées avec SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016). Les trois phases d'arrosage successives ont été reproduites dans le modèle, comme lors de l'essai sur le terrain. Une première période d'arrosage avec un flux unitaire de $1,5 \times 10^{-6}$ m/s et une durée de 2,0 heures (11 mm au total) a été appliquée à la surface du modèle, suivie d'une période d'infiltration de $1,3 \times 10^{-6}$ m/s d'une durée de 1,8 heure (9 mm) et enfin une période d'infiltration de $1,6 \times 10^{-6}$ m/s d'une durée de 1,1 heure (6 mm). Les trois périodes d'infiltration ont été entrecoupées de pauses d'une durée respective de 2,5 et 3 heures, correspondant au temps pendant lequel le camion à eau était occupé à d'autres tâches sur le site de la mine. Les variations de TEV mesurées et simulées dans la couche de sable (SW) ont été comparées.

Les TEV initiales moyennes dans le haut de la couche de sable (SW-H) étaient similaires dans les simulations et sur le terrain ($TEV \approx 0,075$) (figure 5.22). L'arrivée du front de mouillage était d'environ 2,75 h dans les simulations, soit 15 min plus tôt que sur le terrain. L'augmentation maximale de TEV était de 0,037 dans les simulations et de 0,027 sur le terrain (soit une

différence de 0,01 ou encore 3% en termes de degrés de saturation). Les temps d'influence de l'essai d'infiltration étaient de 7 jours dans les simulations et sur le terrain.

La simulation numérique avec les paramètres ajustés (calibrés) a également permis de reproduire relativement bien les observations de terrain dans le bas de la couche de sable (50 cm sous le haut de la couche de sable), mais les différences avec les mesures de terrain étaient plus marquées que dans le haut de la couche de sable (figure 5.22). Ainsi, les TEV initiales moyennes simulées étaient de 0,073, soit 0,038 plus faible que sur le terrain (TEV = 0,073). L'arrivée du front de mouillage au niveau des sondes SW-b a été observée dans les simulations 7 heures après le début de l'essai, soit 1 heure plus tôt que sur le terrain. L'augmentation simulée de TEV suite au passage du front de mouillage était de 0,040 mais seulement de 0,014 (soit une différence de 0,026). Enfin, le temps d'influence de l'essai d'infiltration I-D était d'environ 16 jours dans les simulations, contre 5 jours sur le terrain.

Le comportement hydrogéologique simulé dans le haut de la couche de sable était pratiquement identique à celui observé sur le terrain. Les écarts étaient cependant sensiblement plus importants dans le bas de la couche de sable, mais ils restaient généralement dans la zone d'incertitude des sondes de teneur en eau ($\pm 0,03$). Les tendances générales et le temps d'arrivé du front de mouillage étaient donc similaires les simulations et sur le terrain.

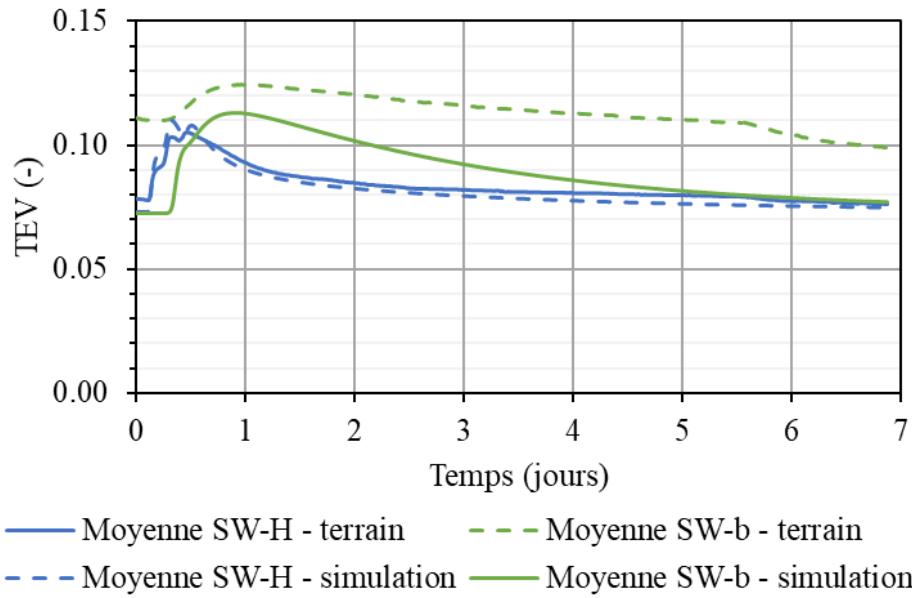


Figure 5.22 Variations de TEV simulées et mesurées sur le terrain dans le haut et le bas de la couche de sable à la suite de l'essai d'infiltration I-D.

5.1.5 Simulation des précipitations

Les précipitations du 30 juin 2016 au 7 septembre 2017 ont été simulées afin de valider le modèle numérique calibré. Cette période a été choisie parce que les températures se sont maintenues au-dessus du point de congélation en tout temps, que les précipitations ont été enregistrées par la station météo installée sur le site, et qu'aucun essai d'infiltration n'a été réalisé sur la halde durant cette période (note : le comportement hydrogéologique de la halde expérimentale pendant l'été 2017 est moins intéressant ici en raison de l'installation de la bâche imperméable). Les précipitations mesurées entre le 30 juin 2016 et le 7 septembre 2016 ont été appliquées comme conditions frontières au sommet du modèle numérique (section 3.3.3). Il a été supposé que l'infiltration était égale aux précipitations (pas de ruissellement) et que ces dernières étaient égales à la surface de la halde expérimentale. La simulation fait aussi l'hypothèse que le taux de précipitation est constant dans une même journée (volume total/jour).

Les TEV simulées dans le haut de la couche de sable de la CCE (SW-H) étaient similaires aux valeurs moyennes mesurées sur le terrain (figure 5.23). Les différences sont demeurées à l'intérieur de la zone d'incertitude des sondes ($\pm 0,03$) pour l'ensemble de la période étudiée. Les différentes arrivées des fronts de mouillage dues aux précipitations durant l'essai numérique ont affiché des retards maximaux de 16 heures et des avances maximales de 2,4 heures par rapport aux résultats de terrain. Les hausses de TEV du modèle numérique étaient bien corrélées avec les précipitations durant la même période. Les temps d'influence des précipitations (compris entre 1 et 3 jours) étaient proportionnels à la durée et au volume des précipitations.

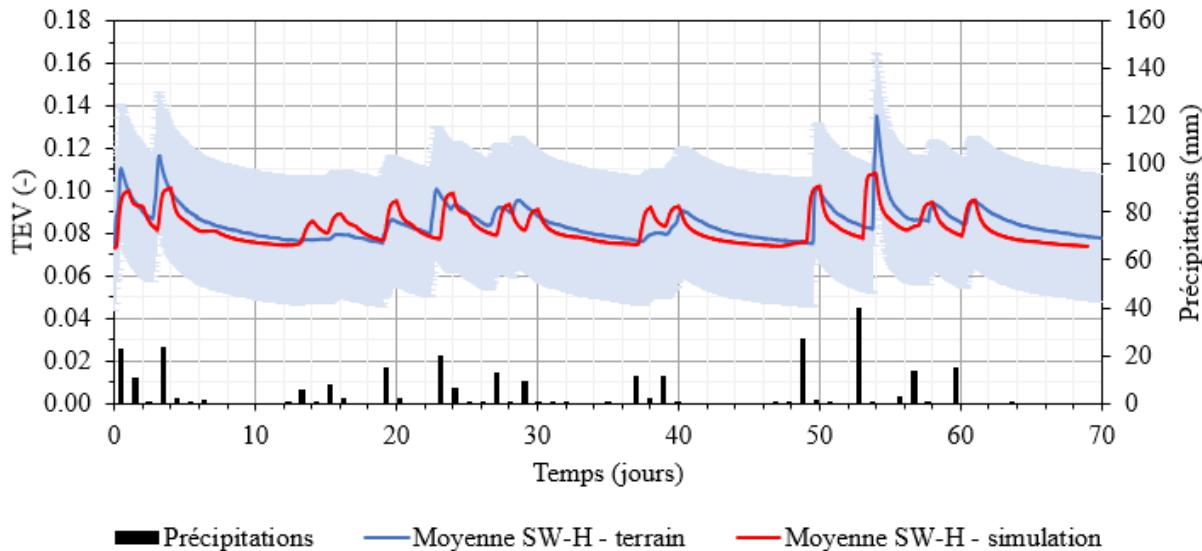


Figure 5.23 Comparaisons entre les variations de TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface de la halde, 20 cm sous la surface du sable) enregistrées sur le terrain et celles de la simulation pour la période du 6 juin au 9 septembre 2016. La zone en gris représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

Les TEV simulées dans le bas de la couche de sable de la CCE (SW-b) étaient similaires aux valeurs moyennes mesurées sur le terrain (figure 5.24). Les différences entre les deux sont restées à l'intérieur de la zone d'incertitude des sondes pour l'ensemble de la période étudiée ($\pm 0,03$). Les différentes arrivées des fronts de mouillage dues aux précipitations durant l'essai numérique ont affiché des retards maximaux de 16 heures et des avances maximales de 5 heures par rapport

aux résultats de terrain. La baisse de TEV s'est produite plus rapidement dans la simulation que sur le terrain comme ce qui a été observé dans les simulations des essais I-C et I-D (sections 5.1.3 et 5.1.4). Cette différence s'est traduite, dans la simulation, par une accumulation d'eau réduite dans le bas du sable par rapport aux observations en place.

Les résultats du haut et du bas de la couche de sable indiquent que les simulations numériques (calibrées) sont capables de bien reproduire les comportements observés sur le terrain non seulement pendant les essais d'infiltration à grande échelle, mais également pour des conditions climatiques normales.

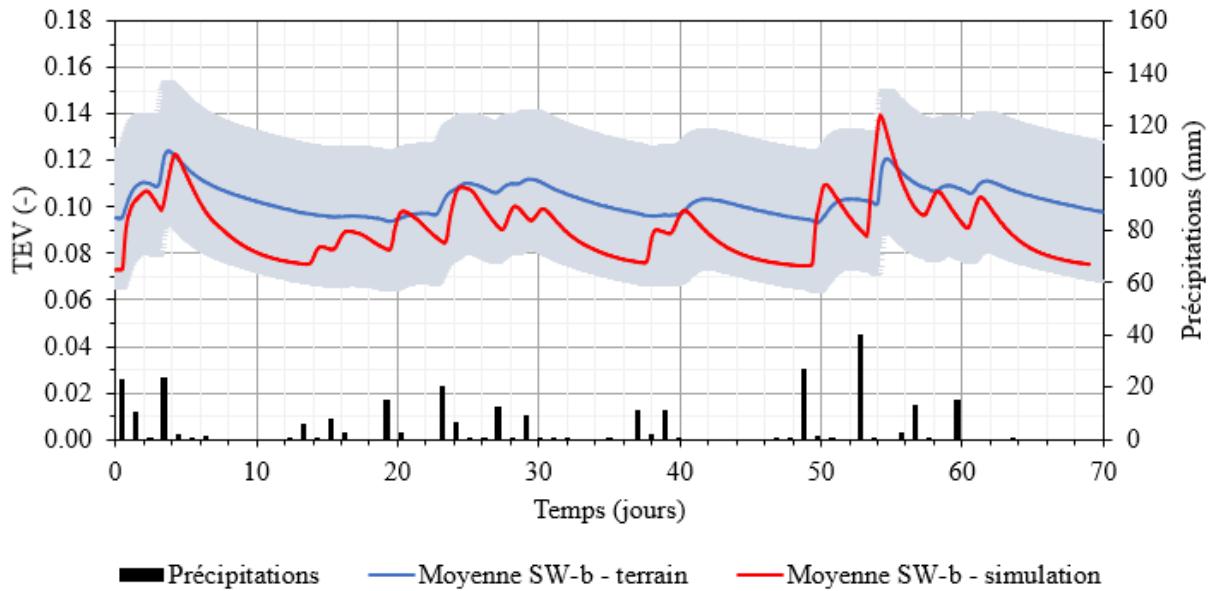


Figure 5.24 Comparaisons entre les variations de TEV dans le bas de la couche de sable (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) enregistrées sur le terrain et celles de la simulation pour la période du 6 juin au 9 septembre 2016. La zone en gris représente l'incertitude attribuable aux sondes de TEV GS3.

Les résultats présentés dans cette section ont permis de constater que les simulations numériques reproduisaient relativement bien les mesures réalisées sur la halde expérimentale. De façon générale, les différences suivantes ont été observées entre les résultats *in situ* et les simulations numériques :

- Les variations de TEV des simulations pour une même hauteur étaient identiques alors que celles enregistrées en place montraient une plus grande variabilité.
- Les variations de TEV sont mieux représentées par les simulations dans le haut de la couche de sable que dans le bas.
- Les simulations indiquaient des diminutions de TEV plus rapides que celles enregistrées en place dans le bas de la couche de sable, avec un écoulement simulé plus rapide du sable vers les stériles.
- Les TEV dans les stériles ont montré des augmentations plus faibles que celles observées *in situ* lors du passage du front de mouillage.
- Les débits de sortie simulés étaient généralement plus faibles que les mesures manuelles. Des tendances similaires étaient cependant observées mais avec un certain retard dans les modèles par rapport aux résultats en place.

La calibration des paramètres des simulations numériques est le résultat d'un ajustement progressif (par essais-erreurs) des propriétés des matériaux, dont le but était de reproduire au mieux les résultats obtenus sur la halde expérimentale. L'ajustement d'un paramètre pouvait contribuer à améliorer les résultats pour une partie de la halde, mais altérer les résultats pour une autre partie. La calibration présentée ici constitue donc un compromis. De façon générale, les simulations ont bien reproduit le comportement observé sur le terrain et le modèle calibré a ensuite été utilisé comme modèle de base afin d'étudier de façon plus générale le comportement d'une halde avec CCE (sections suivantes).

5.2 Effet de la porosité des matériaux de la couche de contrôle des écoulements

La porosité des matériaux de la CCE dépend de la façon dont les matériaux sont mis en place, de l'épaisseur des couches, de la teneur en eau lors du dépôt, et de l'équipement utilisé et du nombre de trajets réalisés à la surface de la halde. Dans le cas de la halde expérimentale, le sable et la roche stérile concassée de la CCE ont été fortement compactés (Bréard Lanoix, 2017), mais cette porosité pourrait être contrôlée lors de l'application de la méthode à plus grande échelle. L'effet

de la densité sur les écoulements dans la CCE a été étudié numériquement. Des porosités de 0,4 et de 0,2 ont été simulées ($n \approx 0,3$ sur la halde expérimentale). Ces valeurs couvrent l'ensemble de l'intervalle de porosités mesurées dans le sable et la roche stérile concassée au laboratoire et sur le terrain (Bréard Lanoix, 2017 et cette étude). Les courbes de rétention d'eau des matériaux (figure 5.25) ont été estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003; section 2.2.3) et ajustées avec le modèle de van Genuchten (1980; section 2.2.3). Les conductivités hydrauliques saturées ont été estimées avec le modèle KCM (Mbonimpa et al., 2002; section 2.2.4) et les fonctions de perméabilité avec le modèle de Mualem (1976; section 2.2.4) (figure 5.26). Les propriétés des stériles, les conditions frontières et la géométrie du modèle étaient identiques au modèle de base (sections 5.1.2 et 5.1.3).

L'augmentation de la porosité des matériaux de la CCE (sable et roches stériles concassées) a entraîné une augmentation (+1,5 kPa pour le sable et +0,1 kPa pour la roche stérile concassée) de la pression d'entrée d'air, une réduction (-2 kPa pour le sable et la roche stérile concassée) de la succion résiduelle et une augmentation de la conductivité hydraulique saturée d'environ 1 ordre de grandeur par rapport aux propriétés calibrées sur les résultats de terrain ($n = 0,3$; figure 5.25 et 5.26). L'effet contraire a été observé pour une réduction de la porosité.

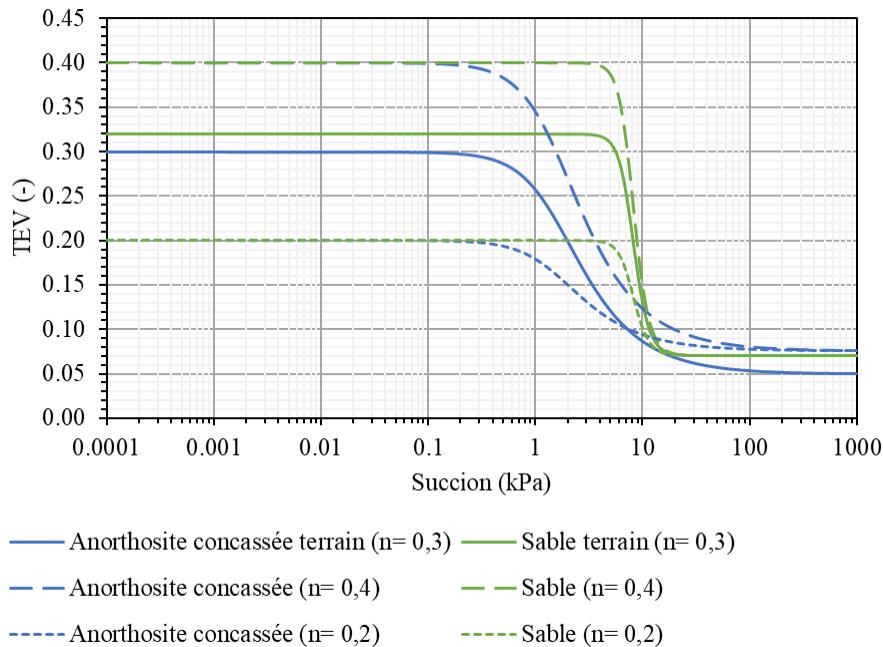


Figure 5.25 Courbes de rétention d'eau du sable et de la roche stérile concassée, estimées pour les différentes porosités simulées.

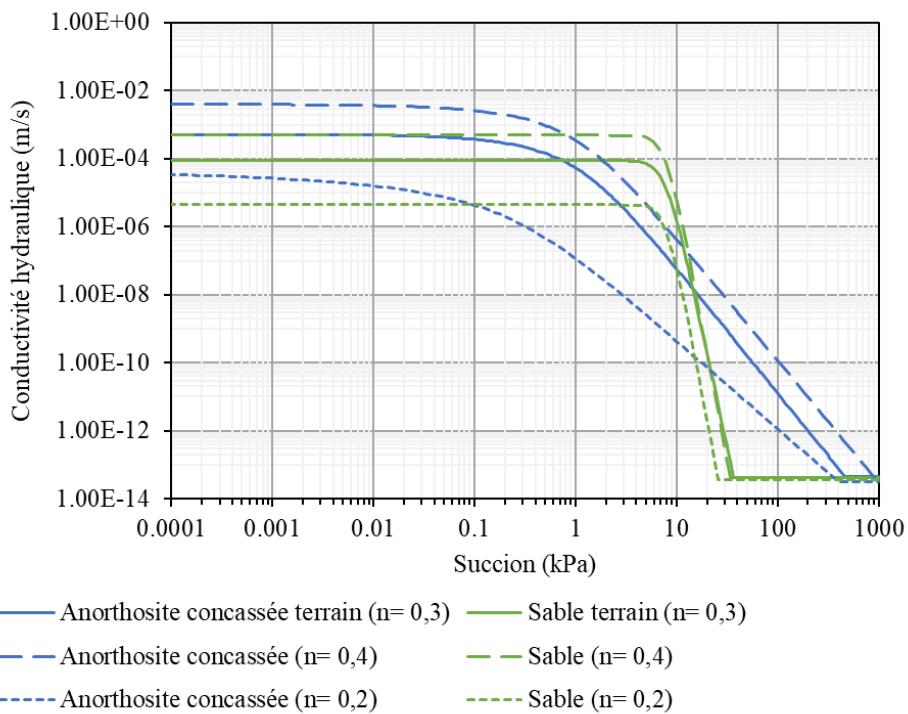


Figure 5.26 Fonctions de perméabilité du sable et de la roche stérile concassée, estimées pour les différentes porosités simulées.

Les vecteurs de flux simulés au sommet de la halde avec une CCE plus compactée ($n=0,2$) ne montraient aucune déviation latérale notable du front de mouillage à l'interface entre le sable et les stériles (figure 5.27). Les mêmes observations ont été réalisées indépendamment de la position le long de la CCE. L'eau semblait être retenue temporairement dans le bas de la couche de roches stériles concassées mais s'infiltrait ensuite dans la couche de sable sous-jacente puis dans les stériles.

Les vecteurs de flux simulés au sommet de la halde avec une CCE moins compactée ($n = 0,4$) ont montré une déviation latérale vers le bas de la pente un peu plus marquée, à l'interface entre le sable et les stériles (figure 5.28). Cette légère déviation a cependant été suivie d'une propagation relativement uniforme du front de mouillage dans les stériles. La rupture partielle de l'effet de barrière capillaire a notamment été marquée par une baisse de la succion sur une épaisseur de 60 cm.

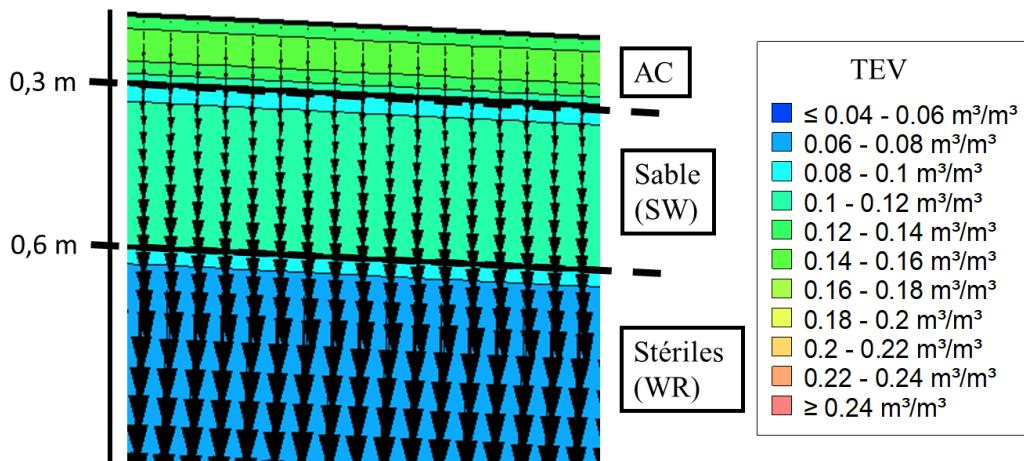


Figure 5.27 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec la CCE plus compacté ($n = 0,2$) deux jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.

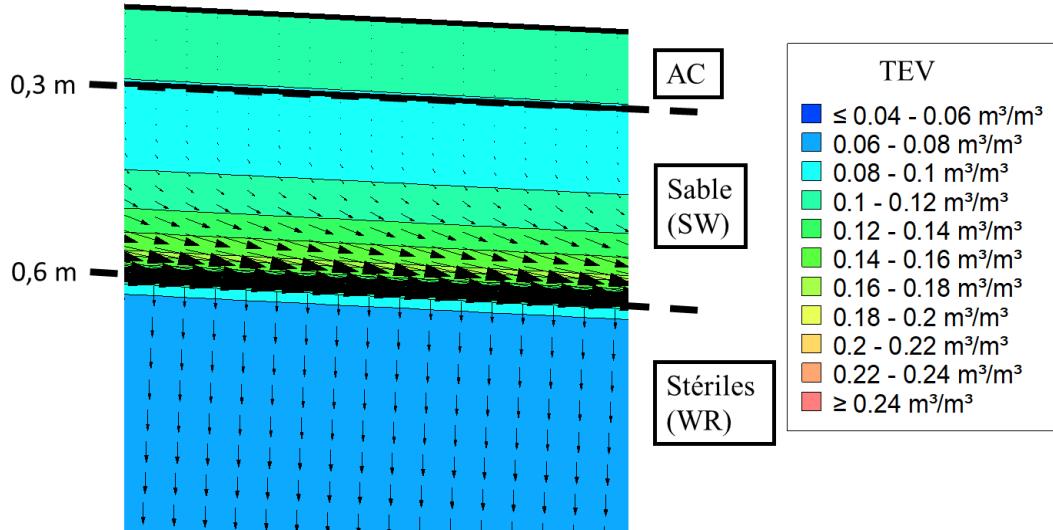


Figure 5.28 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec la CCE plus compacté ($n = 0,4$) deux jours après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.

L'effet de la porosité sur la capacité de rétention et de déviation a été évaluée en comparant les débits cumulés à la sortie des lysimètres 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C (figure 5.29). Les taux de récupération du volume infiltré étaient semblables mais sensiblement plus faibles (85%) pour une porosité $n=0,2$ que pour des matériaux plus lâches (89% et 91% pour des porosités de 0,4 et 0,3 respectivement).

La répartition des débits cumulés par lysimètre après 30 jours a montré des tendances similaires pour les trois porosités simulées (figure 5.30 et 5.31) à savoir une augmentation des débits entre le lysimètre 1 et le lysimètre 6. Les lysimètres 5 et 6 cumulaient en général environ 33% des débits cumulés mais cette valeur était légèrement plus élevée pour des matériaux moins denses (34% pour $n = 0,4$ contre 32% pour $n = 0,2$). Ces différences restaient cependant peu significatives compte tenu de la précision des simulations numériques.

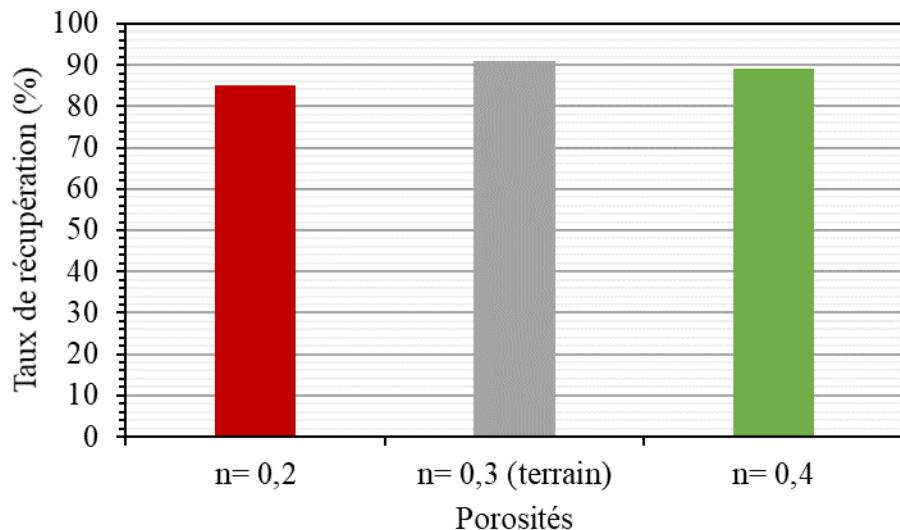


Figure 5.29 Valeurs simulées du taux de récupération de l'eau infiltrée 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction de la porosité des matériaux de la CCE.

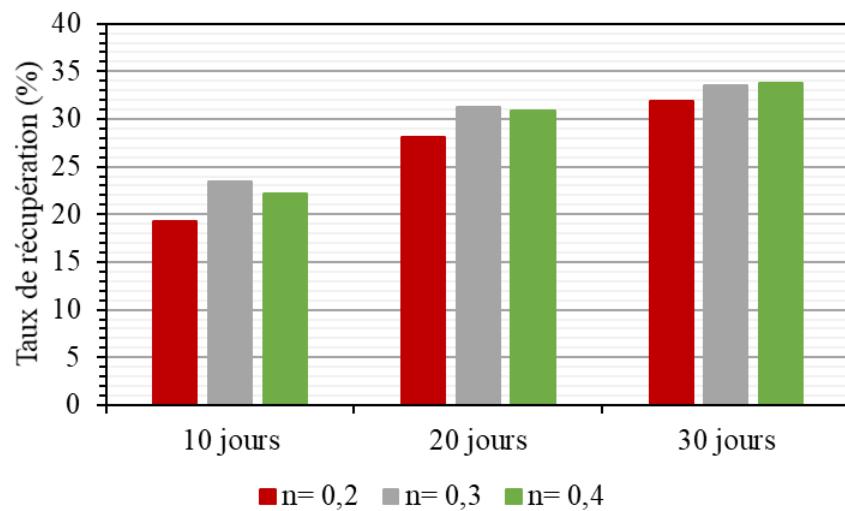


Figure 5.30 Valeurs simulées du taux de récupération des débits de sortie cumulés des lysimètres 5 et 6 (combinés) par rapport au volume total infiltré en fonction de la porosité de la CCE pour des durées de 10, 20 et 30 jours.

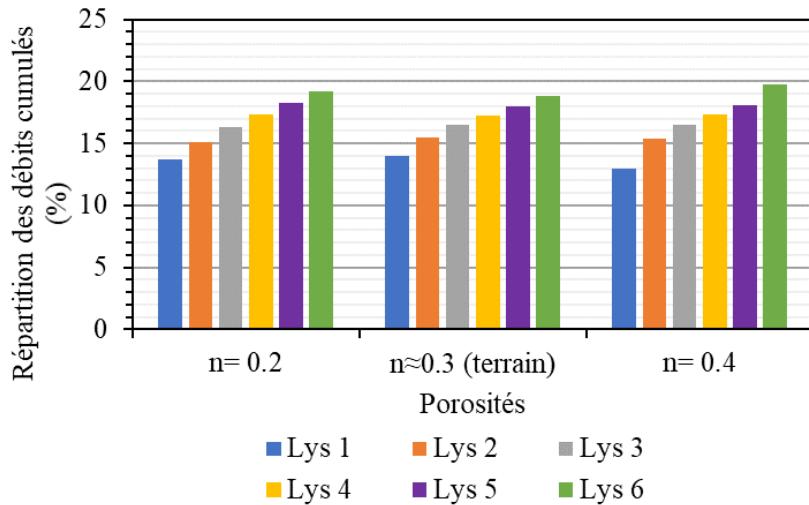


Figure 5.31 Répartition des débits cumulés 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C par lysimètre pour différentes porosités des matériaux de la CCE.

Une porosité plus faible dans les matériaux de la CCE (c'est-à-dire une compaction plus importante) semble donc, dans les conditions simulées, entraîner un retard dans l'écoulement de l'eau dans la halde. Il semblerait également qu'une porosité plus élevée contribue à augmenter sensiblement la déviation de l'eau vers le pied de la halde et donc à améliorer l'efficacité de la CCE. Cette amélioration se traduit par un écart plus important entre les débits récupérés entre les lysimètres 1 et 6 dans la figure 5.31. L'écart entre la répartition des débits cumulés des lysimètres 1 et 6 est ainsi de 5% pour une porosité de 0,2 et de 7% pour une porosité de 0,4.

5.3 Effet des propriétés hydrogéologiques des roches stériles

Le concept de CCE repose sur le principe de barrière à effet de capillaire (section 2.4.1), et donc sur le contraste de propriétés hydrauliques entre les rejets et les matériaux de la CCE. L'effet des propriétés des roches stériles a été étudié ici en simulant deux stériles significativement plus grossiers et plus fins que ceux en place sur la halde expérimentale de la mine du Lac Tio. Les propriétés des roches stériles proviennent des travaux réalisés par Bolduc (2012) et par Gamache-Rochette (2004). Ces matériaux (Stériles – Bolduc et Stériles – Gamache-Rochette) ont été sélectionnés sur la base de leurs courbes granulométriques ; ils contiennent, respectivement 10%

et 25% de particules dont le diamètre est inférieur à 4,76 mm (gravier; 55% pour les stériles de la halde expérimentale). Des porosités de 0,29 (Stériles Bolduc) et 0,25 (Stériles Gamache-Rochette) ont été considérées, ce qui correspondait aux propriétés des matériaux lors de leur caractérisation au laboratoire. Les courbes de rétention d'eau ont été estimées avec le modèle MK (Aubertin et al., 2003; section 2.2.3) et ajustées avec le modèle de van Genuchten (1980; section 2.2.3) (figure 5.32 et tableau 5.4). Les conductivités hydrauliques saturées ont été prédites avec le modèle KCM (Mbonimpa et al., 2002; section 2.2.4) et les fonctions de perméabilité avec le modèle de Mualem (1976; section 2.2.4) (figure 5.33 et tableau 5.4). Les propriétés des matériaux de la CCE et les conditions aux frontières étaient les mêmes que pour le modèle de terrain (section 5.1) à l'exception de la précipitation en régime permanent du modèle Stériles Bolduc qui a été réduite à 1×10^{-12} m/s pour améliorer la convergence du modèle.

Les stériles Gamache-Rochette ont une granulométrie plus fine ce qui entraîne un AEV (2 kPa) et une succion résiduelle (ψ_r) (20 kPa) plus élevés que pour les stériles de la mine Lac Tio (figure 5.32). La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) est deux ordres de grandeur plus faible que celle utilisée pour la halde expérimentale (1×10^{-5} m/s). Les stériles Bolduc sont plus grossiers que ceux de la mine Lac Tio ce qui se traduit par un AEV similaire (0,65 kPa) mais une succion résiduelle (ψ_r) plus faible (2 kPa). La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des stériles Bolduc est un ordre de grandeur plus élevé que ceux de la halde expérimentale (3×10^{-2} m/s).

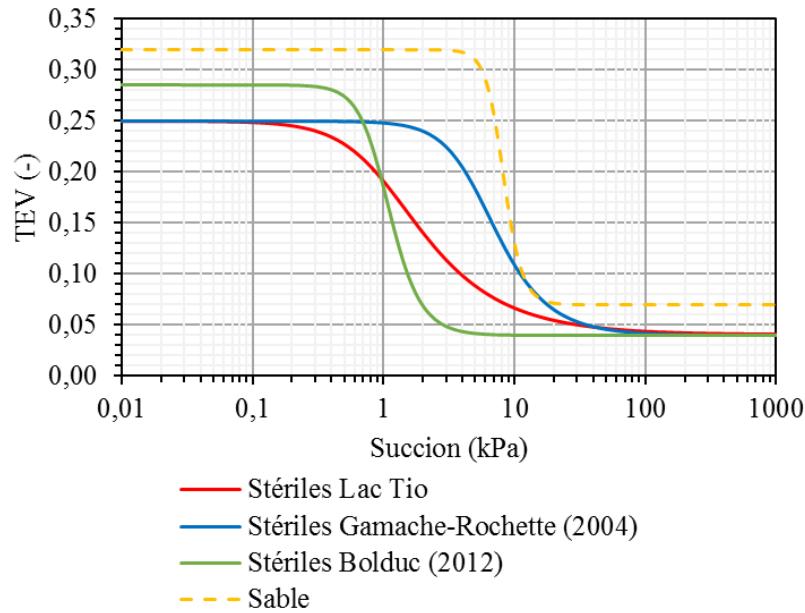


Figure 5.32 Courbes de rétention d'eau des stériles simulés. Stériles Lac Tio : ilménite (ce projet); Stériles Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) et stériles Bolduc (Bolduc, 2012). Sable: sable de la CCE (ce projet).

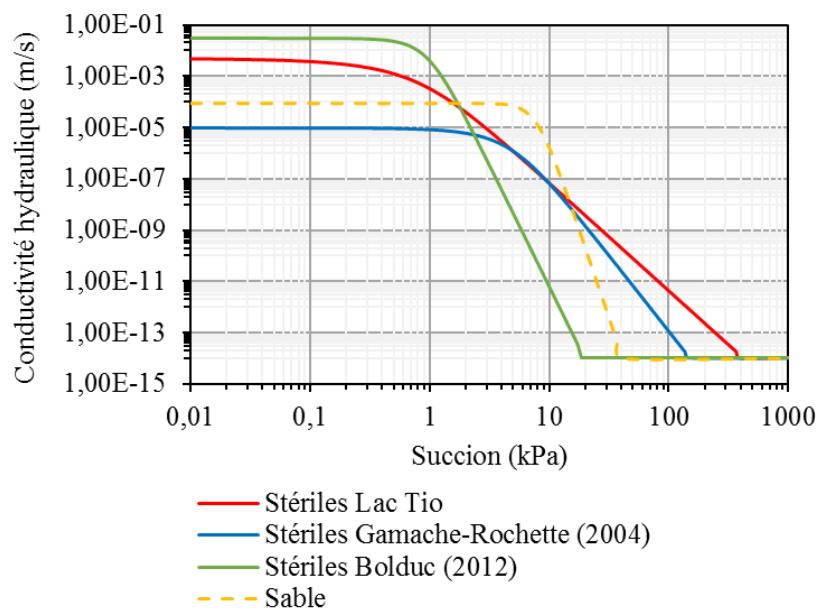


Figure 5.33 Fonctions de perméabilité des stériles simulés. Stériles Lac Tio : ilménite (ce projet); Stériles Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) et stériles Bolduc (Bolduc, 2012). Sable : sable de la CCE (ce projet).

Tableau 5.4 Propriétés des stériles des mines Lac Tio (cette étude), Bolduc (Bolduc, 2012) et Gamache-Rochette (Gamache-Rochette, 2004) utilisés pour l'analyse numérique.

Propriétés	Matériaux		
	Stériles Lac Tio	Stériles Bolduc	Stériles Gamache-Rochette
n	0,25	0,29	0,25
θ_r	0,04	0,04	0,04
AEV (kPa)	0,40	0,65	2,00
WEV (kPa)	8	2	20
k_{sat} (m/s)	5×10^{-3}	3×10^{-2}	1×10^{-5}

Les vecteurs de flux simulés au sommet de la halde avec des Stériles Bolduc montraient une déviation latérale importante de l'eau vers le bas de la pente (figure 5.34). Les écoulements latéraux se concentraient dans le bas de la couche de sable, quelques centimètres au-dessus des stériles. Ce phénomène a été observé pour l'ensemble de la halde, indépendamment de la position dans la pente. Les infiltrations d'eau dans les stériles semblaient faibles et limitées à quelques centimètres de profondeur. La TEV était ainsi plus élevée que lors du même essai avec les stériles de la mine du Lac Tio (0,20 contre 0,14). De plus la simulation avec les stériles Bolduc n'a pas montré d'écoulement significatif entre la CCE et les stériles sous-jacents, contrairement à ce qui a été observé dans la simulation des conditions de la mine du Lac Tio (figure 5.10).

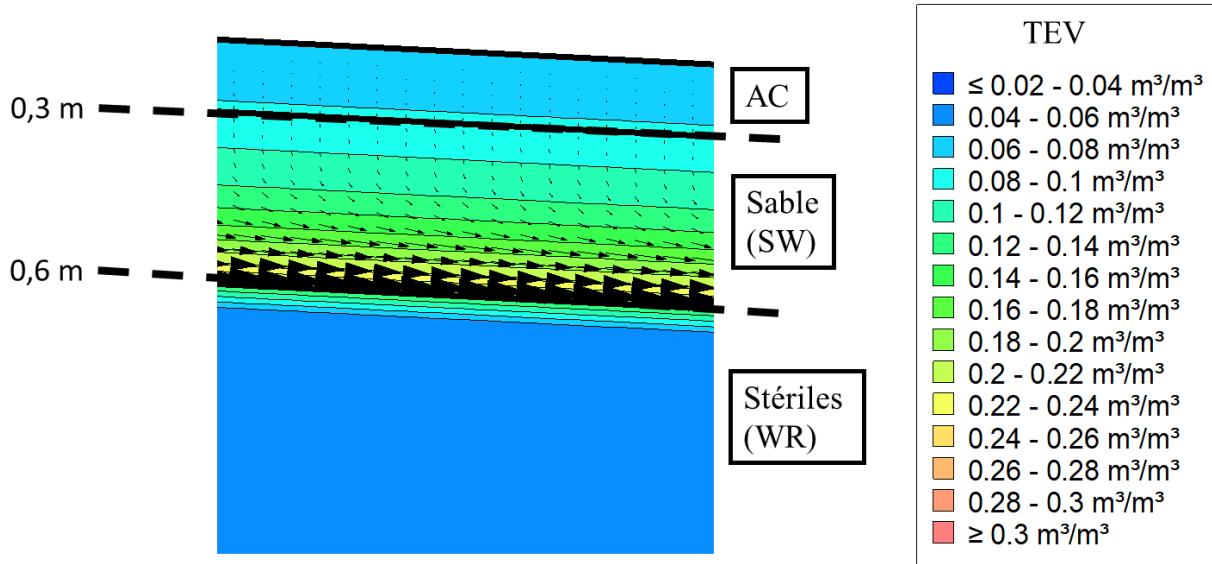


Figure 5.34. Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec les stériles Bolduc un jour après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.

La déviation latérale de l'eau dans le cas d'une halde construite avec des stériles Bolduc est également visible en termes de TEV. Ainsi, les TEV dans le bas de la couche de sable après 100 jours atteignaient des valeurs de 0,19 ($S_r = 60\%$) en bas de pente ($x = 60$ m) contre 0,13 ($S_r = 40\%$) dans le haut de la pente ($x = 10$ m) (figure 5.35). La TEV dans les stériles était constante et égale à la valeur résiduelle du matériau ($\theta_r = 0,04$). L'effet de barrière capillaire entre les stériles Bolduc (2012) et le sable de la CCE semblait donc bien développé (ce qu'indiquent également les profils de succion; Annexe O) et permettait la déviation efficace de l'eau d'infiltration vers le pied de la halde.

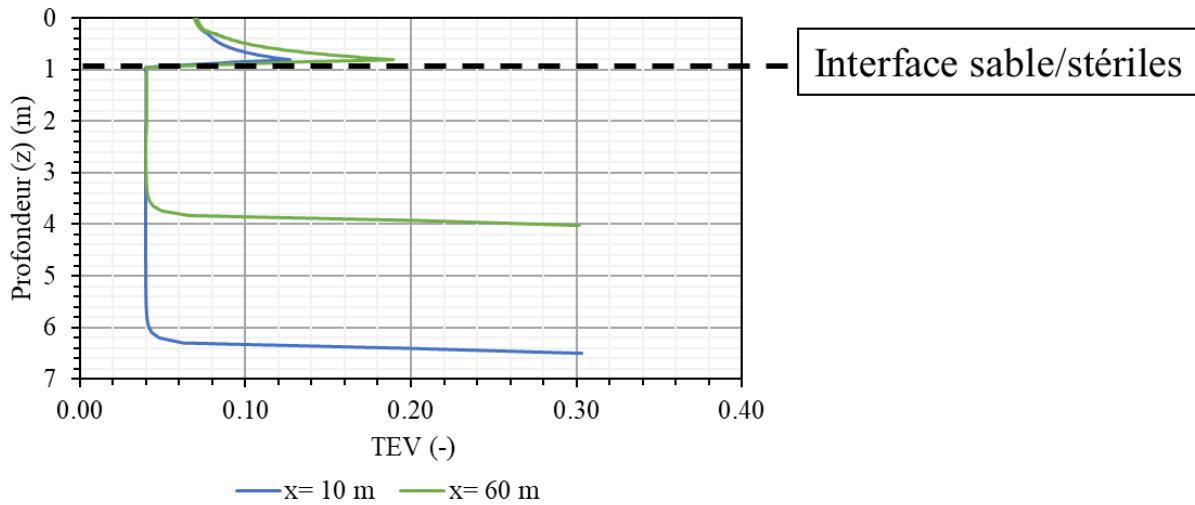


Figure 5.35 Profils de TEV simulées dans le haut ($x = 10$ m) et le bas ($x = 60$ m) de la pente de la halde expérimentale, avec les stériles Bolduc (2012), 100 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C.

Les résultats des simulations avec les stériles Gamache-Rochette (2004) ont également montré une légère déviation latérale du front de mouillage vers le bas de la pente, à l'interface entre le sable et les stériles, mais plus faible qu'avec les stériles Bolduc (figure 5.36). Cette déviation était cependant limitée et a été suivie par une infiltration marquée et uniforme du front de mouillage dans les stériles (indiquée par les vecteurs de flux verticaux au sommet des stériles dans la figure 5.36). Ce phénomène a été observé pour l'ensemble de la halde, indépendamment de la position dans la pente. Une certaine accumulation d'eau a été observée dans le bas de la CCE (TEV d'environ 0,16 pour $x = 15$ m, soit $S_r = 50\%$) mais elle était plus faible que pour le cas avec les stériles Bolduc ($TEV = 0,19$) en raison de l'infiltration dans les stériles.

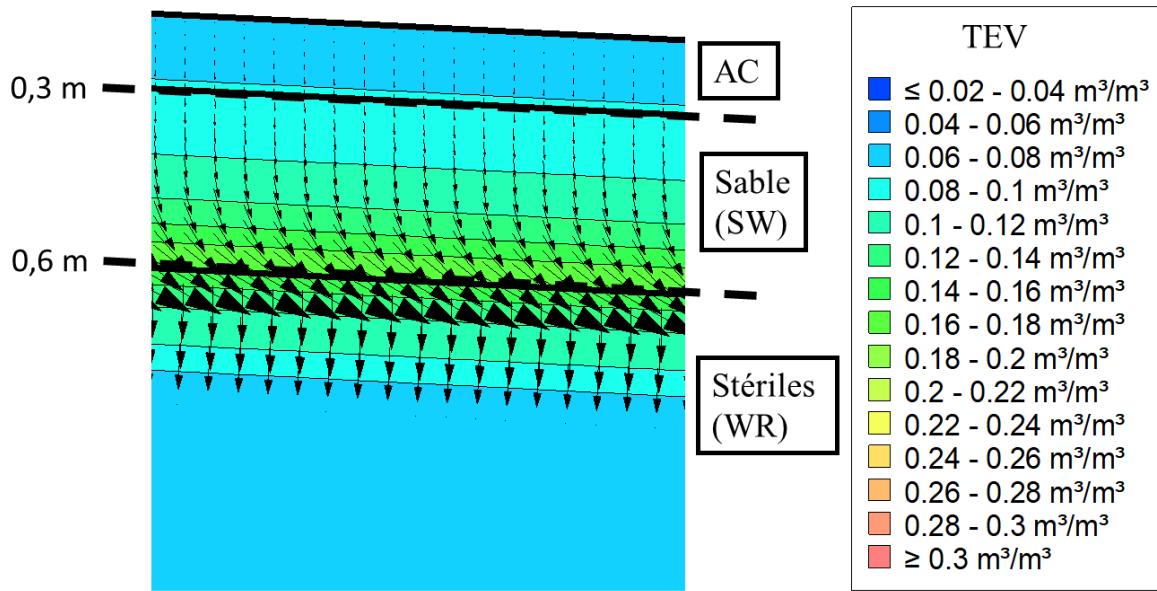


Figure 5.36 Plan rapproché du haut de la halde à stériles de la simulation avec les stériles Gamache-Rochette un jour après le début de l'essai d'infiltration I-C. Les flèches (vecteurs de flux) indiquent le sens de l'écoulement et montrent une infiltration verticale de l'eau dans les stériles. Les résultats sont présentés ici à $x = 15$ m mais étaient similaires ailleurs le long de la CCE. AC : Roches stériles concassées.

Les taux de récupération totaux simulés 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C étaient plus faibles avec les stériles de Bolduc (15%) et Gamache-Rochette (21%) que dans les simulations de Lac Tio (92%) (figure 5.37). La répartition des débits par lysimètres montrait aussi des différences importantes entre les cas simulés (figure 5.38). Les débits simulés après 30 jours avec les stériles Bolduc étaient ainsi essentiellement concentrés au niveau du lysimètre 6 (99,9%). Cette observation n'était pas seulement due à un effet du temps, puisque les débits cumulés après 100 jours de drainage sans précipitations (non présentés ici) montraient un taux de récupération de 43% ($12,1 \text{ m}^3$) qui étaient également concentrés presque uniquement dans le lysimètre 6. Ces résultats présentaient donc un contraste important avec les résultats des simulations de terrain pour lesquelles les débits cumulés (simulés, mais aussi mesurés) se répartissaient de manière plus équitable entre les lysimètres. Les simulations avec les stériles Gamache-Rochette montraient un comportement intermédiaire aux deux autres cas, avec une déviation latérale vers le bas de la pente importante, mais moins marquée qu'avec les stériles

Bolduc. Ainsi, environ 47% des débits totaux après 30 jours étaient récupérés dans le lysimètre 6, et 27% dans le lysimètre 5, soit au total 74% pour les deux lysimètres du pied de la halde. Néanmoins, le prolongement des simulations sur 70 jours a montré que la répartition des débits par lysimètre tendait à s'équilibrer avec le temps, et que les différences observées étaient également dues, en partie, à la progression, plus lente, du front de mouillage dans les stériles. Ainsi, le taux de récupération total après 70 jours atteignait 65% et les débits cumulés dans le lysimètre 6 ne comptaient plus que pour 25% du total.

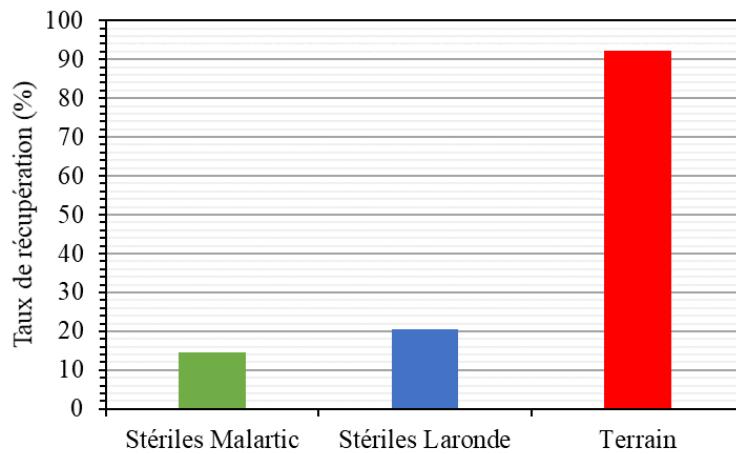


Figure 5.37 Taux de récupération simulés 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les stériles Bolduc, Gamache-Rochette et Lac Tio.

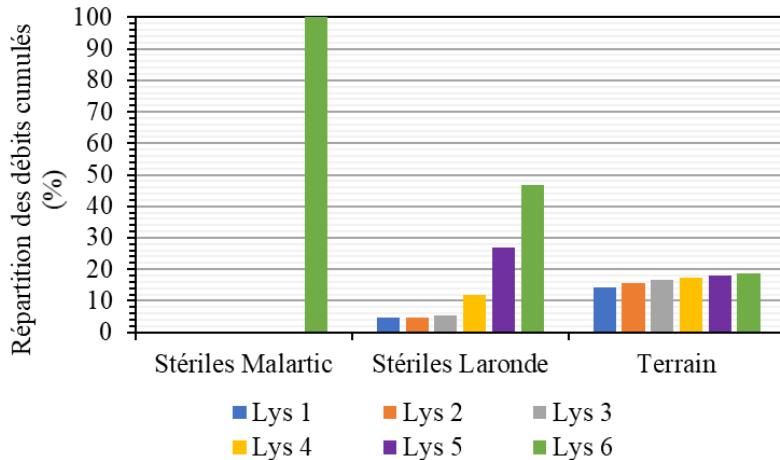


Figure 5.38 Répartition des débits cumulés simulés par lysimètres 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C avec les stériles Bolduc, Gamache-Rochette et Lac Tio.

Les simulations numériques ont montré l'influence majeure des propriétés des roches stériles sur l'écoulement dans la halde expérimentale et sur la performance de la CCE. Des stériles de granulométrie plus fine ont entraîné un certain retard dans la progression du front de mouillage dans les stériles, en raison notamment d'une conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) plus faible. Ce phénomène semblait favoriser une déviation latérale vers le bas de la pente de l'eau d'infiltration à court et moyen terme (< 30 jours) bien que des simulations à plus long terme (70 jours) aient montré une répartition plus homogène des débits par lysimètres. L'épaisseur des stériles sous la pente semblait donc jouer un rôle dans la répartition de débits de sortie. L'utilisation de stériles de granulométrie plus grossière semblait favoriser l'écoulement latéral de l'eau le long de la CCE, vers le pied de la halde. Le contraste marqué entre les propriétés hydrogéologiques du sable et des stériles grossiers a contribué à développer un effet de barrière capillaire qui s'est maintenu pour toute la durée du drainage (et jusqu'à 100 jours après la phase d'infiltration). Cependant, le taux de récupération total était plus faible que dans les autres cas ($12,1 \text{ m}^3$ d'eau après 100 jours, soit 43% de l'infiltration totale) ce qui laisse supposer qu'une partie importante de l'eau a été retenue dans la CCE et pourrait éventuellement, à terme, s'infiltrer dans les stériles sous-jacents (en l'absence d'évaporation, comme dans les conditions simulées ici).

5.4 Effets de l'angle de la pente de la CCE

L'inclinaison de la CCE permet la déviation de l'eau vers le pied de la halde et la longueur de déviation de l'eau (L_D) (section 2.4.1.2; Bussière, 1999) est reliée à l'angle de la pente. L'effet de la pente a été évalué ici en simulant des inclinaisons de 3%, 7% et 10%. Les comparaisons ont été réalisées sur la base de l'essai d'infiltration I-C (section 3.3.2). La variation de l'inclinaison de la CCE a été apportée à partir du milieu de la halde ($x=30$ m) de façon à maintenir le volume de stériles entreposés dans la halde expérimentale constant (figure 5.39). Ces ajustements ont donc entraîné des variations dans les hauteurs maximales et minimales du modèle. Les propriétés des matériaux utilisées et les conditions aux frontières sont identiques aux simulations du modèle de terrain (essai C; section 5.1).

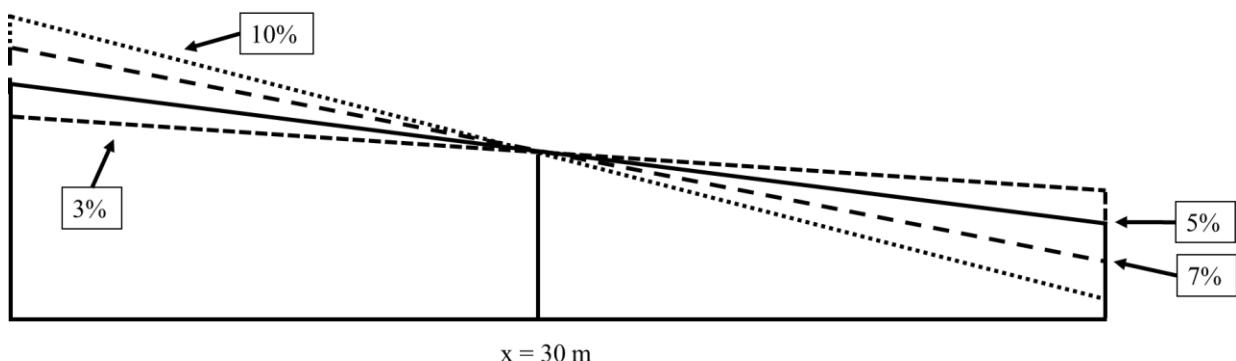


Figure 5.39 Géométries du modèle de la halde expérimentale pour diverses inclinaisons (3%, 5% (terrain), 7% et 10%) de la CCE.

L'angle d'inclinaison de la CCE n'a pas eu d'impact significatif sur la quantité totale d'eau récupérée dans les lysimètres, qui demeurait autour de $25,5 \text{ m}^3$, soit 90% de l'eau appliquée au sommet de la halde, après 30 jours. L'écoulement semblait cependant se concentrer vers le pied de la halde à mesure que l'angle d'inclinaison augmentait (figure 5.41). Ainsi, les débits cumulés dans les lysimètres 5 et 6 après 30 jours étaient de $9,1 \text{ m}^3$ (32%) pour une pente de 3%, $9,6 \text{ m}^3$ (34%) pour une pente de 7% et $10,0 \text{ m}^3$ (36%) pour une pente de 10% (figure 5.40). Les débits cumulés pour le lysimètre 3 demeuraient similaires dans tous les cas, indépendamment de l'angle

de la pente, ce qui pourrait indiquer que l'épaisseur des stériles (et donc le temps de drainage) a également un effet sur la répartition des débits simulés.

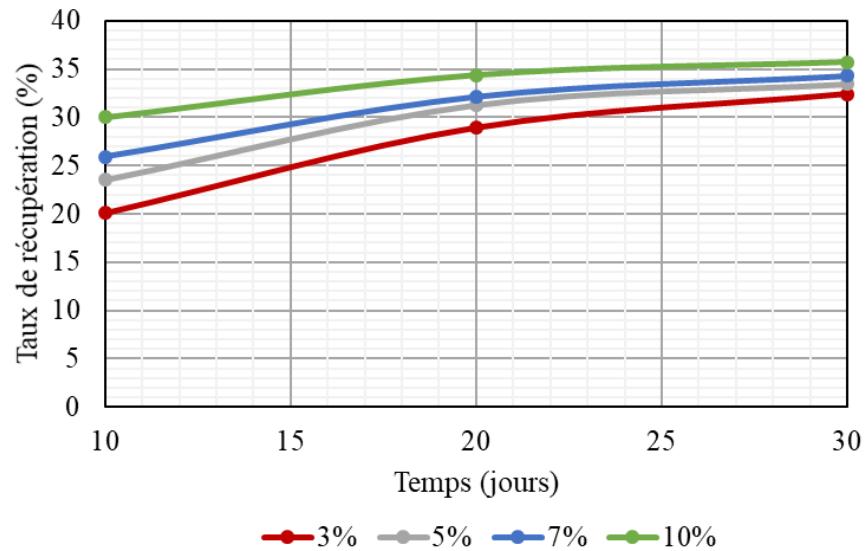


Figure 5.40 Taux de récupération des débits cumulés des lysimètres 5 et 6 par rapport à l'infiltration totale de 10 à 30 jours après l'essai d'infiltration I-C.

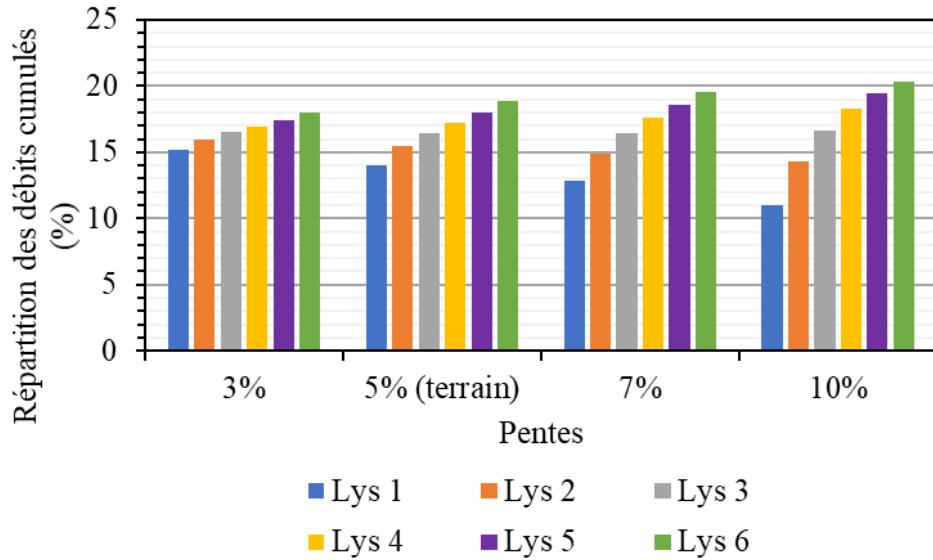


Figure 5.41 Répartition des débits cumulés par lysimètre selon les différentes inclinaisons de la CCE, 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C.

La répartition des débits cumulés en fonction de la pente de la CCE a montré que l'augmentation de l'angle de la pente avait pour effet, dans les conditions simulées, d'augmenter la déviation de l'eau dans la CCE. En effet, la différence entre les débits cumulés des lysimètres 1 et 6 était plus importante pour une pente de 10% que pour celle de 3% pour un taux de récupération de l'eau infiltrée semblable. La tendance à la baisse des débits cumulés des lysimètres 1 et 2 et la tendance contraire pour les lysimètres 4, 5 et 6, avec l'augmentation de l'angle de la pente, traduisait aussi d'une déviation plus importante de l'eau vers le pied de la halde. Le contraste entre les propriétés du sable et du stérile n'était probablement pas assez important pour entraîner une rétention d'eau dans le bas de la couche de sable et ainsi permettre le développement d'un point (zone) d'écoulement dans les stériles (*DDL*).

5.5 Effets de l'épaisseur de la CCE

L'épaisseur de la couche de rétention d'eau dans un recouvrement multicouche incliné peut influencer la longueur de déviation de l'eau (L_D) (Aubertin et al., 2009; section 2.4.1.2) et donc la performance du recouvrement. L'épaisseur des couches de sable et de roches stériles concassées

ont été multipliées par 0,5 (épaisseur de la CCE = 42,5 cm), 1,5 (127,5 cm) et 2 (170,0 cm) dans les simulations afin d'évaluer la réponse hydrogéologique de la halde expérimentale à l'épaisseur de la CCE. L'épaisseur de la couche de stériles a été maintenue constante et la hauteur et le volume total du modèle variaient donc en fonction de l'épaisseur de la CCE. Les conditions aux frontières et les propriétés des matériaux étaient identiques aux simulations de l'essai à grande échelle I-C (section 5.1).

Le temps d'arrivée du front de mouillage dans le bas de la couche de sable augmentait, comme attendu, avec l'épaisseur de la CCE (figure 5.42). Il était d'environ 1 heure pour la CCE la moins épaisse (42,5 cm) et pouvait atteindre 14 heures pour la CCE la plus épaisse (170,0 cm). L'augmentation de TEV était inversement proportionnelle à l'épaisseur de la CCE et seule la CCE de 42,5 cm d'épaisseur (la plus fine) permettait d'observer les trois pics successifs liés aux phases d'arrosage de l'essai d'infiltration à grande échelle.

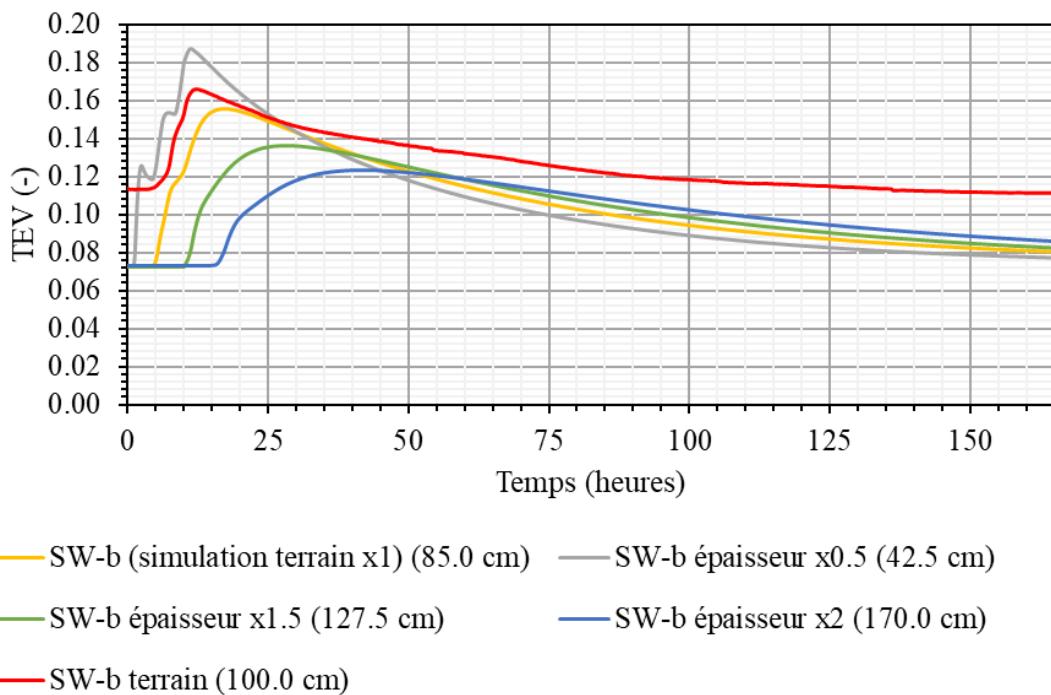


Figure 5.42 Variation des TEV moyennes dans le bas de la couche de sable (10 cm au-dessus de l'interface avec les stériles) suite à l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.

L'augmentation de l'épaisseur de la CCE a également entraîné un retard dans l'arrivée du front de mouillage dans le haut des stériles, 10 cm sous l'interface avec le sable, qui était compris entre 2,25 h pour une CCE de 42,5 cm d'épaisseur, et 15,75 heures pour une épaisseur de 170 cm (figure 5.43). L'augmentation de TEV suite à l'essai d'infiltration était inversement proportionnelle à l'épaisseur de la CCE, mais demeuraient faible et relativement similaire. Ces augmentations de TEV étaient sensiblement plus faibles qu'observées sur le terrain lors de l'essai d'infiltration (par exemple 0,043 pour le lysimètre 5; section 4.3.1).

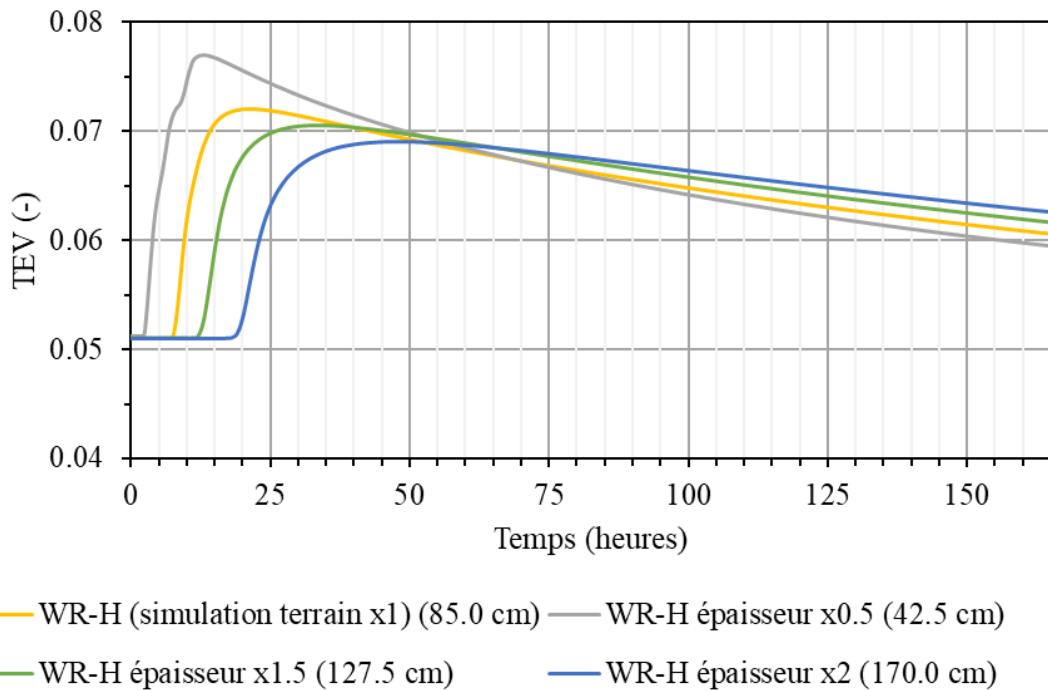


Figure 5.43 Variation des TEV moyennes dans le haut des stériles (10 cm sous la couche de sable) suite à l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.

Les taux de récupération totaux dans les lysimètres à la base de la halde étaient sensiblement les mêmes et compris entre 87% et 92% après 30 jours (figure 5.44). Une légère diminution des débits pouvait être observée pour les CCE les plus épaisses mais le phénomène était principalement attribuable au retard observé dans l'infiltration du front de mouillage. La répartition des débits sortants par lysimètre montrait également une tendance similaire après

30 jours, indépendamment de l'épaisseur de la CCE (figure 5.45). Les débits cumulés dans les lysimètres 5 et 6 représentaient en général 37% du total.

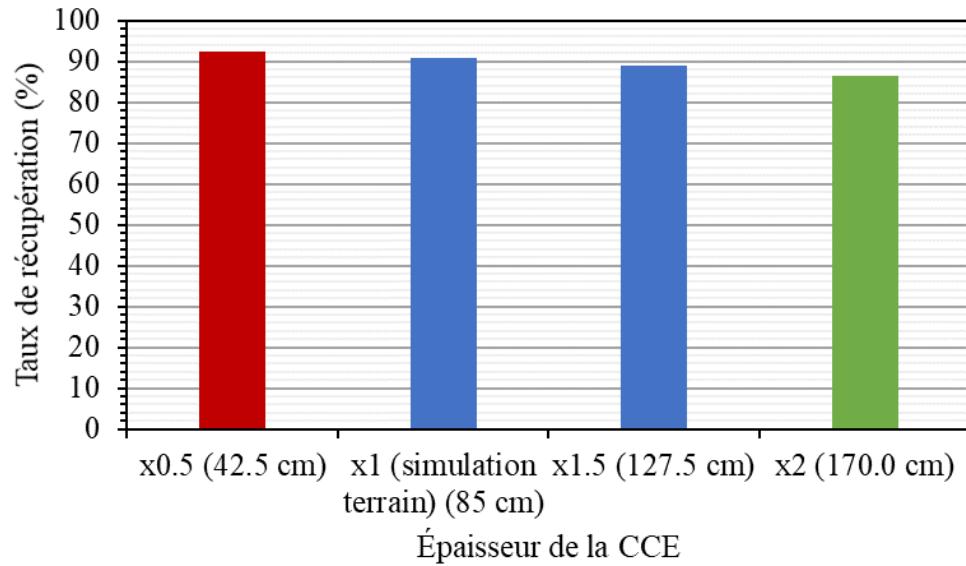


Figure 5.44 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.

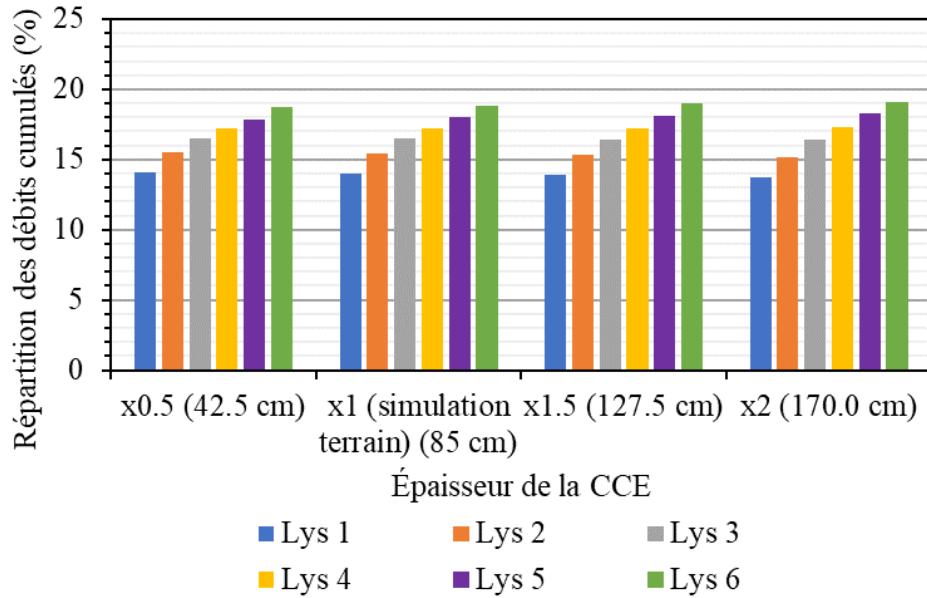


Figure 5.45 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C pour différentes épaisseurs de CCE.

L'augmentation de l'épaisseur de la CCE dans les simulations n'a pas montré d'influence notable sur sa performance et sur la déviation latérale de l'eau d'infiltration. Il semblerait cependant qu'une plus grande épaisseur contribuerait à ralentir sensiblement l'écoulement vertical et à « amortir » l'infiltration (front de mouillage plus étendu, pic de TEV plus faible). L'épaisseur de la CCE pourrait donc éventuellement être ajustée afin de mieux répondre aux précipitations les plus extrêmes.

5.6 Effets du matériau de la couche de contrôle des écoulements

Le matériau choisi pour la CCE doit répondre à des critères spécifiques (granulométrie, courbe de rétention d'eau et conductivité hydraulique notamment) afin de développer un effet de barrière capillaire avec les stériles et permettre une déviation latérale rapide des eaux d'infiltration (section 2.4.1). Le choix du matériau dépend également de contraintes opérationnelles, comme sa disponibilité sur ou à proximité du site. La CCE installée sur la halde expérimentale était constituée de deux matériaux, soit un sable local et un stérile d'anorthosite concassé. La

possibilité (et l'intérêt) d'utiliser un seul de ces deux matériaux a été évaluée numériquement. Les propriétés du sable et de la roche stérile concassée étaient celles calibrées sur les essais de terrain. Les propriétés des stériles, la géométrie du modèle (en particulier l'épaisseur de la CCE) et les conditions frontières étaient identiques à celles des simulations de l'essai d'infiltration I-C (section 3.3.2).

Les taux de récupération de l'eau infiltrée pour les simulations avec une CCE composée uniquement de sable ou de roches stériles concassées étaient identiques après 7 jours (soit 23%) aux résultats de base (deux couches; figure 5.46). Ces taux de récupération restaient toutefois inférieurs de 16% aux mesures sur le terrain (notamment en raison du retard dans l'écoulement de l'eau dans la halde; voir discussion à la section 4.3.1). La répartition des débits cumulés par lysimètre était également similaire pour les trois cas simulés (sable uniquement, roches stériles concassées uniquement et deux couches), avec des débits cumulés dans les lysimètres 5 et 6 atteignant environ 70% après 7 jours (figure 5.47). Comme pour les simulations avec une CCE constituée de deux matériaux, les écarts de débits cumulés entre les lysimètres tendaient à se réduire avec le temps de drainage (résultats non présentés ici).

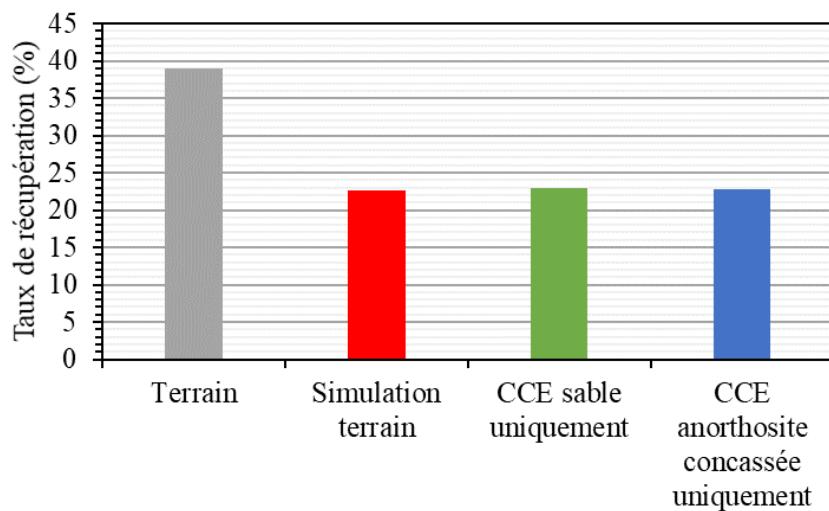


Figure 5.46 Taux de récupération du volume infiltré 7 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction des matériaux de la CCE. Les résultats de terrain sont également rappelés ici.

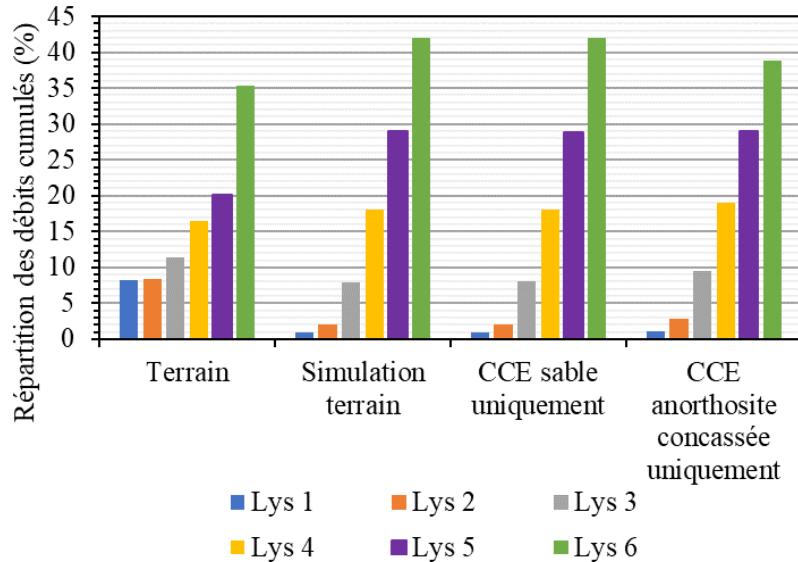


Figure 5.47 Répartition des débits cumulés par lysimètre 7 jours après le début de l'essai d'infiltration I-C en fonction des matériaux de la CCE. Les résultats de terrain sont également rappelés ici.

Les propriétés du sable et de la roche stérile concassée étaient relativement similaires (section 5.1.2), et l'utilisation de l'un ou l'autre n'a pas semblé améliorer significativement la déviation de l'eau dans la CCE. Il serait donc préférable, afin d'améliorer la performance de la CCE sur le terrain, de choisir d'autres matériaux, ou de modifier la compaction des matériaux (section 5.2) ou l'angle de la pente (section 5.4).

5.7 Effets des précipitations

5.7.1 Précipitations usuelles

L'essai d'infiltration à grande échelle I-C correspondait à un événement de précipitation de grande ampleur et de forte intensité, peu courant au regard des conditions climatiques sur le site de la mine Lac Tio. Des précipitations d'ampleur et/ou d'intensité plus faibles ont donc été simulées afin d'évaluer la réponse hydrogéologique de la CCE et de la halde expérimentale à des précipitations plus habituelles (tableau 5.5). Les propriétés des matériaux, la géométrie du modèle, et les conditions initiales étaient identiques aux simulations de l'essai d'infiltration I-C

sur le terrain (section 5.1). Le ruissellement était supposé négligeable dans ces simulations, et le taux d'infiltration correspondait au taux de précipitation.

Tableau 5.5 Caractéristiques des événements de précipitations usuels simulés.

Précipitation	Volume (m ³)	Hauteur (mm)	Durée (heures)	Équivalent en m/s
1	5	8	12	$1,9 \times 10^{-7}$
2	10	17	12	$3,9 \times 10^{-7}$
3	15	25	12	$5,8 \times 10^{-7}$
4	20	33	12	$7,7 \times 10^{-7}$

Le taux de récupération du volume d'eau infiltré après 30 jours augmentait avec le volume des précipitations et était compris entre 74 % (précipitation 1) et 87 % (précipitation 4) (figure 5.48). La répartition des débits par lysimètre indiquait globalement une concentration des écoulements dans les lysimètres 5 et 6, mais plus marquée pour des précipitations plus faibles. Par exemple, le taux de récupération dans les lysimètres 5 et 6 après 30 jours était de 46% pour la précipitation 1 et de 38% pour la précipitation 4 (figure 5.49).

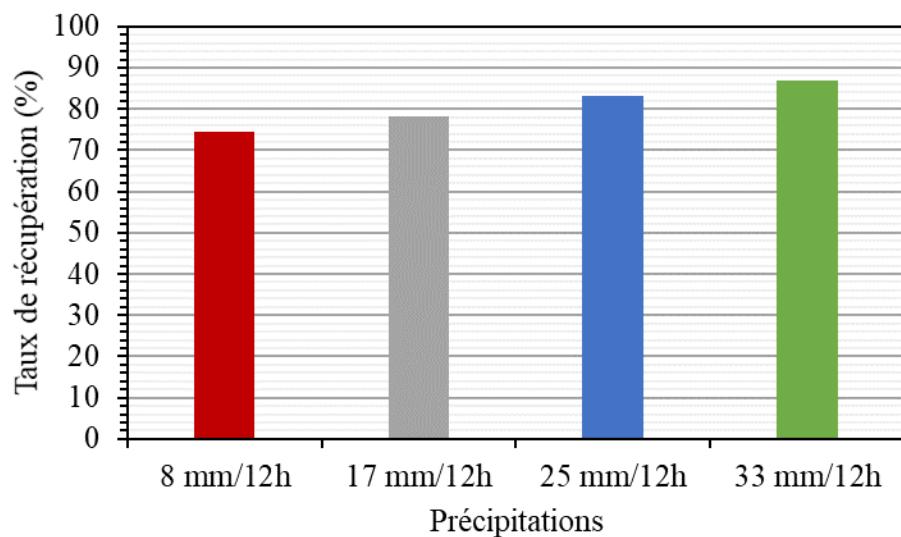


Figure 5.48 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après les précipitations 1 (8 mm/12h), 2 (17 mm/12h), 3 (25 mm/12h) et 4 (33 mm/12h).

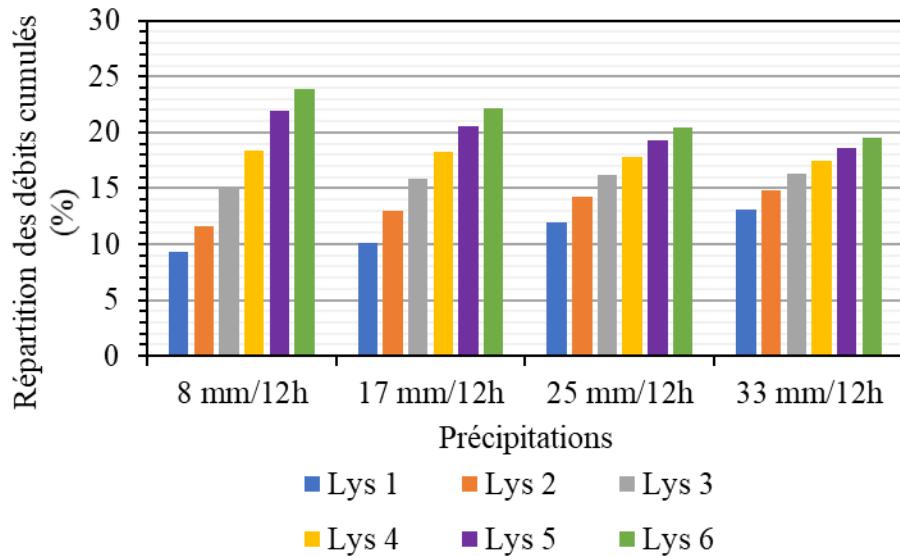


Figure 5.49 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après les précipitations 1 (8 mm/12h), 2 (17 mm/12h), 3 (25 mm/12h) et 4 (33 mm/12h).

Les simulations numériques semblaient donc indiquer une meilleure déviation de l'eau d'infiltration le long de la CCE, vers le pied de la halde, lorsque les précipitations étaient plus faibles. Une telle observation est en accord avec les solutions analytiques du calcul du point DDL (Ross, 1990). Cette différence était aussi liée (en partie) à des taux de récupération totaux plus faibles.

5.7.2 Précipitations extrêmes

Le comportement de la halde expérimentale et de la CCE ont été évalués pour des conditions extrêmes de précipitations (périodes de retour de 100 ans et de 1000 ans, et PMP) (Hatch, 2015; tableau 5.6). Aucun ruissellement n'a été considéré dans ces simulations bien que celui-ci soit probable. En effet, toutes les précipitations simulées dans cette section excèdent la limite d'infiltration de la CCE estimée lors des essais de terrain ($1,7 \times 10^{-6}$ m/s section 3.3.2; figure 3.7). Les propriétés des matériaux, la géométrie du modèle, les conditions initiales et la condition frontière à la base de la halde étaient identiques aux cas précédents (section 5.1).

Tableau 5.6 Précipitations maximales simulées (Hatch, 2015).

Précipitation	Quantité par jour (24 heures)		Équivalent m/s	
	mm	m ³ *		
Maximale				
Période de récurrence				
100 ans	171	103	$2,0 \times 10^{-6}$	
1000 ans	226	136	$2,6 \times 10^{-6}$	
Maximale probable (PMP)				
Probabilité				
1:100000	285	171	$3,3 \times 10^{-6}$	
1:1000000	300	180	$3,5 \times 10^{-6}$	

*Le volume d'eau a été calculé à partir de l'aire au sommet de la CCE (600 m²).

Les analyses numériques ont montré que ces précipitations extrêmes entraînaient une infiltration généralisée dans les stériles, sans déviation par la CCE. Une analyse limite de la capacité d'absorption de la CCE a été réalisée en considérant le temps auquel le front de mouillage atteint la couche de stériles (tableau 5.7). Les volumes maximaux infiltrés avant la rupture de l'effet de barrière capillaire étaient compris entre 62 m³ et 68 m³ (tableau 5.7) pour des temps limites compris entre 14,5 heures (pour une précipitation de 1:100 ans) et 9 heures (PMP 1:1 000 000). Les temps d'atteinte de la limite et volume d'eau maximaux étaient directement liés à la vitesse d'infiltration de l'eau dans la halde expérimentale et non aux propriétés de la CCE.

Tableau 5.7 Analyse limite des précipitations maximales dans les simulations de la halde expérimentale.

Précipitation	m/s	Temps d'atteinte de la limite de la CCE (heure)	Volume d'eau limite (m ³)
Maximale 1/100 ans	$1,98 \times 10^{-6}$	14,5	62
Maximale 1/1000 ans	$2,62 \times 10^{-6}$	11,5	65
PMP 1:100000	$3,30 \times 10^{-6}$	9,5	68
PMP 1:1000000	$3,47 \times 10^{-6}$	9,0	67

5.7.3 Intensité des précipitations

L'intensité des précipitations influence le comportement hydrogéologique d'une CCE et en particulier la longueur de diversion de l'eau (L_D) (Aubertin et al., 2009; section 2.4.1.2). Le volume d'eau appliqué durant l'essai d'infiltration I-C (28 m^3) a été réparti sur des périodes de 2, 5, 7, et 10 jours (tableau 5.8). Les propriétés des matériaux, la géométrie du modèle, les conditions initiales et la condition frontière à la base de la halde étaient identiques aux cas précédents (section 5.1).

Tableau 5.8 Intensités des précipitations simulées. Les précipitations ont été calculées en répartissant le volume d'eau appliquée lors de l'essai d'infiltration I-C sur des périodes allant de 2 à 10 jours.

Période d'étalement de l'essai d'infiltration I-C	Intensité de la précipitation	
	mm/h	m/s
2 jours	0,97	$2,70 \times 10^{-7}$
5 jours	0,39	$1,08 \times 10^{-7}$
7 jours	0,28	$7,69 \times 10^{-8}$
10 jours	0,19	$5,38 \times 10^{-8}$

Les taux de récupération totaux du volume d'eau infiltré 30 jours après la fin des précipitations étaient très similaires d'un modèle à l'autre (~90%), malgré des précipitations qui s'étaient sur plusieurs jours (figure 5.50). La répartition des débits cumulés par lysimètres montrait une légère déviation latérale de l'eau vers le pied de halde (lysimètres 5 et 6) qui demeure relativement constante avec l'accroissement de l'intensité des précipitations. Par exemple, le taux de récupération dans les lysimètres 5 et 6 après 30 jours était de 36% pour la répartition sur 10 jours et de 37% pour la répartition sur 10 heures (simulation de terrain) (figure 5.51).

La CCE n'a pas montré de différence significative d'efficacité de déviation de l'eau pour les différents cas de la section 5.7 à l'exception du cas de l'infiltration de faibles volumes d'eau (5.7.1). Il serait donc préférable, afin d'améliorer la performance de la CCE pour des

précipitations de plus grands volumes, de choisir d'autres matériaux (augmentation du contraste entre les propriétés), ou de modifier la compaction des matériaux (section 5.2) ou l'angle de la pente (section 5.4).

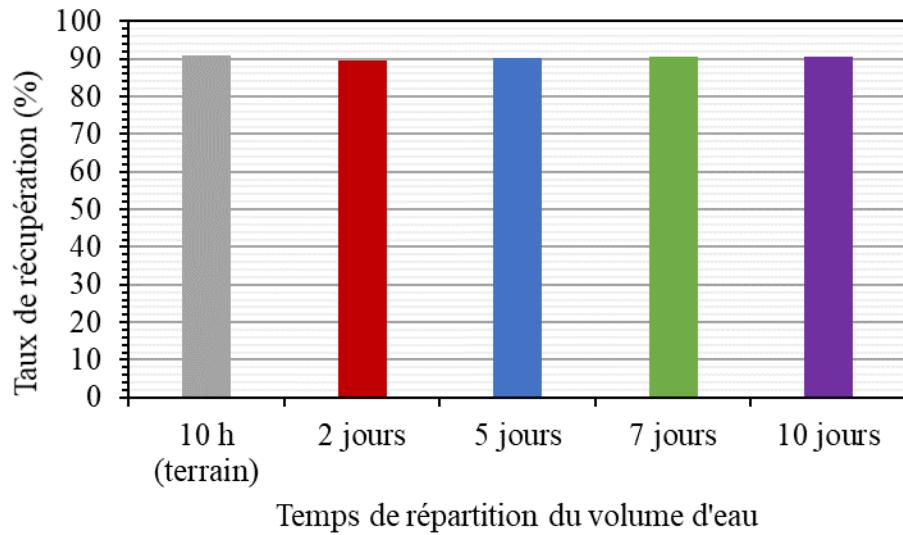


Figure 5.50 Taux de récupération du volume d'eau infiltré 30 jours après la fin des précipitations réparties sur 10 h, 2 jours, 5 jours, 7 jours et 10 jours.

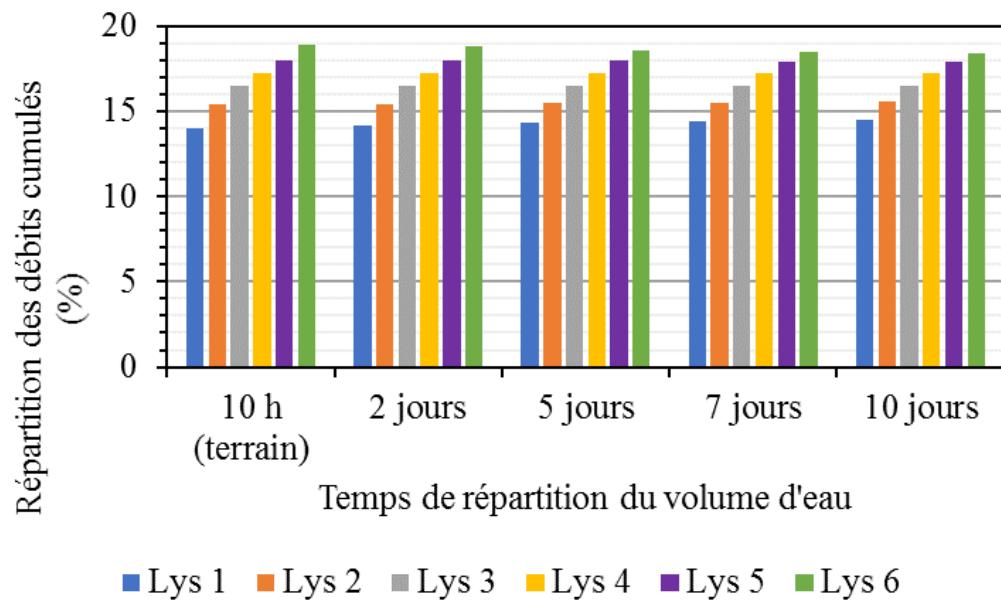


Figure 5.51 Répartition des débits cumulés par lysimètre 30 jours après les précipitations réparties sur 10 h, 2 jours, 5 jours, 7 jours et 10 jours.

CHAPITRE 6 SYNTHÈSE, DISCUSSION, CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Synthèse

Une nouvelle méthode de construction des haldes à stériles a été développée, proposée et testée par la chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT en environnement minier (Aubertin et al., 2002b; Fala et al., 2003, 2005; Aubertin et al., 2005; Fala et al. 2006; Aubertin et al., 2008; Intissar, 2009; Aubertin et al., 2013; Dawood et al., 2014). Cette approche vise à limiter l'infiltration d'eau au moyen d'une (ou plusieurs) CCE et à contrôler ainsi la génération de drainage contaminé. Le contraste entre les propriétés hydrauliques du matériau de granulométrie fine de la couche de contrôle des écoulements (CCE) et celles du matériau de granulométrie plus grossière (stériles) doit permettre le développement d'un effet de barrière capillaire à l'interface entre les deux matériaux. L'eau est ainsi retenue et déviée latéralement le long de la pente de la CCE vers le pied de la halde composé de matériaux non réactifs. La halde expérimentale de la mine du Lac Tio a été construite afin de tester ce concept dans des conditions réelles de terrain.

L'objectif de ce projet était l'étude du comportement hydrogéologique de la CCE de la halde à stériles expérimentale de la mine du Lac Tio. Cette halde expérimentale a été instrumentée avec des sondes de TEV et des sondes de mesure de la succion. Les résultats des mesures des sondes de TEV ont fait l'objet de corrections pour chaque matériau dans lesquelles elles ont été installées (soit à partir des mesures réalisées sur le terrain ou à partir des résultats des simulations numériques). Ces calibrations (ou corrections) ont été difficiles puisque les conditions au laboratoire n'étaient pas représentatives du terrain et que la plupart des sondes étaient inaccessibles pour la calibration *in situ*. De plus, six lysimètres ont été aménagés sous la halde expérimentale pour récupérer les eaux infiltrées. Des mesures de débits de sortie ont été réalisées pour chacun des lysimètres de façon à évaluer la répartition du volume d'eau pour chacune des sections de la halde.

Dans un premier temps, une étude des propriétés de la roche stérile concassée a été réalisée *in situ* et au laboratoire dans le but de mieux évaluer les caractéristiques de l'infiltration dans la CCE. Au total, cinq essais d'infiltrations à grande échelle d'une durée comprise entre 62 et 334 minutes (sans les pauses) pour des volumes de 6,4 à 28 m³ ont été réalisés sur la CCE de la

halde expérimentale de la mine Lac Tio. Le but de ces essais était de simuler des précipitations de façon contrôlée en utilisant un camion à eau. Les résultats de ces essais ont ensuite été utilisés pour la validation et la calibration d'un modèle numérique 2D représentatif du comportement hydrogéologique de la CCE et de la dynamique générale d'écoulement dans la halde. Les résultats du modèle calibré ont ensuite été comparés aux des résultats des autres essais d'infiltration et des précipitations enregistrées sur le site de la mine Lac Tio. Enfin, une série d'analyses paramétriques sur les propriétés des matériaux, la géométrie de la halde expérimentale et les conditions météoriques a été réalisée.

Les résultats des essais d'infiltration à grande échelle ont montré une propagation plutôt uniforme du front de mouillage à travers la CCE. Les différences de TEV mesurées dans la CCE étaient probablement dues aux différences de porosité dans les couches de sable et de roches stériles concassées ou à l'arrosage non uniforme de la surface lors des essais d'infiltration à grande échelle. Les TEV dans le bas de la couche de sable ont permis de montrer une déviation latérale de l'eau qui demeurait limitée à cette profondeur. L'eau a semblé s'accumuler dans le bas de la couche, et être déviée légèrement pour ensuite être drainée plus ou moins lentement dans les stériles (figure 4.9 et 4.23); un comportement similaire a été observé dans les simulations numériques de terrain. Les différences observées dans l'augmentation de TEV dans les stériles mesurées *in situ* semblaient indiquer la présence d'écoulements localisés sur la halde expérimentale. Les simulations numériques montraient pour leur part une propagation relativement uniforme du front de mouillage dans les stériles. Le contraste entre les propriétés des stériles et celles du sable (figure 5.5 et 5.6) ne semblait donc pas suffisant pour développer un effet de barrière capillaire suffisamment fort (Aubertin et al., 2002b, 2009; Fala et al. 2005). Les débits de sortie mesurés et simulés sur une période de 7 jours ont montré un écoulement plus important dans les lysimètres du pied de la halde (particulièrement les lysimètres 5 et le 6). Cependant, les simulations numériques ont permis de constater que la récupération dans les lysimètres avait tendance à s'équilibrer avec le temps. Le retard observé dans la progression du front de mouillage dans les stériles (et pour les débits associés) était donc probablement lié à la différence d'épaisseur des stériles entre les lysimètres 1 et 6 (7 m contre 4 m respectivement).

Les analyses numériques réalisées dans le cadre de l'étude paramétrique ont montré que :

- Une porosité plus faible des matériaux de la CCE semblait entraîner un retard dans l'écoulement de l'eau dans la halde. Une porosité plus élevée semblait à l'inverse augmenter sensiblement la déviation de l'eau vers le pied de la halde et donc l'efficacité de la CCE.
- La progression du front de mouillage dans la halde était plus lente pour des stériles plus fins.
- Des stériles plus grossiers permettait le développement d'un effet de barrière capillaire en raison d'un contraste plus marqué avec les propriétés du sable (section 5.3). Cet effet de barrière capillaire plus marqué permettait également une meilleure déviation latérale de l'eau d'infiltration le long de la CCE (limitée par les propriétés du sable).
- Les analyses numériques avec les différents stériles n'ont pas permis d'identifier un point (ou zone) DDL dans la pente à l'interface entre le sable et les stériles (section 2.4.1.2; Ross, 1990; Bussière, 1999; Cifuentes, 2006; Martin et al., 2006; Aubertin et al., 2006, 2009; Lacroix Vachon et al., 2015). La vitesse de l'écoulement latéral et l'accumulation d'eau dans le bas de la couche de sable n'était probablement pas assez importantes (dans les conditions simulées) pour créer une pression d'eau suffisante pour atteindre la valeur d'entrée d'eau (WEV) des roches stériles et donc permettre une percolation.
- L'angle de la CCE était un facteur qui influence son efficacité. La faible déviation de l'eau observée pour une pente de 5% doublait pour une pente de 10% (section 5.4). Des études antérieures sur la relation entre la longueur de diversion et l'angle de la pente d'une couche drainante dans une barrière capillaire ont montré des résultats similaires à ce qui a été observé dans cette étude (Ross, 1990; Morris et Stormont, 1999).
- L'épaisseur de la CCE n'a pas montré d'influence notable sur sa performance et sur la déviation de l'eau vers le pied de la halde. Une épaisseur plus importante a montré un « amortissement » de l'infiltration qui pourrait être mis à profit pour répondre aux précipitations plus extrêmes. D'autres études ont également montré que l'augmentation de l'épaisseur de la CCE pouvait dans certaines conditions contribuer à augmenter la déviation latérale de l'eau infiltrée (Aubertin et al., 2009).

- Des précipitations plus faibles semblaient être mieux déviées latéralement (figure 5.49). Des résultats similaires ont été rapportés par Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), Morel-Seytoux (1994) et Aubertin et al. (2009). L'effet de l'intensité des précipitations (normales et non extrêmes) demeurait cependant relativement faible. À l'inverse, le rôle de la CCE était plus limité lors de précipitations extrêmes et une part importante de l'eau s'infiltrait alors dans les stériles (pour les conditions simulées).

6.2 Discussion

Les résultats présentés plus haut sont basés sur les conditions particulières simulées ici. En réalité, plusieurs incertitudes demeurent à l'issue de cette étude. Ces incertitudes concernent notamment les mesures de terrain. Par exemple, l'effet des écoulements dans le sens de la largeur a été négligé. Cette hypothèse serait valide dans le cas de précipitations uniformes mais il a pu être constaté que ce n'était pas nécessairement le cas durant les essais d'infiltration (notamment en raison du vent). De plus, l'effet de la berme de sécurité au-dessus du pied de la halde sur l'écoulement a aussi été négligé pour simplifier le modèle numérique et les analyses subséquentes. Les sondes de TEV employées ont également un faible volume d'investigation par rapport à la longueur totale de la halde et n'ont pas permis d'évaluer l'effet d'éventuels passages préférentiels. Ces sondes ont aussi nécessité une calibration de terrain (section 3.2) avec des corrections relativement importantes (40% à 50% de la valeur originale). Cette calibration n'a cependant pas pu être réalisée pour la roche stérile concassée et les stériles, et les valeurs mesurées n'ont donc pas pu être utilisées dans l'étude, à part en termes de variations relatives. Enfin, les débits de sortie ont été mesurés de manière manuelle et ponctuelle, et l'extrapolation de ces résultats (notamment les jours où aucune mesure n'a pu être prise) doit être considérée avec certaines précautions.

Les simulations numériques ont aussi fait l'objet de plusieurs hypothèses simplificatrices qui pourraient limiter la représentativité et la portée des résultats.

- La configuration de l'instrumentation n'a pas permis une modélisation 3D de l'écoulement dans la halde expérimentale alors que le modèle numérique a été calibré à l'aide d'essais d'infiltration dans lesquels les quantités d'eau déversées n'étaient pas uniformes sur l'ensemble de la surface.

- Il aurait été intéressant de faire un bilan d'eau total calculé (volume infiltré, volume dans la halde et volume enregistré à la sortie des lysimètres). Cependant, le volume important de la halde rend ce calcul très difficile puisqu'une très légère augmentation de TEV dans un matériau a un effet important au niveau du calcul du volume d'eau.
- La géométrie du modèle numérique a été simplifiée en omettant volontairement les lysimètres installés à la base de la halde expérimentale. Cette simplification a été justifiée notamment par le manque d'informations sur les propriétés *in situ* des matériaux (en particulier le sable dans les lysimètres) employés pour leur construction mais a compliqué la comparaison de la dynamique des débits de sortie à long terme (rétenzione d'eau importante dans le sable des lysimètres sur le terrain).
- Les propriétés hydrogéologiques des roches stériles riches en ilménite et des stériles d'anorthosite ont été supposées identiques, notamment en raison du manque de données. En réalité, leurs propriétés pourraient être différentes ce qui pourrait affecter les écoulements latéraux et l'infiltration dans l'un ou l'autre matériau.
- Les ajustements du modèle numérique avaient comme objectif de représenter le plus fidèlement possible les observations de terrain mais ont nécessité certaines simplifications importantes, notamment en termes de géométrie. Ainsi, l'épaisseur des matériaux composant la CCE a été réduite pour correspondre à la limite inférieure de l'épaisseur qui a étéarpentée. La variabilité de l'épaisseur de la CCE pourrait cependant avoir des conséquences importantes sur la déviation de l'eau.
- Les propriétés hydrogéologiques des matériaux ont été ajustées en fonction des résultats des essais d'infiltration à grande échelle et ne devraient pas être considérées dans un autre contexte que celui des simulations numériques de la halde expérimentale. Il est aussi possible que d'autres ajustements auraient pu donner des résultats similaires à ceux qui ont été obtenus dans cette étude. Comme les simulations ont été réalisées en condition non saturée dans un contexte d'infiltration, certains ajustements n'ont eu qu'un impact indirect sur le comportement hydrogéologique des matériaux. Par exemple, l'augmentation de l'AEV des stériles a entraîné une translation de l'ensemble de la CRE vers des succions plus élevées ce qui a donc augmenté la valeur du WEV. Ce changement a possiblement entraîné une sous-estimation de la longueur de déviation.

- L’hypothèse de matériaux homogènes intrinsèque au code SEEP/W constitue également une simplification importante (Fala, 2002; Martin, 2003; Bréard Lanoix, 2017). La présence éventuelle de passages préférentiels a aussi été négligée. D’autres codes pourraient permettre de mieux prendre en compte ces phénomènes d’écoulements localisés (voir par exemple Broda et al., 2014).
- La longueur de diversion (L_D) dans la CCE n’a pas été observée dans les simulations numériques réalisées dans le cadre de cette étude. L’angle réduit de la pente (5% ou 3°) et/ou le maillage relativement grossier pourrait expliquer l’absence de point (ou zone) DDL normalement observé dans des couvertures à effet de barrière capillaire inclinées (Bussière, 1999; Cifuentes, 2006; Martin et al., 2006; Aubertin et al., 2006, 2009; Lacroix Vachon et al., 2015).

6.3 Conclusion

Des essais d’infiltation à grande échelle réalisés sur la halde expérimentale de la mine Lac Tio en 2016 et 2017 ont permis d’évaluer le comportement d’une CCE dans des conditions réelles. Les teneurs en eau ont été suivies en continu dans les stériles et la CCE, et les débits ont été mesurés dans chacun des six lysimètres installés à la base de la halde expérimentale. Les résultats ont permis de confirmer que la CCE était en mesure de dévier une partie de l’eau infiltrée vers le pied de la halde. Néanmoins, cette déviation restait limitée et la performance de la CCE semblait diminuer avec le temps et avec l’intensité des précipitations. Ces observations de terrain ont également permis de valider et de calibrer des modèles numériques réalisés avec SEEP/W (GEO-SLOPE international Ltd., 2016), et de simuler certaines conditions alternatives (étude paramétrique). La déviation latérale de l’eau semblait principalement influencée par le contraste entre les propriétés hydrogéologiques des stériles et des matériaux de la CCE, ainsi que par l’angle de la pente. Le degré de compaction de la CCE et son épaisseur avaient également une influence sur le comportement de la halde, mais beaucoup moins marquée. De façon générale, les essais, les suivis de terrain et les simulations numériques auront contribué à valider le concept de CCE et à proposer quelques recommandations afin d’optimiser la performance de la déviation de l’eau dans des conditions réelles.

De nouveaux essais de terrain sont prévus sur un autre site minier afin d'optimiser la conception des CCE. D'autres travaux visent également à développer de nouvelles approches numériques qui prennent mieux en compte l'hétérogénéité des matériaux à grande échelle.

6.4 Recommandations

Plusieurs recommandations peuvent être émises à l'issue de ce projet de recherche :

- Les mesures indirectes de TEV, de débits, et de succion, réalisées au moyen de sondes et capteurs devraient systématiquement être vérifiées et validées par des mesures directes.
- Les sondes de TEV devraient être testées au laboratoire dans des conditions et des matériaux identiques au terrain. La précision et la justesse des mesures devraient également être vérifiées lors de l'installation des sondes en place.
- La position des instruments devrait faire l'objet d'une documentation précise dans l'espace (arpentage).
- Une plus grande résolution en 3D des résultats des sondes serait souhaitable pour améliorer l'interprétation des résultats. Cette recommandation pourrait être réalisée en augmentant le nombre de sondes pour définir un plus grand volume d'investigation en hauteur, largeur et longueur. L'installation de sonde de succion combinée aux sondes de TEV pourrait aussi contribuer à une meilleure qualité/quantité d'information.
- Une investigation du rôle des bermes de sécurité (en particulier celle au-dessus du pied de la halde) dans la dynamique de l'écoulement dans la couche de roches stériles d'anorthosite concassées serait aussi bénéfique à une analyse plus détaillée de l'écoulement général dans la halde.
- Des simulations numériques en 3D pourraient être réalisées afin d'établir l'impact de la troisième dimension sur l'écoulement dans une CCE faiblement inclinée, et en particulier pour une halde expérimentale dont la largeur est relativement limitée (ici 10 m). Les simulations 3D permettraient également dans ce cas précis de prendre en compte l'hétérogénéité de l'arrosage à la surface de la halde.

- Des simulations numériques de la météo *in situ* sur de plus longues périodes (années) incluant l'effet des mois d'hivers (gel, précipitation solides et fonte de l'accumulation de neige) permettraient d'évaluer le comportement hydrogéologique de la CCE et de la halde expérimentale à long terme.
- L'hétérogénéité des propriétés des roches stériles devrait être mieux prise en compte dans les simulations numériques, notamment afin d'évaluer l'effet d'éventuels passages préférentiels sur l'écoulement. Une telle approche requerrait également de mieux évaluer l'hétérogénéité des stériles sur le terrain.
- Les propriétés des matériaux devraient être établies sur le terrain (plutôt qu'uniquement au laboratoire).
- L'étude de la fonte des neiges et du gel sur la performance de la CCE serait intéressante dans le cadre d'une analyse approfondie du comportement de la halde. Cette analyse pourrait aussi inclure la stabilité à long terme des propriétés hydrogéologiques de la CCE (face au ruissellement et à l'érosion).
- L'effet de la revégétalisation, devrait être étudiée afin d'évaluer la performance de la technique à la fermeture.
- Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus avec d'autres techniques d'investigations géophysiques (Dimech et al., 2017; Dimech, 2018; Wu, 2018).

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelghani, F.B., Aubertin, M., Simon, R. & Therrien, R. (2015). Numerical simulations of water flow and contaminants transport near mining wastes disposed in a fractured rock mass. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), p. 37-45.
- Akcil, A. & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139-1145.
- Anterrieu, O., Chouteau, M., and Aubertin, M. 2010. Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 69(4): 533-548.
- Aquany (2016). HydroGeoSphere User Manual. Release 1.0. Aquany Inc.
- ASTM C702/C702M (2018). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1556/1556M (2015). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method. ASTM International, West Conshohocken, PA. 8 p.
- ASTM D2434 (2006). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487 (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5126 (2016). Standard Guide for Comparaison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Vadose Zone. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5856 (2015). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6938 (2017). Standard Test Methods for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International, West Conshohocken, PA. 10 p.
- Aubertin, M. (2013). Waste rock disposal to improve the geotechnical and geochemical stability of piles. *In proceedings of the World Mining Congress*. Montréal, Canada.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M. & Mbonimpa, M. (2016). Review of the reclamation techniques for acid-generating mine waste upon closure of disposal sites. *In proceedings of the Geo-Chicago 2016 conference*, 343-358.
- Aubertin, M. & Chapuis, R.P. (1991). Considérations hydrogéotechniques pour l'entreposage des résidus minier dans le nord-ouest du Québec. C.R. 2^{ieme} conf. Int. Réduction des eaux de drainages Acides, Vol. 3, 1-22.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., Chapuis, R.P. & Crespo J.R. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couches multicouches en sols. *Hydrogéologie*, no 1, 3-13.

- Aubertin, M., Bussière, B. & Bernier, L. (2002a). *Environnement et gestion des rejets miniers*. Manuel sur CD-ROM. Presses internationales Polytechnique.
- Aubertin, M., Fala, O., Bussière, B., Martin, V., Campos, D., Gamache-Rochette, A., Chouteau, M. & Chapuis, R.P. (2002b). Analyse des écoulements de l'eau en conditions non saturées dans les haldes à stériles. *Défis et perspectives: Symposium 2002 sur l'environnement et les Mines*. Rouyn-Noranda, Canada.
- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., Simon, R., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. & Li, L. (2002c). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. *Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil*, Montréal, Qc, Canada.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. & Chapuis, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, 1104-1122.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Chouteau, M., Anterrieu, O., Hernandez Orellana, A.M., Chapuis, R.P., Bussière, B., Lahmira, B. & Lefebvre, R. (2008). Caractérisation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. *Symposium 2008 sur l'environnement et les mines*, Canada.
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S.A., Bussière, B., Molson, J., and Chapuis, R.P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal* 46(10): 1146-1164.
- Aubertin, M., Cifuentes, E., Martin, V., Apithy, S., Bussière, B., Molson J., Chapuis R.P. & Maqsoud A. (2006). An Investigation of Factors that Influence the Water Diversion Capacity of Inclined Covers with Capillary Barrier Effects. *Unsaturated Soils*. 613-624
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R.P., and Chouteau, M. (2005). Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles CD-Rom. *Symposium 2005 sur l'Environnement et les Mines*, Rouyn-Noranda, Canada.
- Aubertin, M., Maknoon, M. & Bussière, B. (2013). *Recommandation pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles*. Communication présentée à GeoMontréal.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. & Maqsoud, A. (2015). Rebeue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. *Symposium 2015 sur l'environnement et les mines*, Canada.
- Aubertin, M., Ricard, J.-F. & Chapuis, R.P. (1995). A study of capillary properties of mine tailings: Measurements and modeling. *Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, BC, vol. 1, p. 17-24.
- Aubertin, M., Ricard, J.-F. & Chapuis, R.P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Revue canadienne de géotechnique*, 35(1), 55-69.
- 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. *Geo-Chicago 2016: Sustainability, Energy, and the Environment*, 343-358.

Arson C. (2009) Étude théorique et numérique de l'endommagement thermo-hydro-mécanique des milieux poreux non saturés. Sciences de l'ingénieur [physics]. Thèse de Doctorat, École des Ponts ParisTech, 2009.

Azam, S., Ward Wilson, G., Herasymuk, G. Nichol, C. & Barbour, L.S. (2007). Hydrogeological behavior of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 259-268.

Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. & Weisener, C.G. (2003). The Geochemistry of Acid Mine Drainage. In *Treatise on Geochemistry, Volume 9*, Editors: Sherwood Lollar, B., Holland, H.D. & Turekian, K.K., Elsevier Science Publishers, 149-204.

Bolduc, F.L. (2012). Une étude sur l'utilisation des roches stériles comme inclusions drainantes dans les résidus miniers. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.

Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A. & Benzaazoua, M. (2013). Assessment of phosphate limestone wastes as a component of a store-and-release cover in a semiarid climate. *Mine Water and the Environment*, 32(2), 152-167.

Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A. & Benzaazoua, M. (2015). Field experimental cells to asses hydrogeological behaviour of store and release covers made with phosphate mine waste. NRC Research Paper, *Canadian Geotechnical Journal*, J. 52: 1255-1269.

Bouksila, F., Persson, M., Berndtsson, R., & Bahri, A., (2008). Soil Water Content and Salinity Determination for Different Dielectric Methods in Saline Gypsiferous Soil. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53, No. 1, pp. 253–265.

Bouwer, H. (1966). Rapid Field Measurement of Air Entry Value and Hydraulic Conductivity of Soil as Significant Parameters in Flow System Analysis. *Water Resources Research*, Vol 2, No. 4, 1966, pp. 729–738.

Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, vol. 10(1), 121-142.

Bouwer, H., & Rice, R.C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, vol. 12(3), 423–428.

Bréard Lanoix, M.-L. (2017). Caractérisation des propriétés hydrogéologiques de la couche de contrôle des écoulements placée sur la halde à stériles expérimentale à la mine du Lac Tio. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.

Broda, S., Hirthe, E., Blessent, D., Aubertin, M., & Graf, T. (2013). *Using random discrete fractures for representing preferential flow in waste rock piles with compacted layers*. Communication présentée à GeoMontréal.

Broda, S., Aubertin, M., Blessent, D., Graf, T. & Hirthe, E. (2014) Improving control of contamination from waste rock piles. *Environmental Geotechnics*, Institution of Civil Engineers publishing.

- Bufon, V.B., Lascano, R.J., Bednarz, C., Booker, J.D. & Gitz, D.C. (2012). Soil water content on drip irrigated cotton:comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*, 30(4), 259-273.
- Bussiere, B. (1999). Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Thèse de doctorat, *École polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Bussière, B., Aubertin, M., Morel-Seytoux, H.J. & Chapuis, R.P. (1998). A laboratory investigation of slope influence on the behavior of capillary barriers. *Proceedings of the 51st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, Alta, p. 4-8.
- Bussière, B., Aubertin, M. & Chapuis, R.P. (2002). A laboratory set up to evaluate the hydraulic behavior of inclined capillary barriers. *In Proceedings of the International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, St-John's, NL, p. 10-12.
- Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, R. & Benzaazoua, M. (2005). Principaux défis et pistes de solution pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnés. *Symposium 2005 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, Institut canadien des mines, de la métallurgie et du pétrole (ICM).
- Bussière, B., Dagenais, A.-M., Villeneuve, M. & Plante, B. (2005). Caractérisation environnementale d'un échantillon de stériles de la mine Tio. *Rapport technique, Unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM)*, Rouyn-Noranda, Qc, Canada.
- Bussière, B., Aubertin, M., Mbonimpa, M., Molson, J., & Chapuis, R.P. (2007). Field experimental cells to evaluate the hydrogeological behaviour of oxygen barriers made of silty materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 1-22.
- Bussière, B., Plante, B., Broda, S., Aubertin, M., Chen, D. & Medina, F. (2015). Contrôle des infiltrations d'eau dans les haldes à stériles à l'aide des effets de barrière capillaire: Design, construction et instrumentation de la halde expérimentale de la mine Tio. Communication présentée à *Symposium 2015 sur l'environnement et les mines*, Rouyn-Noranda, Canada.
- Chapuis, R.P. (1999). Borehole variable-head permeability tests in compacted clay liners and covers. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), 39-51.
- Chapuis, R.P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71(3), 401-434.
- Chapuis, R.P. & Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), p. 616-628.
- 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.
- Chapuis, R.P. & Légaré, P.P. (1992). A Simple Method for Determining the Surface Area of Fine Aggregates and Fillers in Bituminous Mixtures. *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*, 1147, 177-186.
- Chapuis, R.P., Masse, I., Madinier, B., & Aubertin, M. (2006). A Drainage Column Test for Determining Unsaturated Properties of Coarse Materials. *ASTM The Geotechnical Testing Journal*, 30(2).

- Chen, X., Hu, K., Chen, J. & Zhao, W. (2018). Laboratory Investigation of the Effect of Initial Dry Density and Grain Size Distribution on Soil-Water Characteristic Curves of Wide-Grading Gravelly Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2), p. 885-896.
- Childs, E.C. & Colis-George, N. (1950). The permeability of porous materials. *Royal Society America*, 201, 392-495.
- Cifuentes, E. (2006). Modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures à effets de barrière capillaire inclinées. Rapprt de Maîtrise Eng., *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Cifuentes, E., Aubertin, M., Chapuis, R.P., Molson, J. & Bussière, B. (2006). Analyses of the water diversion lenth of inclined, layered soil covers. In *Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Specialty Conference, Sea to Sky Geotechnique*, Vancouver, Canada, 1-4.
- Cravotta III, C. A. (2008). Dissolved metals and associated constituents in abandoned coalmine discharges, Pennsylvania, USA. Part 2: Geochemical controls on constituent concentrations. *Applied Geochemistry*, vol. 23(2), 203-226.
- Crespo, J.R. (1994). Modelisation des écoulements à travers les ouvrages de retenue et de confinement des résidus miniers par un logiciel d'éléments finis. Mémoire de maitrise en science appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologiques et des mines*.
- Dafny, E. & Simunek, J. (2016). Infiltration in layered loessial deposits: Revised numerical simulations and recharge assessment. *Journal of Hydrology*, 538, 339-354.
- Dawood, I., Aubertin, M., Intissar, R., & Chouteau, M. (2011). A combined hydrogeological-geophysical approach to evaluate unsaturated flow in a large waste rock pile. *Pan-Am CGS 2011 Geotechnical Conference*, Toronto, Canada.
- Dawood, I & Aubertin, M. (2014). Effect of dense material layers on unsaturated water flow inside a large waste rock pile: A numerical investigation. *Mine Water Environment*, 33, 24-38.
- Decagon Devices Inc., (2017a). GS3 Greenhouse Sensor. Decagon Devices, USA, 12 p.
- Decagon Devices Inc., (2017b). Matric Potential Sensor 2 & 6. Decagon Devices, USA, 12 p.
- Delage, P., and Cui, Y.-J. (2000). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur. Construction* Vol .1, No. C301: C-301-1 à C301-320.
- Delleur, J.W. 2006. The handbook of groundwater engineering. CRC press.
- Dimech, A. (2018). Imagerie de l'écoulement de l'eau dans une halde à stériles expérimentale par tomographie 3d de résistivité électrique. Mémoire de maitrise en science appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologiques et des mines*.
- Dimech, A., Chouteau, M., Chou, E.T., Aubertin, M., Martin, V., Bussière, B. & Plante, B. (2017). Monitoring water infiltration in an experimental waste rock pile with time-lapse ERT and multi-parameter data collection. Communication à SAGEEP 2017, Denver, USA.
- Dingman, S.L. (1994). *Physical Hydrology*. United States of America: Engewood Cliffs, Prentice Hall.

- Elrick, D.E. & Reynolds, W.D. (1992). Methods for Analyzing Constant-Head Well Permeameter Data. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 56, 320-323.
- Ethier, M.-P. (2017). Évaluation de la performance du système de recouvrement monocouche avec nappe surélevée pour la restauration de parcs à résidus abandonnés. Thèse de Doctorat, *Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue*.
- Fala, O. (2002). Étude des écoulements non saturés dans les haldes à stériles à l'aide de simulations numériques. Mémoire de maîtrise en science appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologiques et des mines*.
- Fala, O. (2008). Analyse des conditions d'écoulement non saturé dans les haldes à stériles. Thèse de doctorat, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Fala, O., Aubertin, M., Molson, J., Bussière, B., Wilson, G., Chapuis, R., & Martin, V. (2003). Numerical modelling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. *6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series. Vol. 3, 895-902.
- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., & Bussière, B. (2005). Numerical modelling of flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water and the Environment* 24(4): 172-185.
- Fala, O., Molson, J., Aubertin, M., Bussière, B., & Chapuis, R.P. (2006). Numerical simulations of long term unsaturated flow and acid mine drainage at waste rock piles. *7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*. 26-30.
- Fetter, C.W. (2008). *Contaminant Hydrogeology (2nd édition)*. Waveland Press Inc., États-Unis, 500 pages.
- Fredlund, D.G. (2006). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practic, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(3), 268-321.
- Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal* 31(4): 521-532.
- Fredlund, D.G., Xing, A. & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 533-546.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 604 p.
- Hazen, A. (1892). Some physical properties of sand and gravels, with special reference to their use in filtration. *24th Annual Rep.*, Massachusetts State Board of Health, no. 34, 539-556.
- Gamache-Rochette, A. (2004). Une étude de caractérisation en laboratoire et sur le terrain des écoulements de l'eau dans les roches stériles. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines*.
- Geo-Slope International. (2007, 2016). [Logiciel], Geostudio. Canada.

Gouvernement du Québec (2012). Directive 019 sur l'industrie minière, Ministère du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques (MDDELCCC).

Gouvernement du Québec (2017a). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, No. M08-03-1611, 82p.

Gouvernement du Québec (2017b). Le secteur minier du Québec, Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles, 46 p.

Gouvernement du Québec (2016). Loi sur les mines, Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles, 88 p.

Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, vol. 4(1), 1-24.

Gribb, M.M., Kodesova, R., & Ordway, S.E. (2004). Comparison of soil hydraulic property measurement methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), p. 1084-1095.

Hatch (2015). Rio Tinto Fer et Titane: Snowmelt and rainfall design parameters. 14p.

Havlena, J.A. & Stephens, D.B. (1992). Vadose Zone Characterization Using Fiel Permeameters and Instrumentation. Current Practices in Ground Water and Vadose Zone Investigations, ASTM STP1118, p. 93-110.

Hernandez Orellana, A.M. (2007). Une étude expérimentale des propriétés hydrauliques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.

Hill, D.E. & Parlange, J.Y. (1972). Wetting Front Instability in Layered Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 36(5), 697-702.

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Elsevier. 771 p.

Holtz R.D. & Kovács W.D. (2010). *Introduction à la géotechnique*. Montréal, Qc. Presses internationales Polytechnique.

Intissar, R. (2009). Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génie civil, géologique et des mines*.

Kanwar, R.S., Ahmed, M., Horton Jr. R., & Marlay, S.J. (1989). Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using Guelph and Velocity Permeameters. *Agricultural and Biosystems Engineering*, 32, 6, p. 1885-1890.

Kovács, G. (1981). *Seepage Hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Pays-Bas, 729 p.

Lacroix Vachon, B., Abdolahzadeh, A.M. & Cabral, A.R. (2015). Predicting the diversion length of capillary barriers using steady state and transient state numerical modeling: case study of the Saint-Tite-des-Caps landfill final cover. NRC Research Paper, *Canadian Geotechnical Journal*, J. 52: 2141-2148.

- Lessard, G. (2011). Essais d'infiltration sur la halde à stériles Petit-Pas de la mine Tio, Havre-St-Pierre. Rapport de maîtrise, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Levesque, I. (2015). Caractérisation hydrogéotechnique des roches stériles tamisées et compactées à l'aide d'essais de laboratoire à une échelle intermédiaire. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil géologique et des mines*.
- Li, M.G. (2000). Acid Rock Drainage Prediction for Low-Sulfide, Low-Neutralization Potential Mine Waste. In *Proceedings of the 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, Denver, USA, p. 567-580.
- Liu, Y., Steenhuis, T.S. & Parlange, J.Y. (1994). Formation and persistence of fingered flow fields in coarse grained soils under different moisture contents. *Journal of hydrology*, 159(1-4), p. 187-195.
- Maknoon, M. (2016). Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations. *Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. & Mbonimpa, M. (2006). Modification of the Predictive MK Model to Integrate Hysteresis of the Water Retention Curve. *4th International Conference on Unsaturated Soils*, Carefree, Arizona, USA.
- 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*, vol. 30(5), 1147-1159.
- Martin, V. 2003. Étude des propriétés non saturées des stériles miniers. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique Montréal, Département des génies civil géologique et des mines*.
- Martin, V., Bussière, B., Plante, B., Pabst, T., Aubertin, M., Medina, F., Bréard Lanoix, M.-L., Dimech, A., Dubuc, J. & Poaty, B. (2017). Controlling water infiltration in waste rock piles: Design, construction, and monitoring of a large-scale in situ pilot study. Communication à GeoOttawa, Ottawa, Canada.
- Martin, V., Aubertin, M., Zhan, G., Bussière, B., and Chapuis, R.P. (2006). Investigation into the hydrological behavior of exposed and covered waste rock dumps. *Transactions-society for mining metallurgy and exploration incorporated* 318: 139.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M. Chapuis, R.P. & Bussière, B. (2002). Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20, 235-259.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., & Bussière, B. (2006). Predicting the unsaturated hydraulic conductivity of granular soils from basic geotechnical properties using the modified Kovács (MK) model and statistical models. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(8), 773-787.
- McCarthy, D.F. (2007). Essentials of soil mechanics and foundations, 7th Edition, Prentice Hall, USA, 850 p.

- McKeown, R., Barbour, L., Rowlett, D., & Herasymuk, G. (2000). Characterization of the grain-size distribution for waste rock from metal mines: A review of the existing data and an evaluation of the implications for hydrogeologic behavior. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineers*, London, Ontario, pp. 7-10.
- Metergroup, (2018). Soil Moisture and Temperature. Meter Environment, USA, 18 p.
- Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (2012). Directive 019 sur l'industrie minière. Gouvernement du Québec, 105 pages.
- Miyazaki, T. (2005). *Water Flow in Soils*. Second Edition. CRC Press, Boca Raton, 440 p.
- Molson, J.W., Fala, O., Aubertin, M. & Bussière, B. (2005). Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78, 343-371.
- Morel-Seytoux, H.J. (1994). Steady-state effectiveness of a capillary barrier on a sloping interface. *Proceedings of the 14th Hydrology Days Conference*, Fort Colins, Colorado, USA, 5-8.
- Morin, K.A., Gerencher, E., Jones, C.E. & Konasewich, D.E. (1991). Critical literature review of acid drainage from waste-rock, Rapport NEDEM 1.11.1., 193p.
- Morris, C.E. & Stormont, J.C. (1999). Parametric Study of Unsaturated Drainage Layers in a Capillary Barrier. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 125(12), 3-10.
- Mualem, Y. (1976). A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, vol. 12(3), 513-522.
- Musy, A. & Soutter, M. (1991). Physique du sol. Lausanne: Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- Nicholson (2004). Review of water quality issues in neutral pH drainage: examples and emerging priorities for the mining in Canada. *Report for Mine Environment Neutral Drainage (MEND)*. Stantec, 58 p.
- Nicholson, R.V., Gillham, R.W. Cherry, J.A. & Reardon, E.J. (1989). Reduction of acid mine generation in mine tailings through the use of moisture-retaining layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 1-8.
- Nordstrom, D.K., Blowes D.W. & Ptacek, C.J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3-16.
- O'kane, M., Wilson, G., & Barbour, S. (1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. *Canadian Geotechnical Journal* 35(5): 828-846.
- Ouangrawa, M. (2007). Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement saturés. Thèse de doctorat, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Pabst, T. (2011). Étude expérimentale et numérique du comportement hydro-géochimique de recouvrements placés sur des résidus sulfureux partiellement oxydés. Thèse de doctorat, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.

- Parlange, J.Y., Lisle, I., Braddock, R.D. & Smith, R.E. (1982). The three-parameter infiltration equation. *Soil Science*, vol. 133(6), 337-341.
- Pépin, G. (2009). Évaluation du comportement géochimique de stériles potentiellement génératrices de drainage neutre contaminé à l'aide de cellules expérimentales in situ. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Peregoedova, A. (2012). Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, *École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines*.
- Peregoedova, A., Aubertin, M. 2013. Laboratory measurement and prediction of the saturated hydraulic conductivity of mine waste rock. Communication à GeoMontréal 2013, Montréal, Canada.
- Peregoedova, A., Aubertin, M., Bussière, B. 2014. Evaluation of the water retention curve of mine waste rock using laboratory tests and predictive models. Communication à GeoRégina 2014, Regina, Canada.
- Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, vol. 83(5), 345-358.
- Philip, J.R. (1985). Approximate analysis of the borehole permeameter in saturated soil. *Water Ressources Research*, 21, 7, 1025-1033.
- Plante, B. (2010). Évaluation des principaux facteurs d'influence sur la prédition du drainage neutre contaminé. Thèse de Doctorat, *Université du Québec à en Abitibi-Témiscamingue*.
- Plante, B., Benzaazoua, M., Bussière, B. Biesinger, M.C., & Pratt, A.R. (2010). Study of nickel sorption onto Tio mine waste rock surfaces. *Applied Geochemistry*, 25, 1830-1844.
- Qing, S. (2010). Physical and numerical modeling of preferential flow and oxygen diffusion in inclined multilayer soil covers over acid generating mine waste rock. Doctor of Philosophy thesis, *Department of civil and environmental engineering. University of Western Ontario*.
- RETC (2009). 6.02 [Logiciel], PC-Progress.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D. E. (1986). A Method for Simultaneous In-Situ Measurement in the Vadose Zone of Field-Sa Hydraulic Conductivity, Sorptivity and the Conductivity-Pressure Head Relationship. *Groundwater Monitoring Review*, Vol 6, No. 4, p.84.
- Reynolds, W.D. & Elrick, D. E. (1990). Ponded Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 54, no. 5, 1233-1241.
- Reynolds, W.D. et Elrick, D.E (2005). Measurement and Characterization of Soil Hydraulic Properties. In J. Alvarez-Benedi & Munoz-Carpena (editors), *Soil-Water-Solute Process Characterization: An Integrated Approach*. USA, CRC Press. 778 p.
- Richards, L. (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Journal of Applied Physics*, 1, 318-333.
- Rio Tinto (2017). Établissement. Tiré de <http://www.riotinto.com/canada/rtft/locations-15134-fr.aspx>.

- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, 26(10), 2625-2629.
- Schneider, A., Baumgartl, T., Doley, D., & Mulligan, D. (2010). Evaluation of the Heterogeneity of Constructed Landforms for Rehabilitation Using Lysimeters. *Vadose Zone Journal* 9(4): 898.
- Sejna, M., Simunek, J. & van Genuchten, M.Th. (2011). Hydrus User Manual Version 2. PC-Progress, Prague, Czech Republic. 307 p.
- Simunek, J., Sejna, M. & van Genuchten, Th.M. (2007). The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiole solutes in variably-saturated media. Version 2.0 U.S.A Salinity Laboratory.
- Soilmoisture equipment corp., (1996). Trase Operating Instructions, version 2000, Soilmoisture Equipment Eorp., Goleta, California, USA.
- SRK (1991). Guide technique préliminaire sur le drainage rocheux acide. (une traduction de "Draft Acid Rock Drainage Technical Guide", 1989, BCAMD Task Force). Vol I et II, Centre de Recherches Minérales, Québec.
- Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y. & Samuel Kung, K.-J. (1991). Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. *Water Resources Research*, vol. 27(8), 2155-2156.
- Susha Lekshmi S.U., Singh, D.N. & Shojaei Baghini, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Journal of the International Measurement Confederation*. Vol. 54, pp. 92-105
- Swartzendruber, D. (1987). A quasi-solution of Richards' Equation for the downward infiltration of water into soil. *Water Resources Research*, vol. 23(5), 809-817.
- Taylor, D.W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. Chapman and Hall ltd. New-York, USA, 701 p.
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics. *Engineering News-Record*, 95(3), 915 p.
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A. & Panday, S.M. (2010). HydroGeoSphere - A Three-Dimensional Numerical Model Describing Fully-Integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport Model. Université Laval, Québec, Canada and University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Therrien, R. & Sudicky, E.A. (1996). Three-dimensionnal analysis of variably-satured flow and solute transport in discretely-fractured porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 23(1-2), p. 1-44.
- Thomas, N., Schilling, K.E., Arenas Amado, A., Streeter, M. & Weber, L. (2016). Inverse Modeling of Soil Hydraulic Properties in a Two-Layer System and Comparisons with Measured Soil Conditions. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society of America, 14 p.
- Todd, D.K. & Mays, L.W. (2005). Groundwater hydrology (3rd edition). Hoboken, New Jersey. Wiley.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water resources research*, 16(3), p. 574-582.

- Udoh, F.D. (1993). Minimalization of infiltration into mining stockpiles using low permeability covers. Doctor of Philosophy thesis, Mining engineering. University of Wisconsin-Madison.
- Unger, A. J. A., Bodvarsson, G. S. & Simmons, A. M. (2004). Simulating infiltration in unsaturated basalt for the large-scale aquifer pumping and infiltration test at INEEL. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 42 pp. 105-113.
- van Genuchten, M.Th. (1980). A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44(5), 892-898.
- van Genuchten, Th.M. & Nielsen, D.R. (1985). On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annals of Geophysics*, 3 615-628.
- Warrick, A.W., Wierenga, P.J. & Pan, L. (1997). Downward water flow through sloping layers in the vadose zone: analytical solutions for diversions. *Journal of Hydrology*, 192, 321-337.
- Wauchope, R.D., Sumner, H.R., Truman, C.C., Johnson, A.W., Dowler, C.C., Hook, J.E., Gascho, G.J., Davis, J.G & Chandler L.D. (1999). Runoff from a cornfield as affected by tillage and corn canopy: A large-scale simulated-rainfall hydrologic data set for model testing. *Water Resources Research*, Vol. 35, no. 9, 2881-2885.
- Williams, D.J., Stolberg, D.J. & Nicholas, A.C. (2006). Long-term monitoring of Kidston's "store/release" cover system over potentially acid forming waste rock piles. *International conference on acid rock drainage*. American society of mining and reclamation, St-Louis, Missouri, USA.
- Wu, R., Martin, V., McKenzie, J., Broda, S., Bussière, B. & Aubertin, M. (2018). Using Fibre Optics to Monitor Moisture in Waste Rock. *EGU 2018*, Vienne, Autriche.
- Yanful, E.K., Bell, A.V. & Woyshner, M.R. (1993). Design of a composite soil cover for an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 578-588.
- Yu, C. & Zheng, C. (2010). HYDRUS: software for flow and transport modeling in variably saturated media. *Groundwater*, 48(6), 787-791.
- Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, K. & McMullen, J. (2001a). Capillary cover design for leach pad closure. *SME Transaction*, 310, p. 104-110.
- Zhan, G., Mayer, A., McMullen, J. & Aubertin, M. (2001b). Slope effect study on the capillary cover design for spent leach pad. *In Proceedings CD-ROM 01-137 (AIME)*.
- Zhan, G., Mayer, A., McMullen, J. & Aubertin, M. (2000). Capillary cover design for spent leach pad. *In Proceedings International symposium hydrogeology & environment*, p. 144-150.
- Zhuang, J., Nakayama, G.R., Yu, T. & Myazaki, T. (2001). Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties. *Soil & Tillage Research*, 59, 143-154.

**ANNEXE A - CALIBRATION EN LABORATOIRE DES SONDES DE TEV
(GS3)**

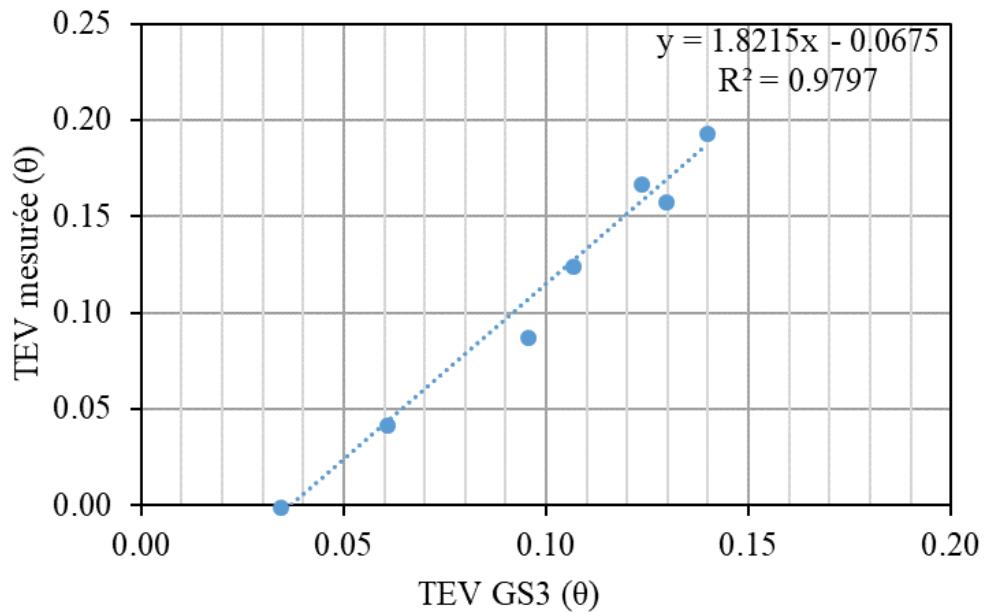


Figure A.1 Calibration des sondes de TEV GS3 dans le sable (CCE).

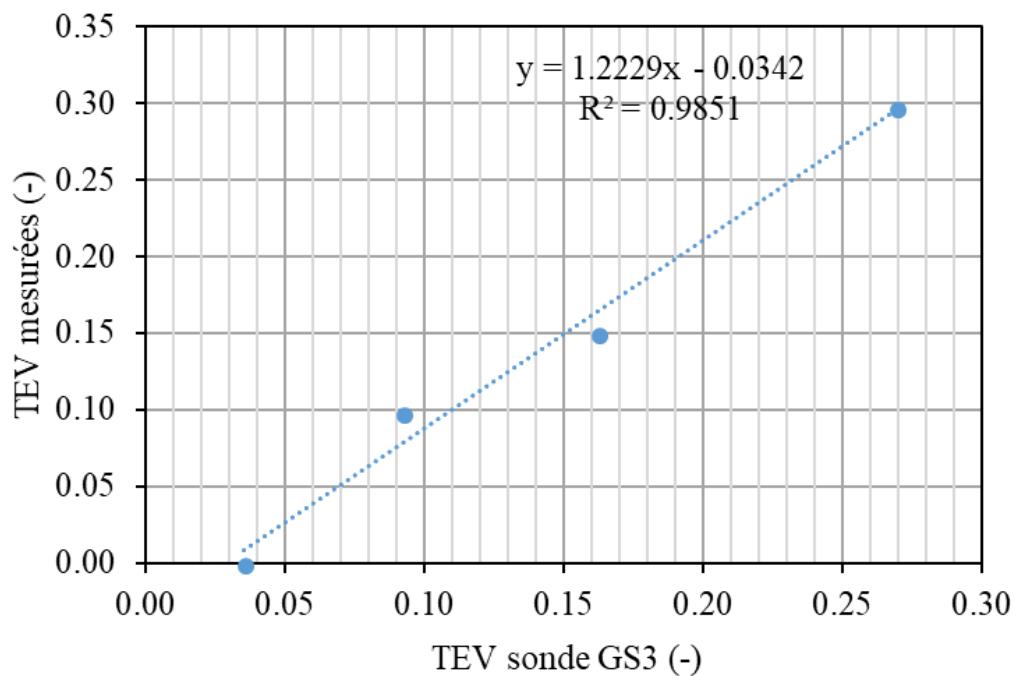


Figure A.2 Calibration des sondes de TEV GS3 dans le sable des lysimètres.

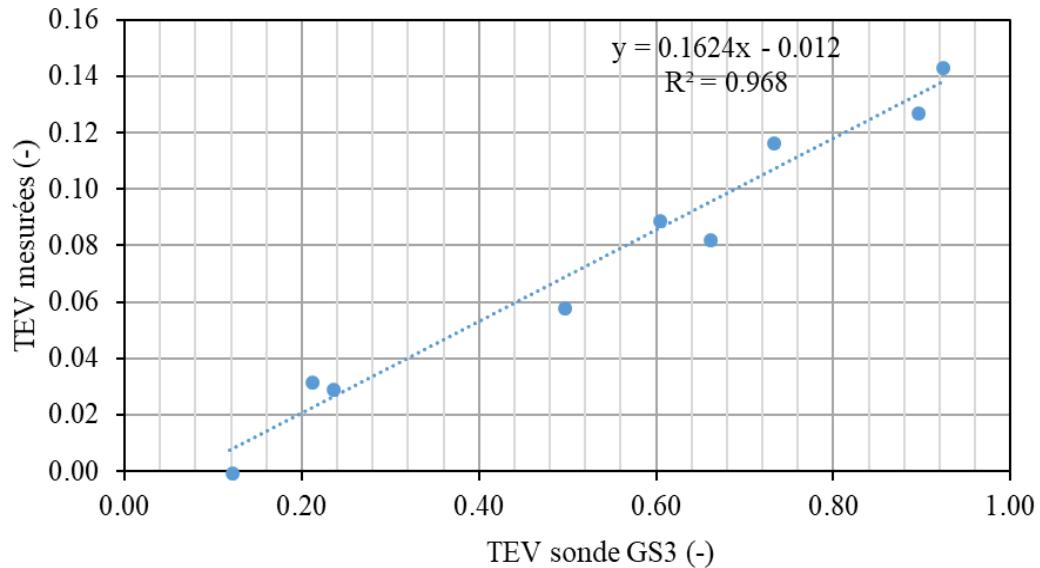


Figure A.3 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile riche en ilménite.

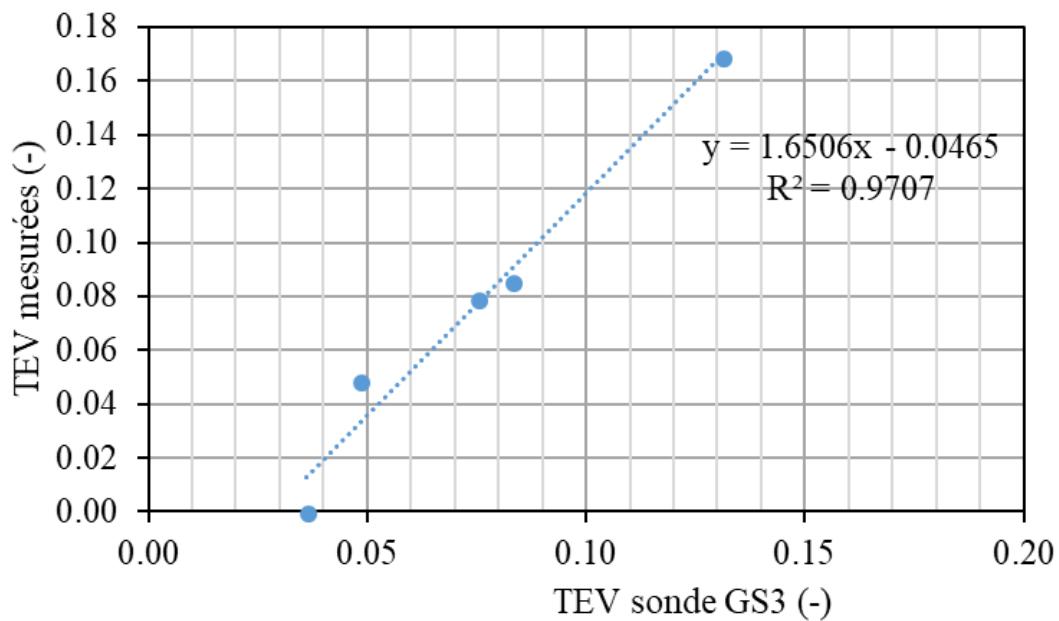


Figure A.4 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile riche en anorthosite.

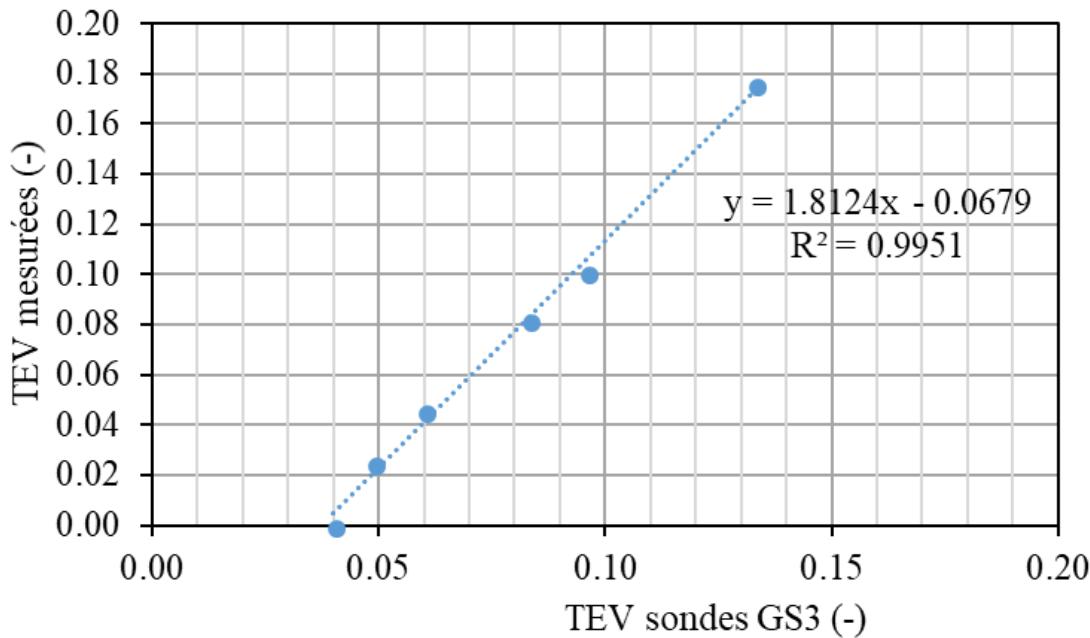


Figure A.5 Calibration des sondes de TEV GS3 dans la roche stérile d'anorthosite concassée.

Tableau A.1 Équation de calibration pour les TEV données par les GS3 dans les différents matériaux de la halde expérimentale.

Matériaux	Équation
Sable (CCE)	$y = 1,8215x - 0,0675$
Sable lysimètres	$y = 1,2229x - 0,0342$
Roches stériles riches en ilménite (stériles minéralisés)	$y = 0,1624x - 0,012$
Roches stériles riches en anorthosite (stériles non-minéralisés)	$y = 1,6506x - 0,0465$
Roches stériles d'anorthosite concassées	$y = 1,8124x - 0,0679$

**ANNEXE B - MÉTHODE DE VALIDATION DE LA CALIBRATION DES TEV (SONDES GS3) IN SITU
DANS LA COUCHE DE SABLE DE LA CCE**

Tableau B.1 Calibration du cône de sable.

	M_i (g)	M_f (g)		M_{tot} (g)	M_{tare} (g)	M_{sable} (g)	M_{eau} (g)	T_{eau} (Celcius)	ρ_w (g/cm ³)	V (cm ³)	
1	5186,1	3471,5	1714,6	1	1064,2	74,5	989,7	767	23,2	0,9999	767,08
2	5283,3	3554	1729,3	2	1068,5	74,4	994,1	765,8	23,2	0,9999	765,88
3	5612,8	3875,4	1737,4	3	1078,3	74,5	1003,8	767	23,2	0,9999	767,08
							995,87				766,68
$V_{cône + plaque}$ (cm ³)	1727,10										
ρ_{bulk} (g/cm ³)	1,30										Gs (-)
											2,68

Tableau B.2 Mesures au cône de sable dans le sable de la CCE.

Essai	Date	DONNÉES CÔNE		SOL DANS TROU			TENEUR EN EAU			w (-)
		$M_{cône - initial}$ (g)	$M_{cône - final}$ (g)	$M_{sol + tare}$ (g)	M_{tare} (g)	$M_{sol hum}$ (g)	$M_{T + tare}$ (g)	$M_{d + tare}$ (g)	M_{tare} (g)	
Près du Lys-1	2017-09-20	6185	3160	1950	10	1940	2454	2329	514	6,89%
		$M_{cône + trou}$ (g)	V_{trou} (cm ³)	$M_{sol sec}$ (g)	ρ_h (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e (-)	n (-)	θ (-)	
		3025	999,20	1815	1,94	1,82	0,48	0,32	0,13	

ANNEXE C - RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFILTRATION AVEC LE PERMÉAMÈTRE DE GUELPH (1 ET 2)

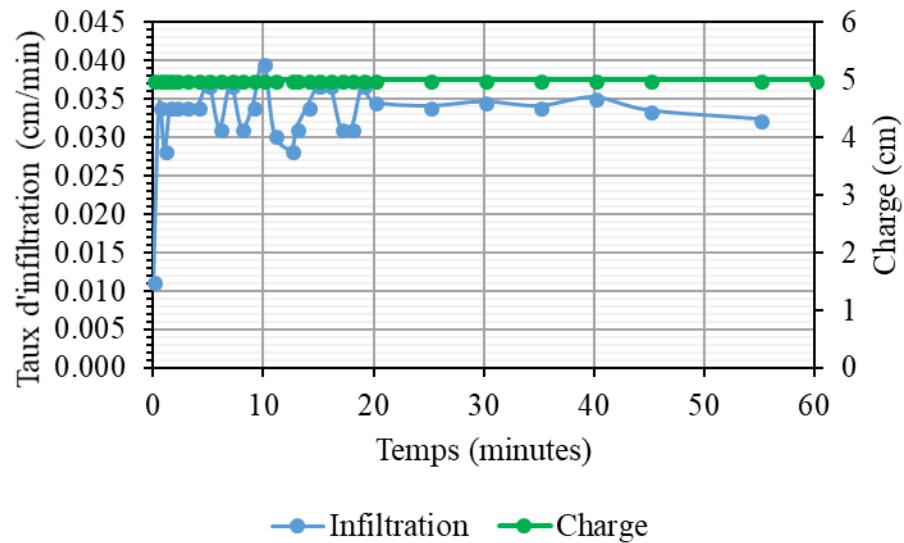


Figure C.1 Résultat du test d'infiltration 1 au perméamètre de Guelph (2016-09-26).

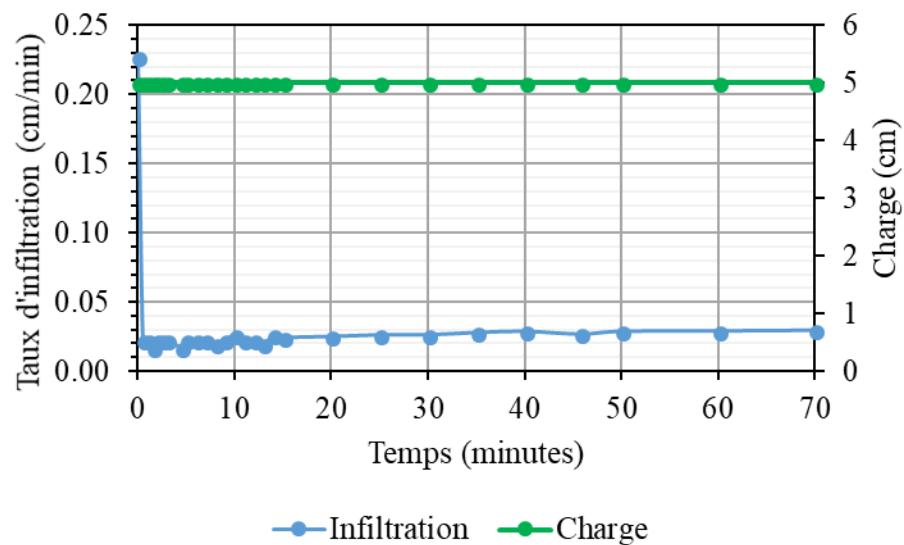


Figure C.2 Résultat du test d'infiltration 2 au perméamètre de Guelph (2016-09-28).

ANNEXE D - TEMPS D'ARRIVÉ DU FRONT DE MOUILLAGE AUX DIFFÉRENTS NIVEAUX DES SONDES DE TEV

Tableau D.1 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-A.

Essai I-A	Lys 1	Lys 2	Lys 3	Lys 4	Lys 5	Lys 6
AC						
HSP-h	2 h 10 min	4 h 30 min	2 h	3 h 30 min		
HSP-b	8 h	5 h	9 h	4 h	10 h 30 min	10 h
WR-h	30 h	7 h		9 h	18 h	15 h 30 min
WR-b		7 h	8 h 20 min	10 h	16 h	

Tableau D.2 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-B.

Essai I-B	Lys 1	Lys 2	Lys 3	Lys 4	Lys 5	Lys 6
AC						
HSP-h	5 h 15 min	10 h 15 min	2 h			
HSP-b		12 h 30 min	15 h 45 min		17 h	
WR-h						
WR-b						

Tableau D.3 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-C.

Essai I-C	Lys 1	Lys 2	Lys 3	Lys 4	Lys 5	Lys 6
AC	45 min	45 min		30 min	45 min	30 min
HSP-h			1 h	2 h	4 h 45 min	
HSP-b	4 h 15 min	2 h 45 min	6 h 30 min	5 h 30 min	5 h	5 h 15 min
WR-h		4 h 45 min	8 h	5 h 45 min	5 h 45 min	11 h 15 min
WR-b		7 h 15 min	8 h 15 min	6 h 15 min	6 h 15 min	

Tableau D.4 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-D.

Essai I-D	Lys 1	Lys 2	Lys 3	Lys 4	Lys 5	Lys 6
AC	1 h 15 min	1 h 15 min		1 h 15 min		2 h
HSP-h			2 h 45 min	3 h	8 h	
HSP-b	11 h 30 min	11 h 30 min	14 h 45 min	11 h 30 min	10 h 30 min	8 h
WR-h		9 h 45 min	14 h 15 min	14 h 15 min	14 h 15 min	15 h 15 min
WR-b		11 h 45 min	15 h	17 h		

Tableau D.5 Temps d'arrivé du front de mouillage enregistré pas le sonde de TEV pour l'essai I-E.

Essai I-E	Lys 1	Lys 2	Lys 3	Lys 4	Lys 5	Lys 6
AC	1 h	1 h 15 min	1 h 15 min	1 h		1 h 30 min
HSP-h			3 h	6 h	9 h 45 min	
HSP-b	9 h	14 h 15 min	20 h 30 min	19 h 45 min	14 h	8 h
WR-h		14 h	27 h			21 h 15 min
WR-b		14 h 15 min	26 h 30 min	30 h 15 min		

Les espaces vides représentent une absence de variation ou de valeurs données par la sonde en place.

**ANNEXE E - RÉSULTATS DES SONDES DE SUCCION (MPS-2) DURANT
L'ESSAI D'INFILTRATION I-C**

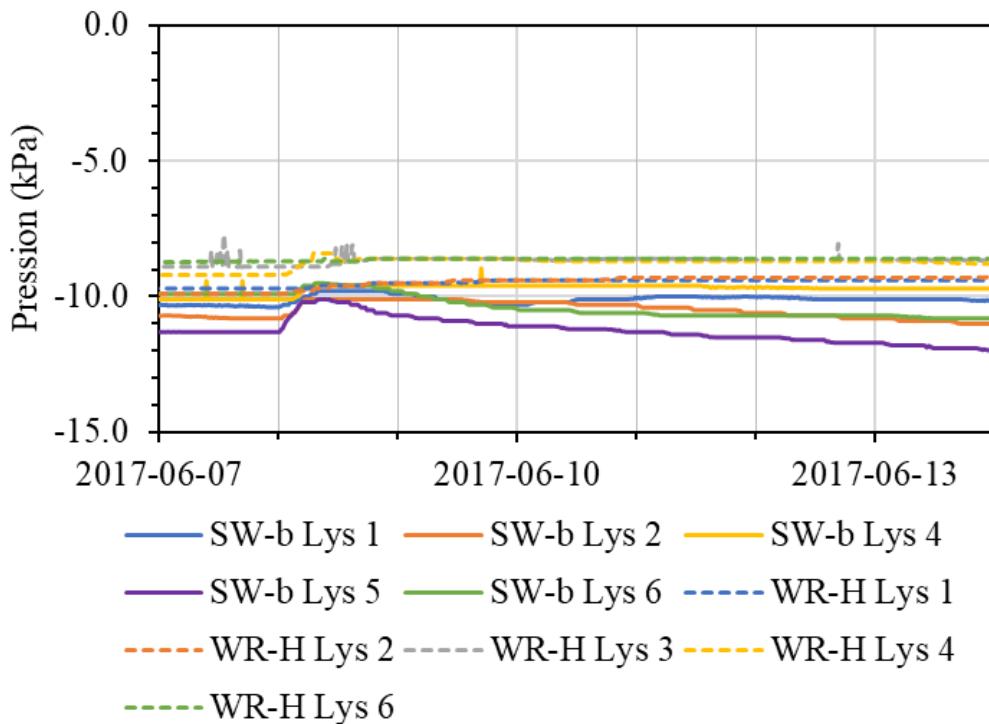


Figure E.1 Variations des pressions à 10 cm au-dessus et 10 cm en-dessous de l'interface sable/stériles au-dessus de l'ensemble des lysimètres (1,1 m et 0,9 m sous la surface de la halde). Les informations des sondes SW-b Lys 3 et WR-H Lys 5 sont manquantes.

ANNEXE F - RÉSULTATS DES MESURES MANUELLES DE DÉBITS DE SORTIE – ESSAI D’INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-C

Tableau F.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-07 – soir.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	01:21	81	115	1,42	85,19	
6	01:18	78	105	1,35	80,77	83,0
5	02:00	120	105	0,88	52,50	
5	02:03	123	110	0,89	53,66	53,1
4	03:42	222	100	0,45	27,03	
4	03:05	185	85	0,46	27,57	27,3
3	03:01	181	100	0,55	33,15	
3	03:05	185	105	0,57	34,05	33,6
2	56 :00	3360	50	0,01	0,89	0,89
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 – matin.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	01:29	89	125	1,40	84,27	
6	01:31	91	130	1,43	85,71	85,0
5	02:11	131	115	0,88	52,67	
5	02:17	137	120	0,88	52,55	52,6
4	03:38	218	100	0,46	27,52	
4	03:15	195	90	0,46	27,69	27,6
3	03:01	181	100	0,55	33,15	
3	03:03	183	100	0,55	32,79	33,0
2	97 :00	5820	140	0,02	1,44	1,44
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 – 17 :10.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	1 :30	90	415	4,61	276,67	
6	1 :30	90	415	4,61	276,67	276,7
5	3 :00	180	225	1,25	75,00	
5	3 :00	180	227	1,26	75,67	75,3
4	3 :00	180	115	0,64	38,33	
4	3 :00	180	115	0,64	38,33	38,3
3	3 :00	180	100	0,56	33,33	
3	3 :00	180	102	0,57	34,00	33,7
2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-08 – 21 :45.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	1 :10	70	470	6,71	402,86	
6	1 :10	70	470	6,71	402,86	402,9
5	1 :30	90	152	1,69	101,33	
5	1 :30	90	152	1,69	101,33	101,3
4	1 :30	90	75	0,83	50,00	
4	1 :30	90	75	0,83	50,00	50,0
3	2 :00	120	68	0,57	34,00	
3	2 :00	120	68	0,57	34,00	34,0
2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-09 – matin.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	00:32	32	270	8,44	506,25	
6	00:52	52	455	8,75	525,00	515,6
5	01:02	62	155	2,50	150,00	
5	01:01	61	155	2,54	152,46	151,2
4	01:02	62	80	1,29	77,42	
4	01:13	73	95	1,30	78,08	77,8
3	02:12	132	75	0,57	34,09	
3	02:15	135	75	0,56	33,33	33,7
2	44 :00	2640	95	0,04	2,16	2,16
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-09 – après-midi.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	01:00	60	525	8,75	525,00	
6	00:20	20	180	9,00	540,00	532,5
5	00:45	45	130	2,89	173,33	
5	01:00	60	175	2,92	175,00	174,2
4	01:00	60	90	1,50	90,00	
4	01:30	90	135	1,50	90,00	90,0
3	02:00	120	70	0,58	35,00	
3	02:05	125	75	0,60	36,00	35,5
2	03:00	180	7	0,04	2,33	2,33
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau F.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-12 – matin.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1700	5,67	340,00	
6	03:00	180	1040	5,78	346,67	343,3
5	03:00	180	780	4,33	260,00	
5	04:00	240	1030	4,29	257,50	258,8
4	03:00	180	720	4,00	240,00	
4	05:00	300	1190	3,97	238,00	239,0
3	03:00	180	550	3,06	183,33	
3	05:00	300	900	3,00	180,00	181,7
2	05:00	300	680	2,27	136,00	
2	02:00	120	265	2,21	132,50	134,3
1	03:00	180	325	1,81	108,33	
1	02:00	120	250	2,08	125,00	116,7

Tableau F.8 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-12 – après-midi.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	01:00	60	325	5,42	325,00	
6	01:00	60	327	5,45	327,00	326,0
5	01:00	60	245	4,08	245,00	
5	01:10	70	290	4,14	248,57	246,8
4	01:00	60	230	3,83	230,00	
4	01:00	60	230	3,83	230,00	230,0
3	01:00	60	185	3,08	185,00	
3	01:00	60	185	3,08	185,00	185,0
2	01:00	60	147	2,45	147,00	
2	01:00	60	150	2,50	150,00	148,5
1	01:00	60	170	2,83	170,00	
1	01:00	60	150	2,50	150,00	
1	01:00	60	140	2,33	140,00	153,3

Tableau F.9 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-13 – matin.

Lysimètre	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1480	4,93	296,00	
6	03:00	180	900	5,00	300,00	298,0
5	05:00	300	1120	3,73	224,00	
5	03:00	180	680	3,78	226,67	225,3
4	05:00	300	1100	3,67	220,00	
4	03:00	180	680	3,78	226,67	223,3
3	05:00	300	960	3,20	192,00	
3	03:00	180	580	3,22	193,33	192,7
2	05:00	300	920	3,07	184,00	
2	03:00	180	560	3,11	186,67	185,3
1	05:00	300	900	3,00	180,00	
1	03:00	180	520	2,89	173,33	176,7

Tableau F.10 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-13 – après-midi.

Lysimètre	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120	585	4,88	292,50	
6	01:30	90	420	4,67	280,00	286,3
5	01:31	91	315	3,46	207,69	
5	01:00	60	215	3,58	215,00	211,3
4	01:00	60	210	3,50	210,00	
4	02:00	120	420	3,50	210,00	210,0
3	02:00	120	375	3,13	187,50	
3	01:30	90	280	3,11	186,67	187,1
2	02:00	120	370	3,08	185,00	
2	01:00	60	185	3,08	185,00	185,0
1	02:00	120	465	3,88	232,50	
1	01:00	60	180	3,00	180,00	206,3

Tableau F.11 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-14.

Lys	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1160	3,87	232,00	
6	03:00	180	700	3,89	233,33	232,7
5	05:00	300	860	2,87	172,00	
5	03:00	180	540	3,00	180,00	176,0
4	05:00	300	900	3,00	180,00	
4	03:00	180	550	3,06	183,33	181,7
3	05:00	300	840	2,80	168,00	
3	03:00	180	520	2,89	173,33	170,7
2	05:00	300	940	3,13	188,00	
2	03:00	180	580	3,22	193,33	190,7
1	05:00	300	950	3,17	190,00	
1	03:00	180	520	2,89	173,33	181,7

ANNEXE G - RÉSULTATS DES MESURES MANUELLES DE DÉBITS DE SORTIE – ESSAI D’INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-D

Tableau G.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-15 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120	412	3,43	206,00	
6	02:00	120	415	3,46	207,50	206,8
5	03:00	180	455	2,53	151,67	
5	03:00	180	455	2,53	151,67	151,7
4	03:00	180	470	2,61	156,67	
4	03:00	180	470	2,61	156,67	156,7
3	03:00	180	455	2,53	151,67	
3	03:00	180	460	2,56	153,33	152,5
2	03:00	180	510	2,83	170,00	
2	02:00	120	340	2,83	170,00	170,0
1	03:00	180	380	2,11	126,67	
1	03:00	180	392	2,18	130,67	128,7

Tableau G.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-15 – 14 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	01:00	60	225	3,75	225,00	
6	01:00	60	230	3,83	230,00	227,5
5	01:00	60	155	2,58	155,00	
5	01:00	60	155	2,58	155,00	155,0
4	01:00	60	160	2,67	160,00	
4	01:00	60	160	2,67	160,00	160,0
3	01:00	60	155	2,58	155,00	
3	01:00	60	155	2,58	155,00	155,0
2	01:30	90	240	2,67	160,00	
2	01:30	90	250	2,78	166,67	163,3
1	01:30	90	285	3,17	190,00	
1	01:30	90	270	3,00	180,00	185,0

Tableau G.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-16 – 9 :00.

Lysimètre	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1490	4,97	298,00	
6	03:00	180	1100	6,11	366,67	332,3
5	05:10	310	760	2,45	147,10	
5	03:00	180	450	2,50	150,00	148,5
4	05:00	300	730	2,43	146,00	
4	03:00	180	450	2,50	150,00	148,0
3	05:00	300	700	2,33	140,00	
3	03:00	180	420	2,33	140,00	140,0
2	05:00	300	770	2,57	154,00	
2	03:00	180	450	2,50	150,00	152,0
1	05:00	300	780	2,60	156,00	
1	03:00	180	400	2,22	133,33	144,7

Tableau G.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-16 – 16 :00.

Lysimètre	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120	640	5,33	320,00	
6	02:00	120	640	5,33	320,00	320,0
5	02:00	120	312	2,60	156,00	
5	02:00	120	315	2,63	157,50	156,8
4	02:00	120	290	2,42	145,00	
4	02:00	120	290	2,42	145,00	145,0
3	02:00	120	270	2,25	135,00	
3	02:00	120	270	2,25	135,00	135,0
2	02:00	120	290	2,42	145,00	
2	02:00	120	292	2,43	146,00	145,5
1	02:00	120	333	2,78	166,50	
1	02:00	120	310	2,58	155,00	160,8

Tableau G.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-19 – 9 :00.

Lysimètre	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1480	4,93	296,00	
6	03:00	180	900	5,00	300,00	298,0
5	05:00	300	1030	3,43	206,00	
5	03:00	180	620	3,44	206,67	206,3
4	05:00	300	1040	3,47	208,00	
4	03:00	180	640	3,56	213,33	210,7
3	05:00	300	880	2,93	176,00	
3	03:05	185	560	3,03	181,62	178,8
2	05:00	300	1040	3,47	208,00	
2	03:00	180	630	3,50	210,00	209,0
1	05:00	300	600	2,00	120,00	
1	03:00	180	395	2,19	131,67	125,8

Tableau G.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-19 – 14 :00.

Lysimètres	Temps	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1500	5,00	300,00	
6	03:00	180	900	5,00	300,00	300,0
5	05:00	300	1010	3,37	202,00	
5	03:00	180	610	3,39	203,33	202,7
4	05:00	300	1020	3,40	204,00	
4	03:00	180	620	3,44	206,67	205,3
3	05:00	300	880	2,93	176,00	
3	03:00	180	540	3,00	180,00	178,0
2	05:00	300	1050	3,50	210,00	
2	03:00	180	640	3,56	213,33	211,7
1	05:00	300	740	2,47	148,00	
1	03:00	180	440	2,44	146,67	147,3

Tableau G.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-06-20 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:00	300	1660	5,53	332,00	
6	03:00	180	1000	5,56	333,33	332,7
5	05:00	300	920	3,07	184,00	
5	03:00	180	560	3,11	186,67	185,3
4	05:00	300	920	3,07	184,00	
4	03:00	180	560	3,11	186,67	185,3
3	05:00	300	860	2,87	172,00	
3	03:00	180	520	2,89	173,33	172,7
2	05:00	300	1010	3,37	202,00	
2	03:00	180	620	3,44	206,67	204,3
1	05:00	300	740	2,47	148,00	
1	03:00	180	420	2,33	140,00	144,0

ANNEXE H - RÉSULTATS DES MESURES MANUELLES DE DÉBITS DE SORTIE – ESSAI D’INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-E

Tableau H.1 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-19 – 16 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	03:50	230	175	0.76	45.65	
6	02:49	169	130	0.77	46.15	45.9
5	11:48	708	120	0.17	10.17	
5	08:40	520	90	0.17	10.38	10.3
4	06:20	380	110	0.29	17.37	
4	06:20	380	110	0.29	17.37	17.4
3	03:00	180	110	0.61	36.67	
3	04:40	280	165	0.59	35.36	36.0
2	05:37	337	95	0.28	16.91	
2	07:11	431	120	0.28	16.71	16.8
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.2 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-20 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	04:33	273	200	0.73	43.96	
6	03:14	194	145	0.75	44.85	44.4
5	08:19	499	75	0.15	9.02	
5	10:58	658	95	0.14	8.66	8.8
4	05:20	320	90	0.28	16.88	
4	05:45	345	95	0.28	16.52	16.7
3	04:00	240	140	0.58	35.00	
3	03:20	200	120	0.60	36.00	35.5
2	05:50	350	90	0.26	15.43	
2	09:40	580	150	0.26	15.52	15.5
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.3 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-20 – 13 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	03:29	209	170	0.81	48.80	
6	03:50	230	185	0.80	48.26	48.5
5	10:42	642	100	0.16	9.35	
5	16:00	960	152	0.16	9.50	9.4
4	05:48	348	100	0.29	17.24	
4	09:16	556	160	0.29	17.27	17.3
3	06:03	363	220	0.61	36.36	
3	04:34	274	165	0.60	36.13	36.2
2	05:31	331	85	0.26	15.41	
2	06:15	375	100	0.27	16.00	15.7
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.4 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-21 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	05:36	336	350	1.04	62.50	
6	07:04	424	440	1.04	62.26	62.4
5	12:13	733	95	0.13	7.78	
5	13:40	820	85	0.10	6.22	7.0
4	06:25	385	100	0.26	15.58	
4	06:25	385	100	0.26	15.58	15.6
3	03:47	227	130	0.57	34.36	
3	05:28	328	185	0.56	33.84	34.1
2	08:40	520	115	0.22	13.27	
2	06:30	390	90	0.23	13.85	13.6
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.5 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-21 – 13 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	07:00	420	465	1.11	66.43	
6	04:21	261	290	1.11	66.67	66.5
5	08:37	517	75	0.15	8.70	
5	14:00	840	120	0.14	8.57	8.6
4	05:04	304	85	0.28	16.78	
4	06:48	408	120	0.29	17.65	17.2
3	03:03	183	105	0.57	34.43	
3	05:33	333	190	0.57	34.23	34.3
2	08:36	516	125	0.24	14.53	
2	09:28	568	140	0.25	14.79	14.7
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.6 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	04:25	265	405	1.53	91.70	
6	03:30	210	323	1.54	92.29	92.0
5	12:54	774	125	0.16	9.69	
5	10:00	600	100	0.17	10.00	9.8
4	06:02	362	107	0.30	17.73	
4	07:05	425	128	0.30	18.07	17.9
3	04:40	280	165	0.59	35.36	
3	04:50	290	172	0.59	35.59	35.5
2	12:46	766	190	0.25	14.88	
2	07:50	470	115	0.24	14.68	14.8
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.7 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 13 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	04:50	290	465	1.60	96.21	
6	02:12	132	220	1.67	100.00	98.1
5	06:20	380	70	0.18	11.05	
5	09:55	595	112	0.19	11.29	11.2
4	07:38	458	145	0.32	19.00	
4	06:05	365	115	0.32	18.90	18.9
3	06:10	370	220	0.59	35.68	
3	04:00	240	145	0.60	36.25	36.0
2	07:13	433	115	0.27	15.94	
2	08:34	514	135	0.26	15.76	15.8
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.8 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 17 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:59	179.00	305	1.70	102.23	
6	03:00	180.00	305	1.69	101.67	102.0
5	07:20	440.00	90	0.20	12.27	
5	09:25	565.00	112	0.20	11.89	12.1
4	05:25	325.00	105	0.32	19.38	
4	05:32	332.00	105	0.32	18.98	19.2
3	06:00	360.00	215	0.60	35.83	
3	05:00	300.00	180	0.60	36.00	35.9
2	08:00	480.00	130	0.27	16.25	
2	11:00	660.00	175	0.27	15.91	16.1
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.9 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-22 – 21 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	04:14	254.00	440	1.73	103.94	
6	02:25	145.00	255	1.76	105.52	104.7
5	10:35	635.00	125	0.20	11.81	
5	08:00	480.00	95	0.20	11.88	11.8
4	06:00	360.00	115	0.32	19.17	
4	07:00	420.00	135	0.32	19.29	19.2
3	05:00	300.00	180	0.60	36.00	
3	05:00	300.00	180	0.60	36.00	36.0
2	08:00	480.00	125	0.26	15.63	
2	11:00	660.00	170	0.26	15.45	15.5
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.10 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-25 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	03:00	180.00	315	1.75	105.00	
6	03:00	180.00	317	1.76	105.67	105.3
5	14:15	855.00	305	0.36	21.40	
5	09:45	585.00	215	0.37	22.05	21.7
4	05:00	300.00	115	0.38	23.00	
4	10:15	615.00	225	0.37	21.95	22.5
3	10:15	615.00	360	0.59	35.12	
3	05:45	345.00	205	0.59	35.65	35.4
2	14:30	870.00	200	0.23	13.79	
2	14:30	870.00	200	0.23	13.79	13.8
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.11 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-25 – 13 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120.00	215	1.79	107.50	
6	02:20	140.00	250	1.79	107.14	107.3
5	05:20	320.00	130	0.41	24.38	
5	08:00	480.00	192	0.40	24.00	24.2
4	13:55	835.00	333	0.40	23.93	
4	07:35	455.00	185	0.41	24.40	24.2
3	04:00	240.00	147	0.61	36.75	
3	04:00	240.00	147	0.61	36.75	36.8
2	13:15	795.00	215	0.27	16.23	
2	19:30	1170.00	320	0.27	16.41	16.3
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.12 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-26 – 9 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120	205	1,71	102,50	
6	02:00	120	205	1,71	102,50	102,5
5	11:20	680	275	0,40	24,26	
5	09:35	575	227	0,39	23,69	24,0
4	08:05	485	200	0,41	24,74	
4	08:05	485	190	0,39	23,51	24,1
3	04:35	275	160	0,58	34,91	
3	08:20	500	280	0,56	33,60	34,3
2	05:40	340	90	0,26	15,88	
2	05:00	300	77	0,26	15,40	15,6
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tableau H.13 Mesures manuelles des débits de sortie en date du 2017-09-26 – 12 :00.

Lysimètre	Temps (min :sec)	Temps (sec)	Volume (ml)	Débits (ml/sec)	Débits (ml/min)	Débits moyen (ml/min)
6	02:00	120	200	1,67	100,00	
6	02:00	120	200	1,67	100,00	100,0
5	05:15	315	130	0,41	24,76	
5	08:35	515	210	0,41	24,47	24,6
4	04:35	275	110	0,40	24,00	
4	07:21	441	175	0,40	23,81	23,9
3	05:40	340	197	0,58	34,76	
3	07:40	460	270	0,59	35,22	35,0
2	08:10	490	125	0,26	15,31	
2	10:55	655	170	0,26	15,57	15,4
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

ANNEXE I - RÉSULTATS ESSAI I-E DANS LES ROCHES STÉRILES

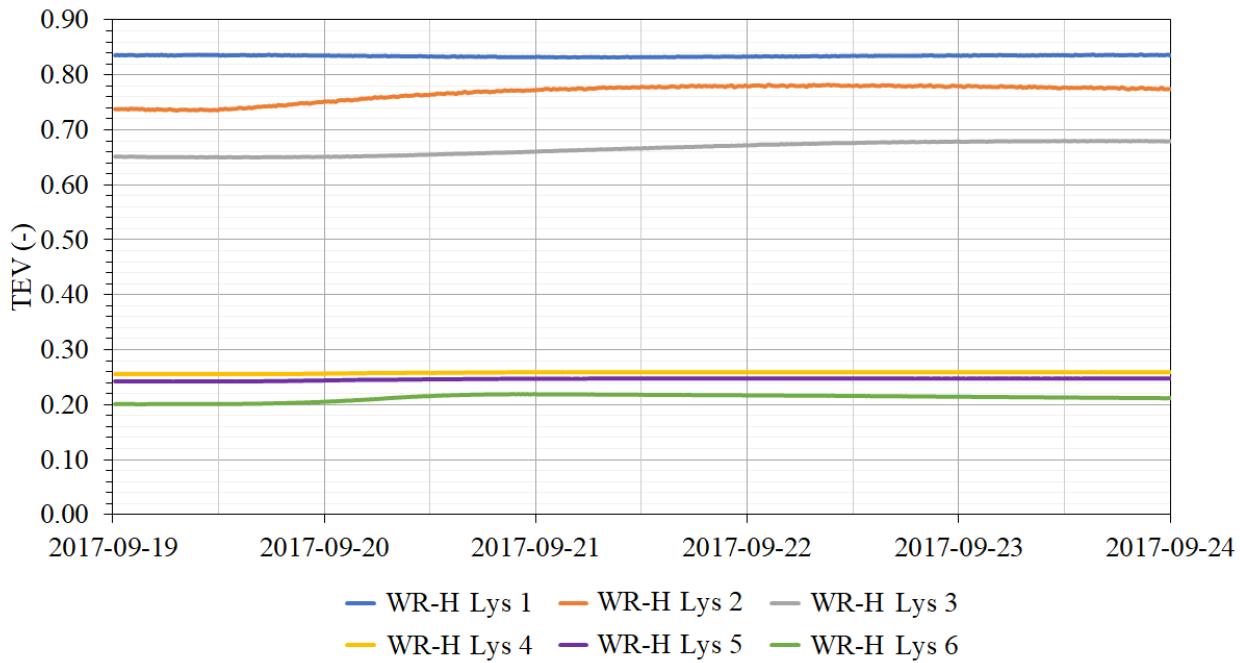


Figure I.1 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm sous la surface des stériles) à partir du début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E et durant les 5 jours suivants. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).

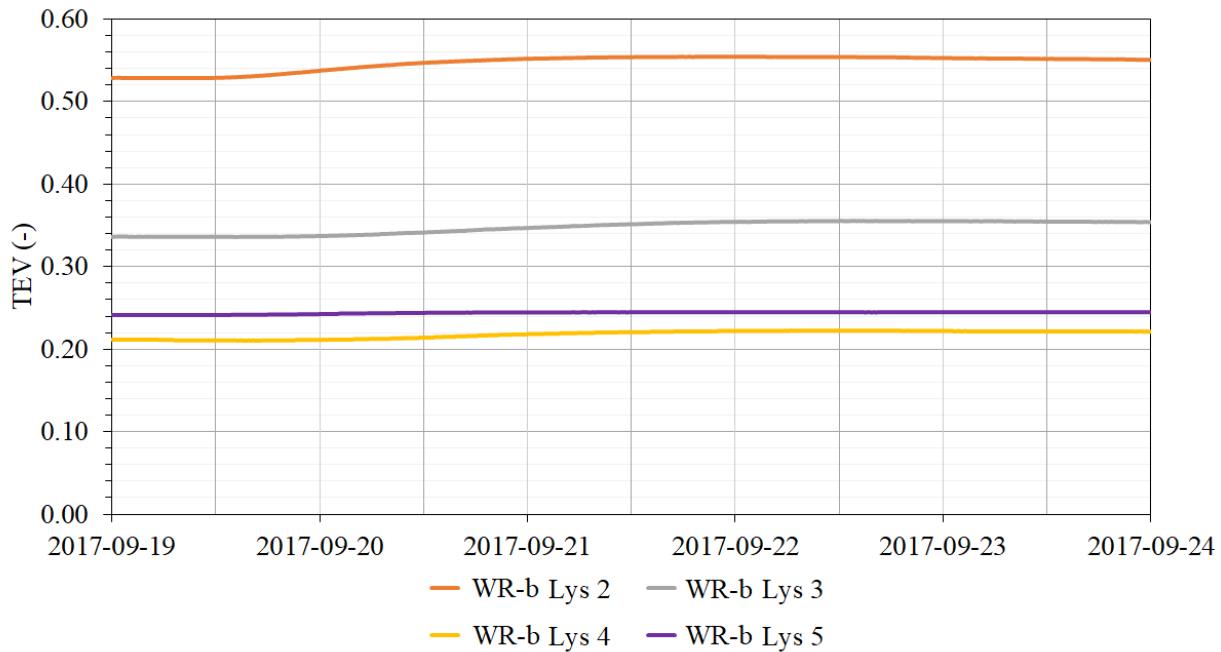


Figure I.2 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm sous la surface des stériles) à partir du début de l'essai d'infiltration à grande échelle I-E et durant les 5 jours suivants. Les sondes installées au-dessus des lysimètres 1 et 6 n'ont pas enregistré de données de TEV durant la période étudiée. Les TEV dans les stériles n'ont pas pu être calibrées et ne sont pas réalistes; par contre, les variations de TEV sont jugées représentatives du comportement réel sur le terrain (voir texte pour les détails).

ANNEXE J - RÉSULTATS DE L'ESSAI D'INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-A

Calcul du volume d'eau de l'essai

Tableau J.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A.

Position de la rangée et numéro correspondant de la chaudière			
Lysimètre	Ouest	Central	Est
1	1	2	3
2	4	5	6
3	7	8	9
4	10	11	12
5	13	14	15
6	16	17	18

Tableau J.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-A.

Lysimètre	Numéro de la chaudière	Phase 1		Phase 2		Total	
		Volume (ml)	Volume (ml)	Volume (ml)	Volume (ml)	Volume (ml)	Volume (ml)
1	1	420		310		730	
	2	570		480		1050	
	3	420		360		780	
2	4	470		300		770	
	5	585		540		1125	
	6	460		510		970	
3	7	460		380		840	
	8	610		610		1220	
	9	470		500		970	
4	10	420		340		760	
	11	680		640		1320	
	12	440		480		920	
5	13	460		280		740	
	14	540		470		1010	
	15*	200		190		390	
6	16	240		440		680	
	17	750		560		1310	
	18	310		240		550	

Tableau J.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-A.

	Hauteur d'eau (m)
Phase 1	0.0074
Phase 2	0.0070
Total	0.0144
Volume (m³) pour aire de la halde (600 m²)	8.64

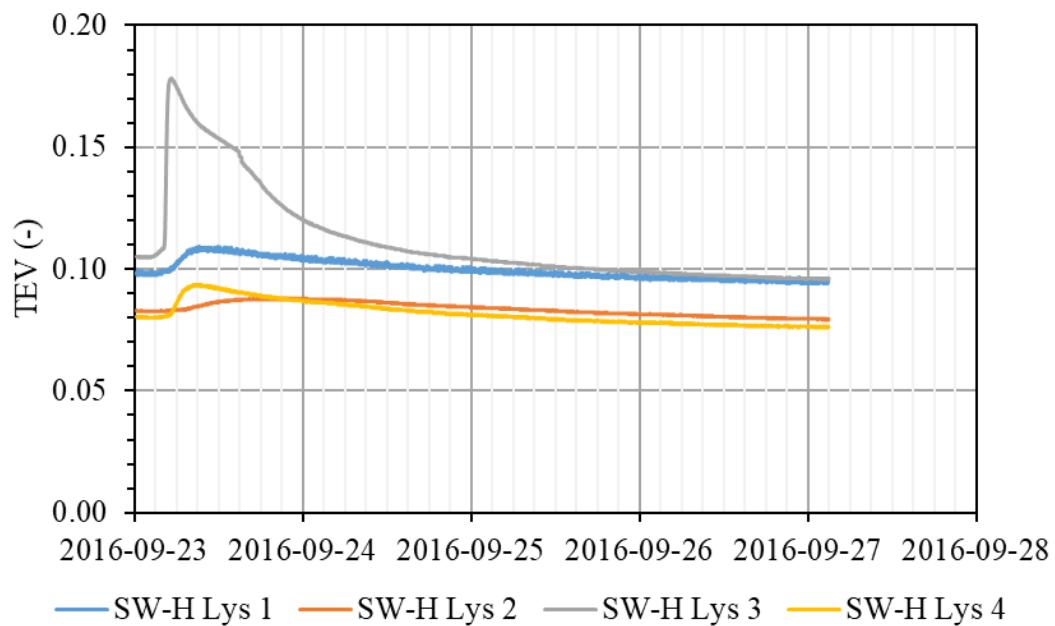
Couche de sable (CCE)

Figure J.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016). Note : Les sondes SW-H Lys 5 et SW-H Lys 6 n'ont enregistré aucune valeur pendant l'essai.

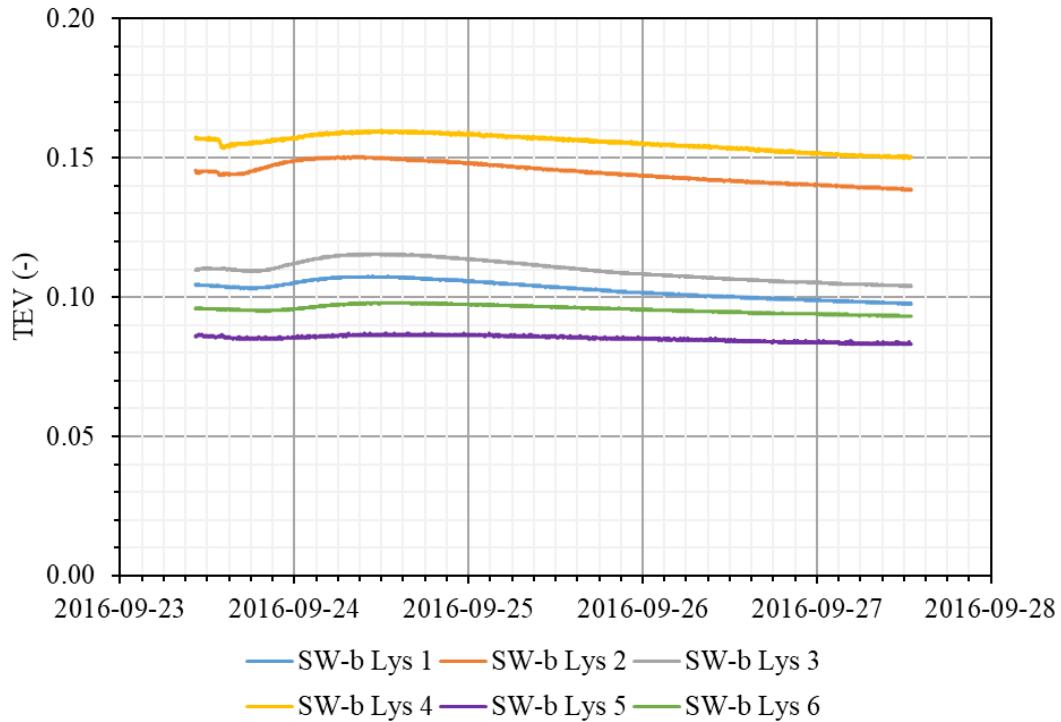


Figure J.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).

Haut des roches stériles

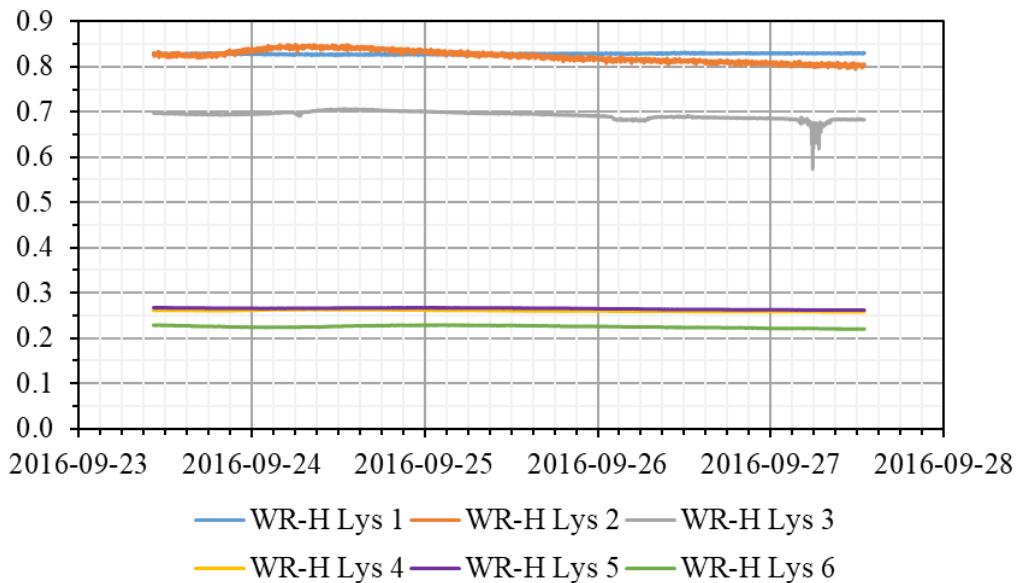


Figure J.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).

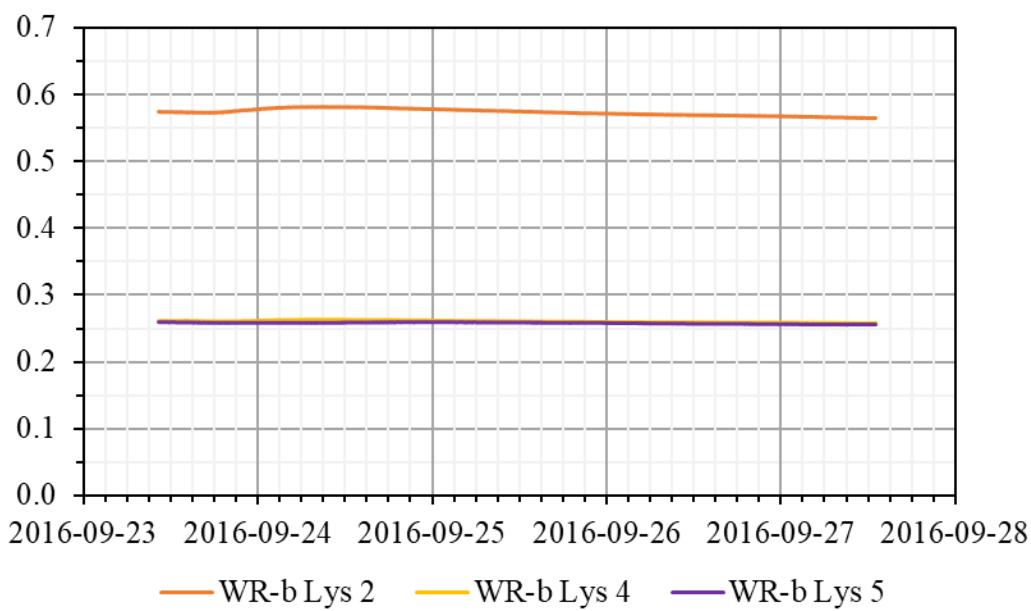


Figure J. 4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).

Lysimètre

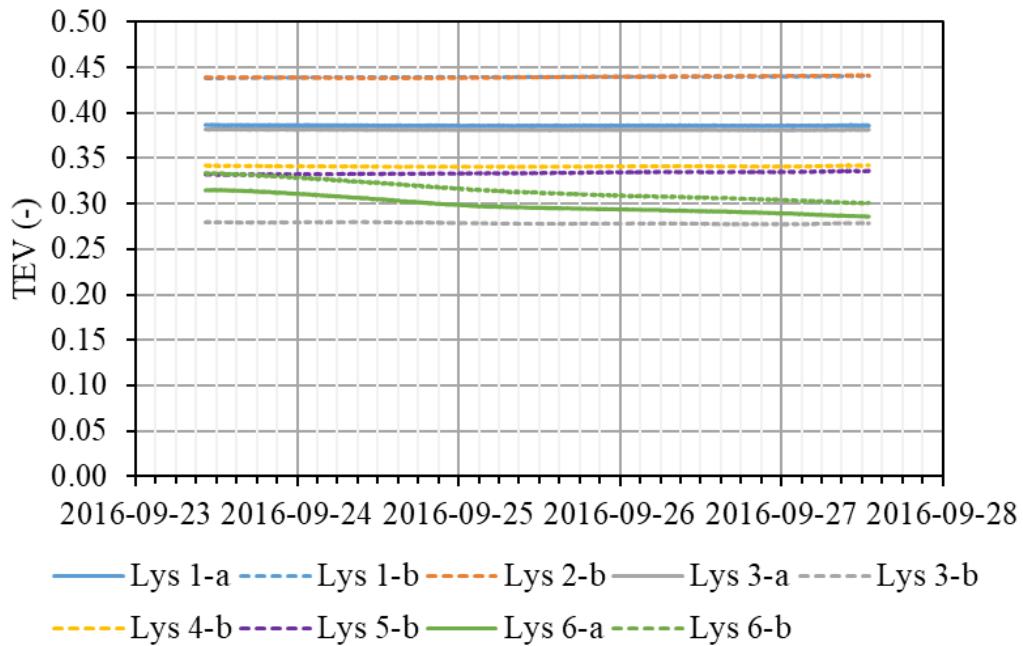


Figure J. 5 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-A et pour les 4 jours suivants (23 septembre 2016 au 27 septembre 2016).

ANNEXE K - RÉSULTATS DE L'ESSAI D'INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-B

Calcul du volume d'eau de l'essai

Tableau K.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B.

Lysimètre	Position de la rangé et numéro correspondant de la chaudière			
	Ouest	Centrale-O	Centrale-E	Est
1		1	2	
	3			4
2		5	6	
3		8	7	
	17			18
4		9	10	
5		12	11	
	13			14
6		16	15	

Tableau K.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-B.

Lysimètre	Numéro de la chaudière	Total
		Volume (ml)
1	1	760
	2	640
	3	800
	4	380
2	5	900
	6	560
3	7	630
	8	820
	17	750
	18	300
4	9	940
	10	600
5	11	400
	12	800
	13	580
	14	400
6	15	400
	16	900

Tableau K.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-B.

	Hauteur d'eau (m)
Total	0,0107
Volume (m³) pour aire de la halde (600 m²)	6,42

Couche de sable (CCE)

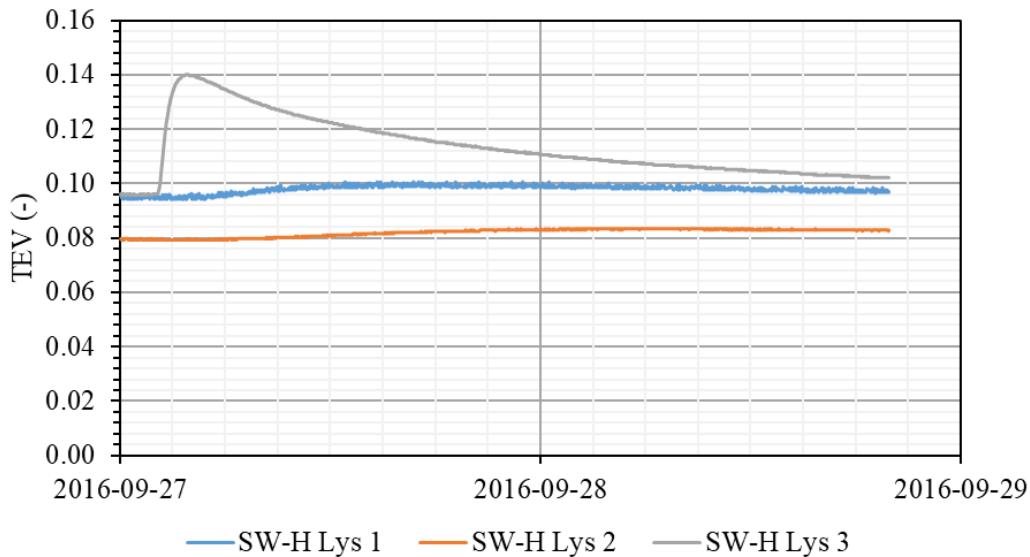


Figure K.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-B et pour les 2 jours suivants (du 27 au 29 septembre 2016).

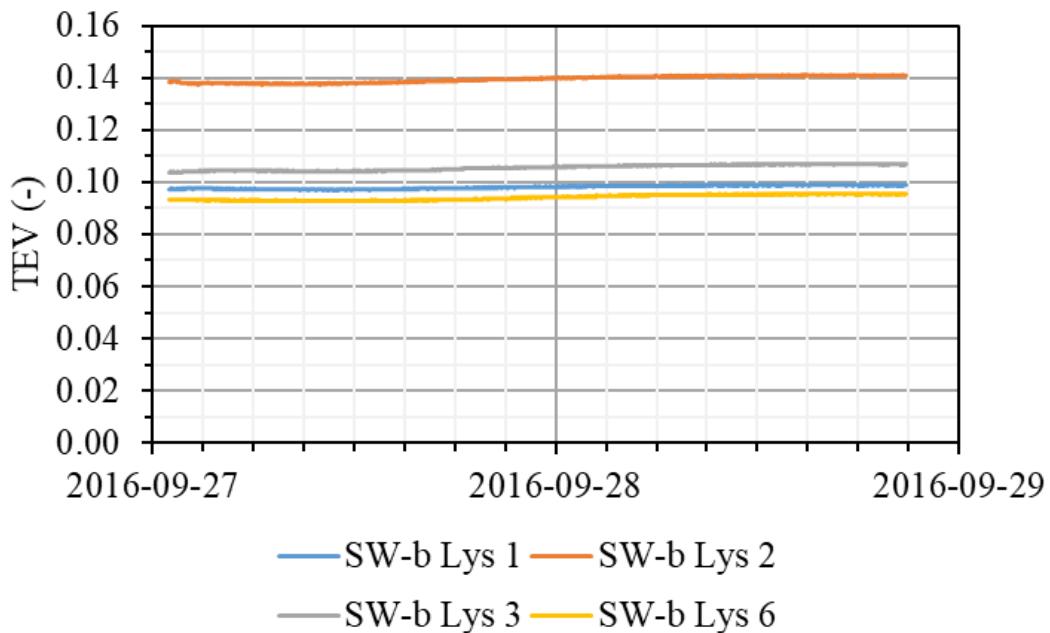


Figure K.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).

Haut des roches stériles

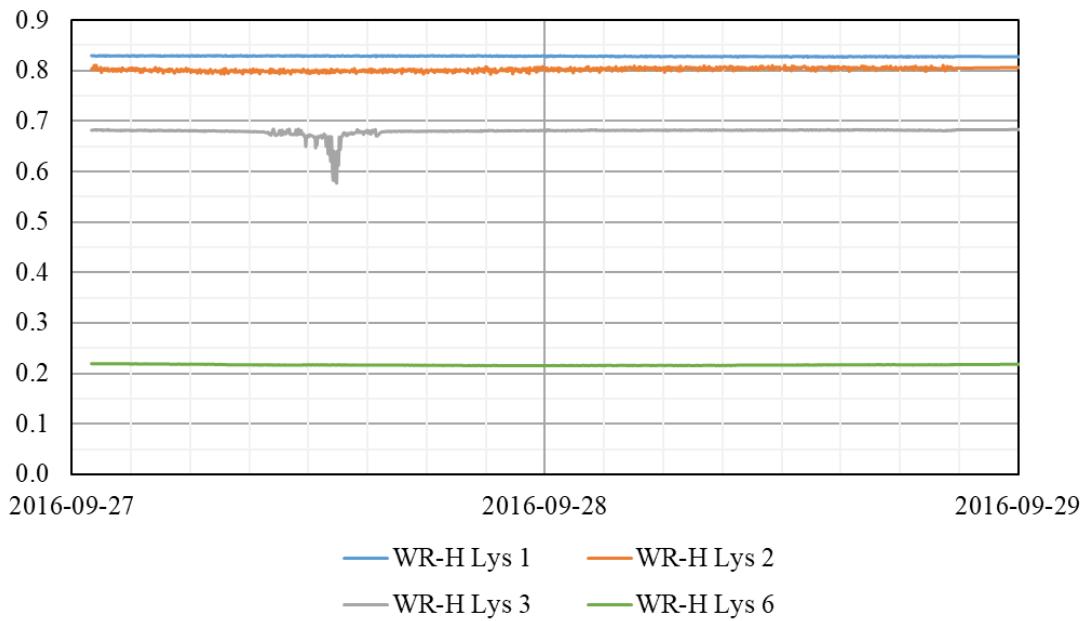


Figure K.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).

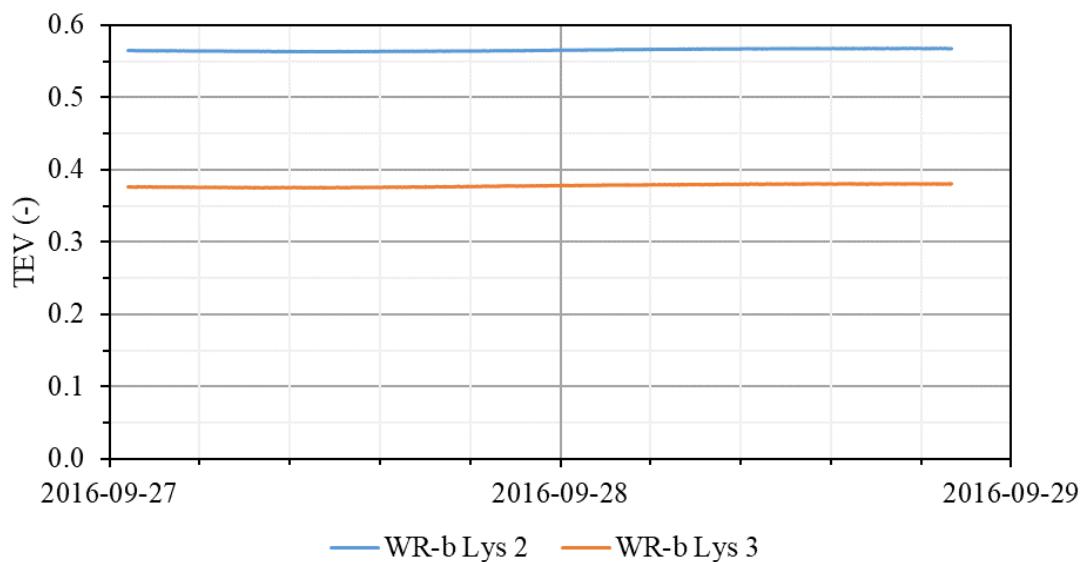


Figure K.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).

Lysimètre

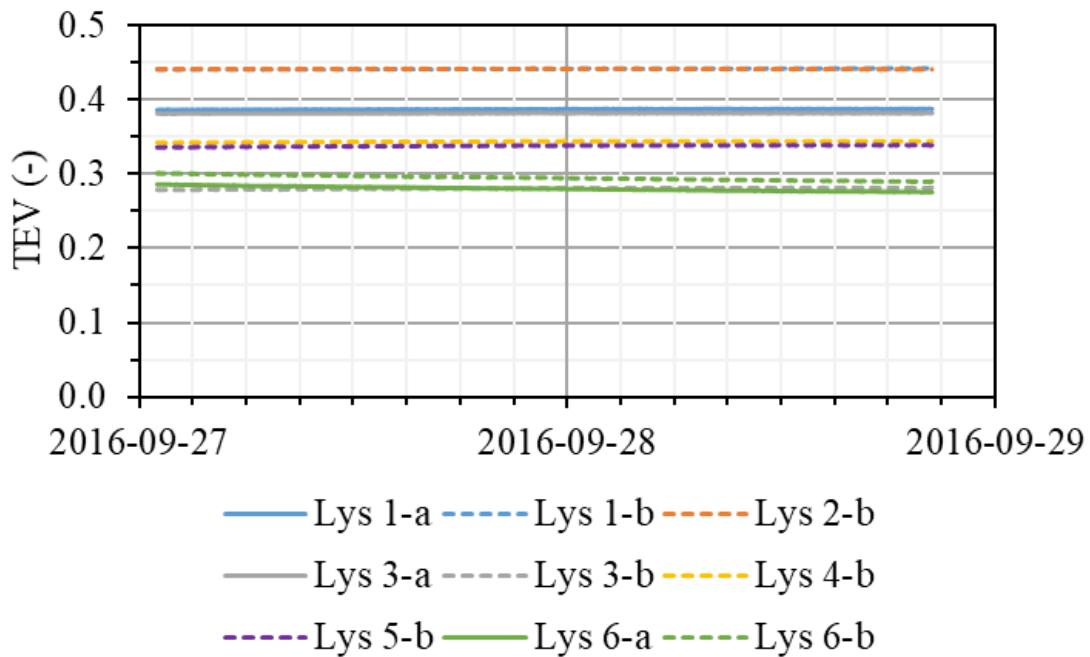


Figure K.5 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-B et pour les 2 jours suivants (27 septembre 2016 au 29 septembre 2016).

ANNEXE L - RÉSULTATS DE L'ESSAI D'INFILTRATION À GRANDE ÉCHELLE I-D

Calcul du volume d'eau de l'essai

Tableau L.1 Position et numérotation des chaudières pour le calcul du volume d'eau lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D.

Position de la rangé et numéro correspondant de la chaudière		
Lysimètre	Ouest	Est
1	1	2
2	3	4
	5	6
3	7	8
4	9	10
	11	12
5	13	14
6	15	16

Tableau L.2 Volume d'eau dans les chaudières lors de l'essai I-D.

Lysimètre	Numéro de la chaudière	Total
		Volume (ml)
1	1	1605
	2	1245
2	3	2185
	4	1050
3	5	2200
	6	900
4	7	2170
	8	815
5	9	2230
	10	895
6	11	2500
	12	1045
5	13	2740
	14	1125
6	15	2590
	16	1675

Tableau L.3 Calcul du volume d'eau de l'essai à grande échelle I-D.

	Hauteur d'eau (m)
Phase 1	0,013
Phase 2	0,009
Phase 3	0,006
Total	0,028
Volume (m³) pour aire de la halde (600 m²)	16,8

Couche de roches stériles concassées

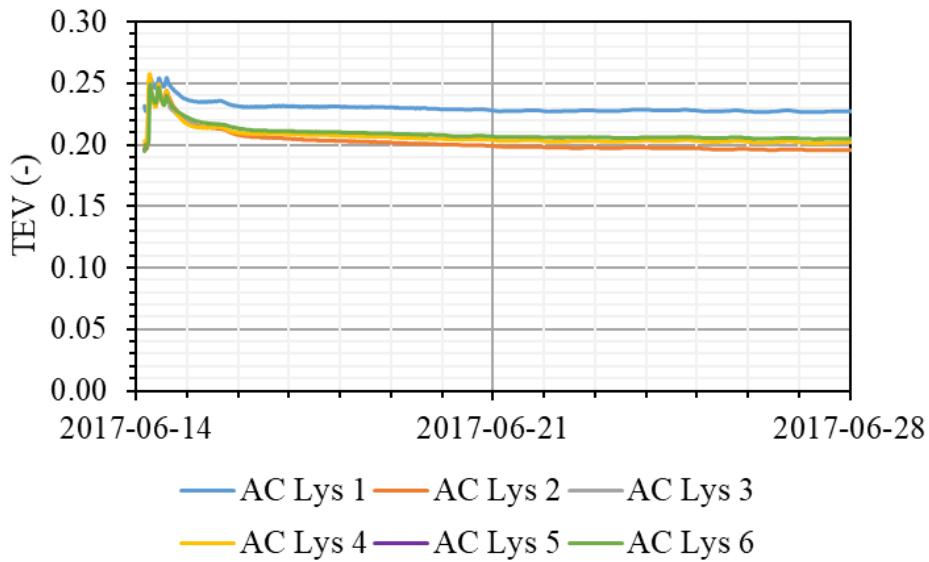


Figure L.1 Variations des TEV mesurées (valeurs non-calibrées) dans la couche de roches stériles concassées (0,25 m de profondeur dans la CCE, 5 cm au-dessus de la couche de sable) près de la surface de la halde à stériles expérimentale lors de l'essai d'infiltration I-D (14 au 28 juin 2017).

Couche de sable (CCE)

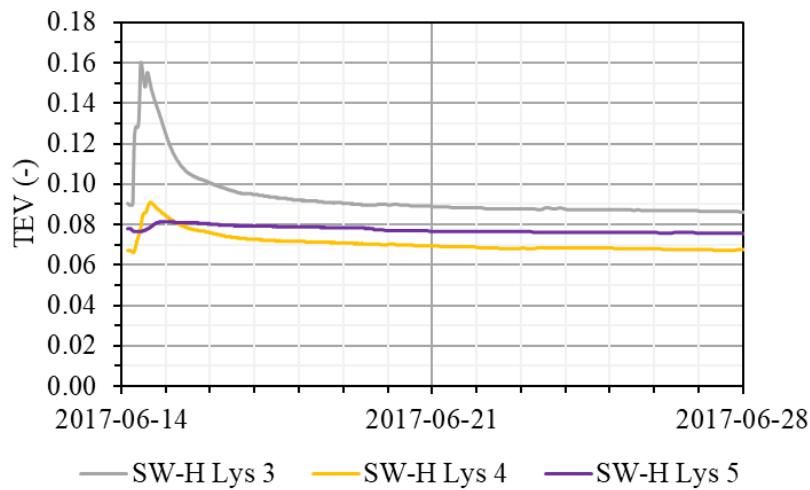


Figure L.2 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'essai d'infiltration I-D et pour les 14 jours suivants (du 14 au 28 juin 2017).

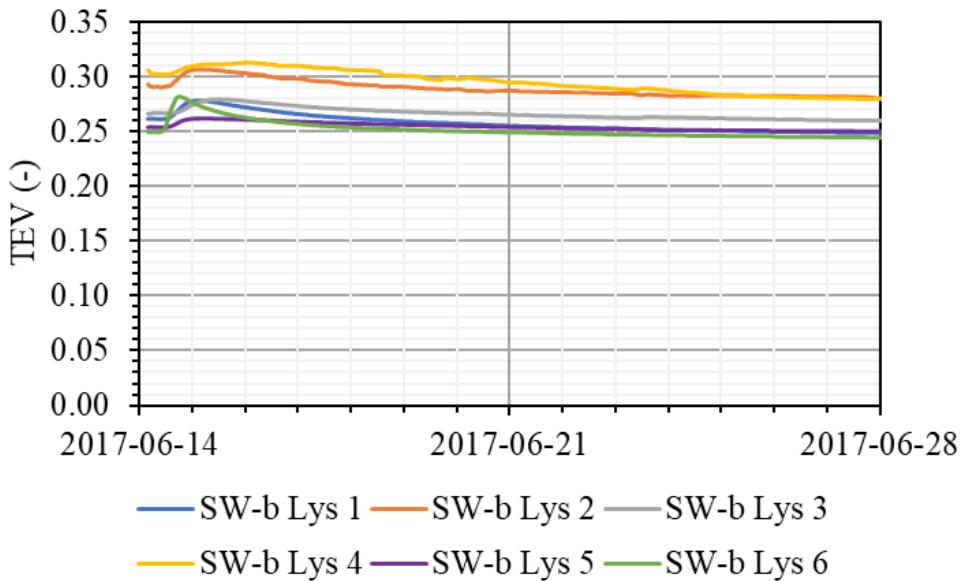


Figure L.3 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017).

Haut des roches stériles

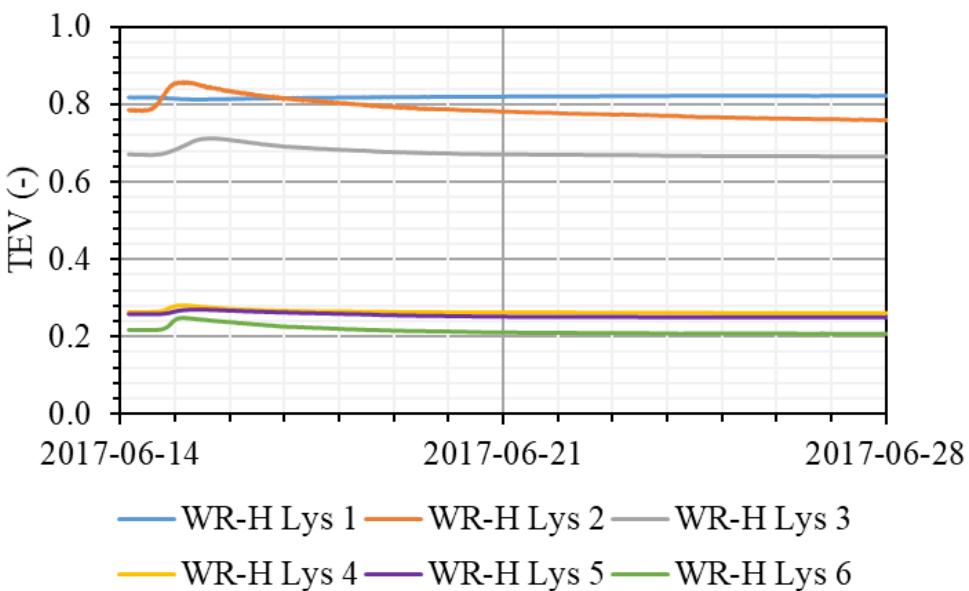


Figure L.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017).

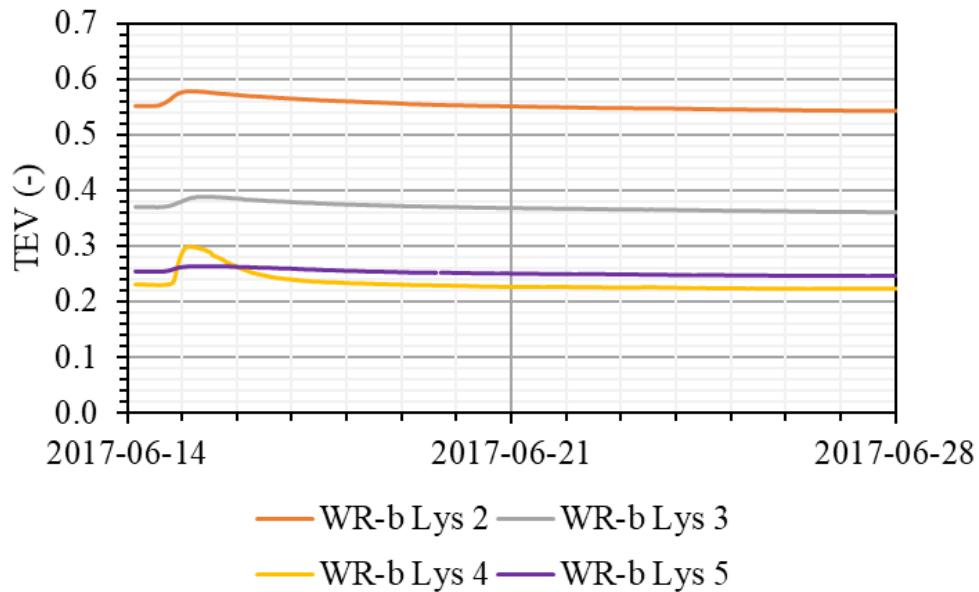


Figure L.5 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017).

Lysimètre

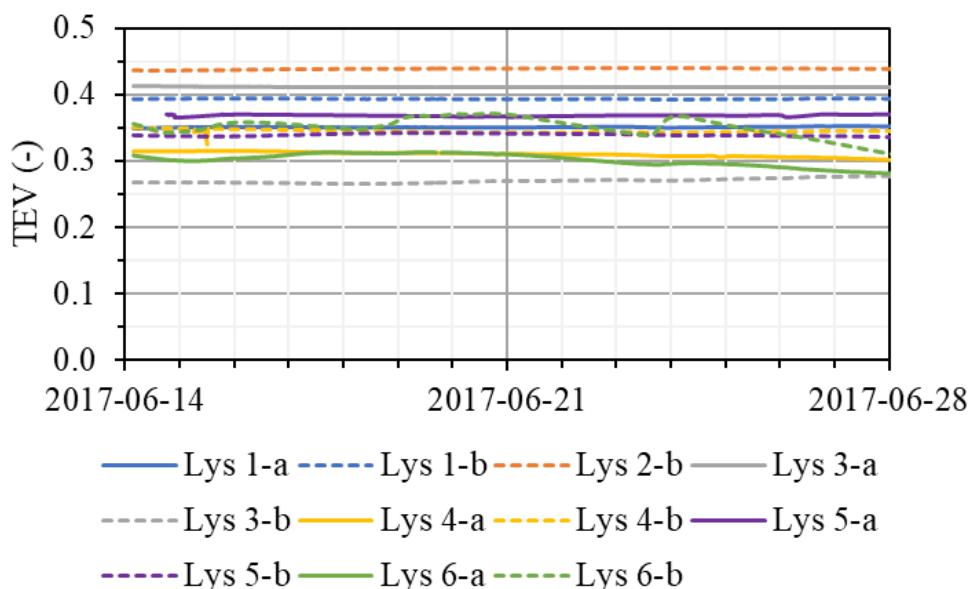


Figure L.6 Variations de TEV dans les lysimètre sous la halde expérimentale lors de l'essai d'infiltration à grande échelle I-D et pour les 14 jours suivants (14 au 28 juin 2017).

ANNEXE M - RÉSULTATS DE L'ÉVÉNEMENT DE PRÉCIPITATION P1 (2016-06-06)

Couche de sable (CCE)

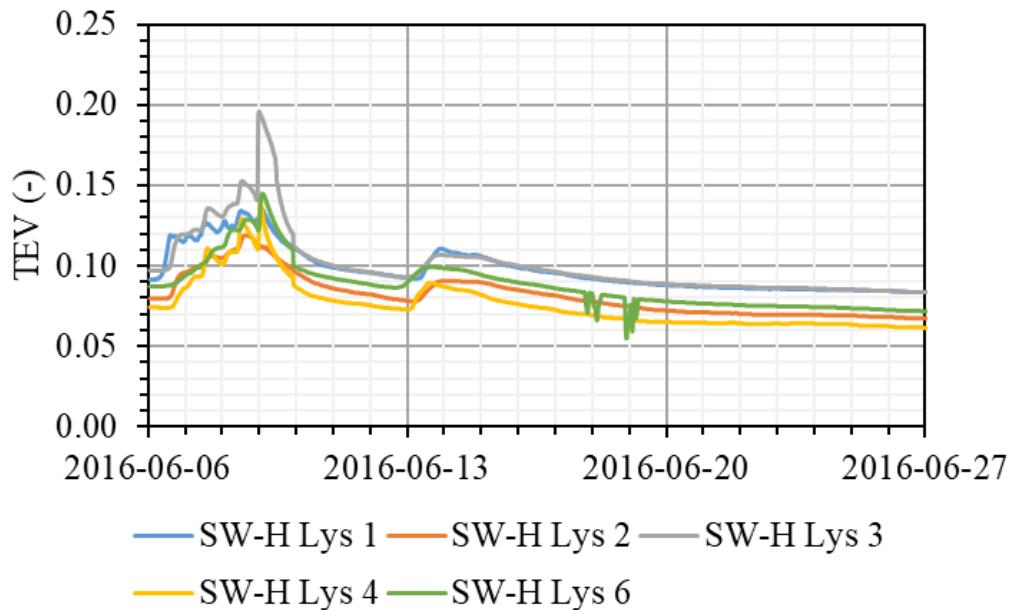


Figure M.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (du 6 au 27 juin 2016).

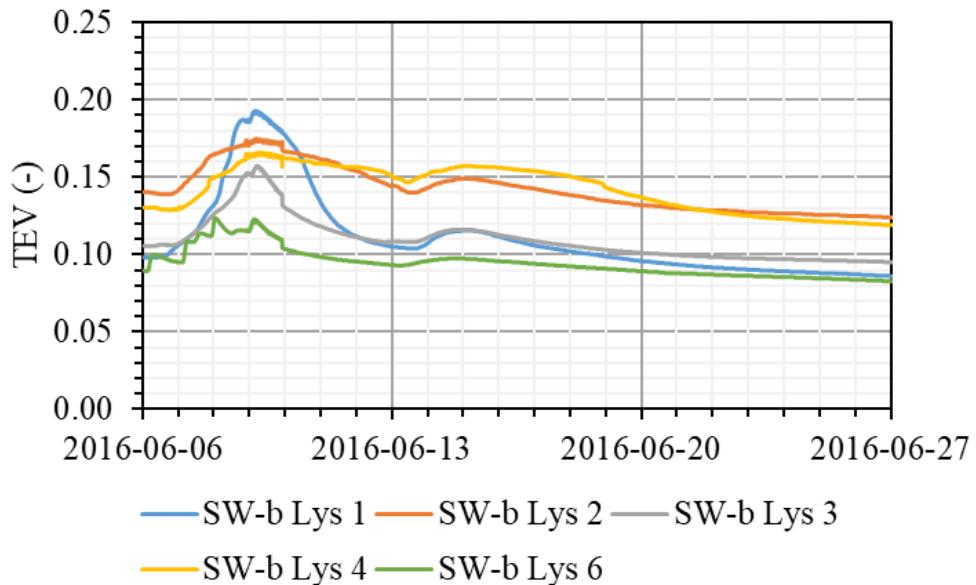


Figure M.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 14 jours suivants (6 au 27 juin 2016).

Haut des roches stériles

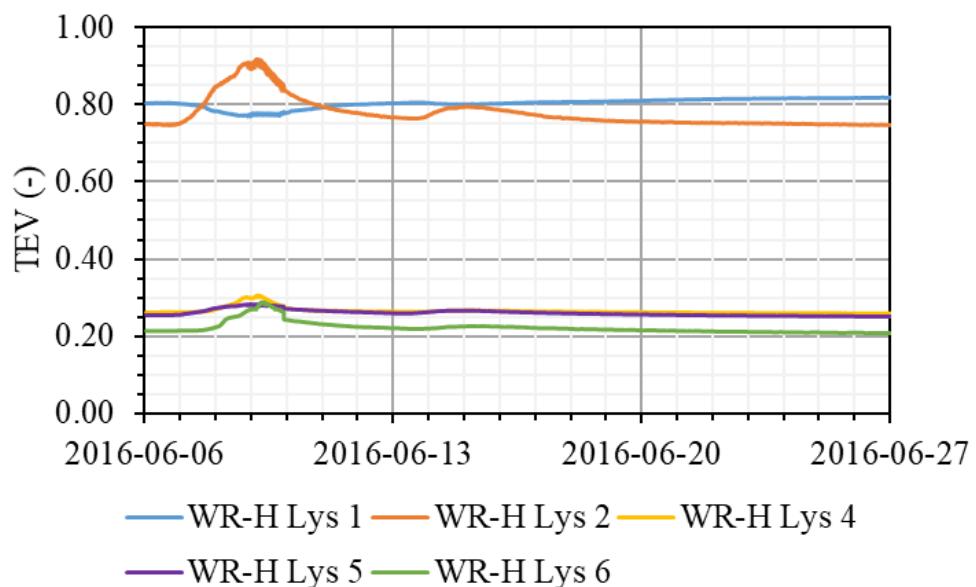


Figure M.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (6 au 21 juin 2016).

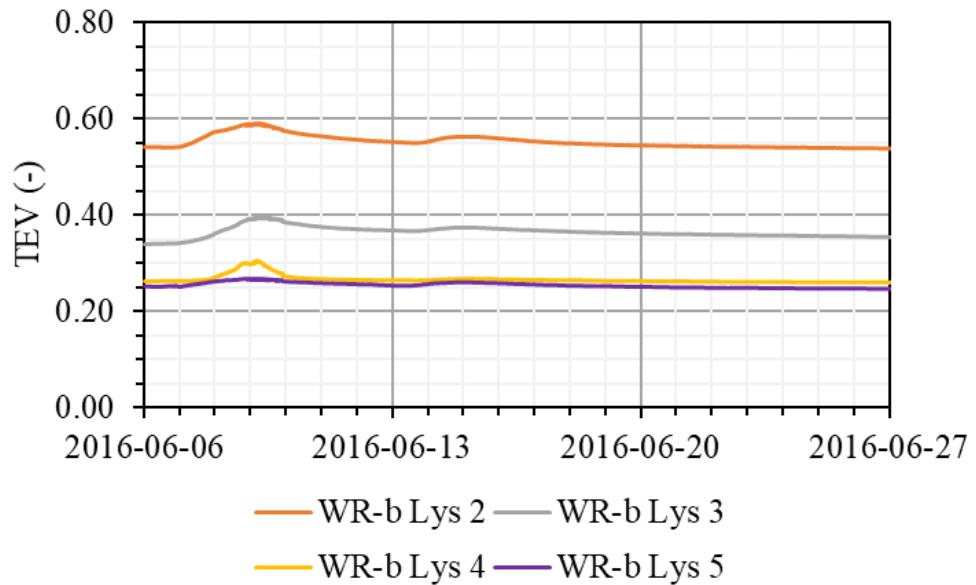


Figure M.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P1 et pour les 21 jours suivants (6 au 21 juin 2016).

ANNEXE N - RÉSULTATS DE L'ÉVÉNEMENT DE PRÉCIPITATION P2

(2016-08-07)

Couche de sable (CCE)

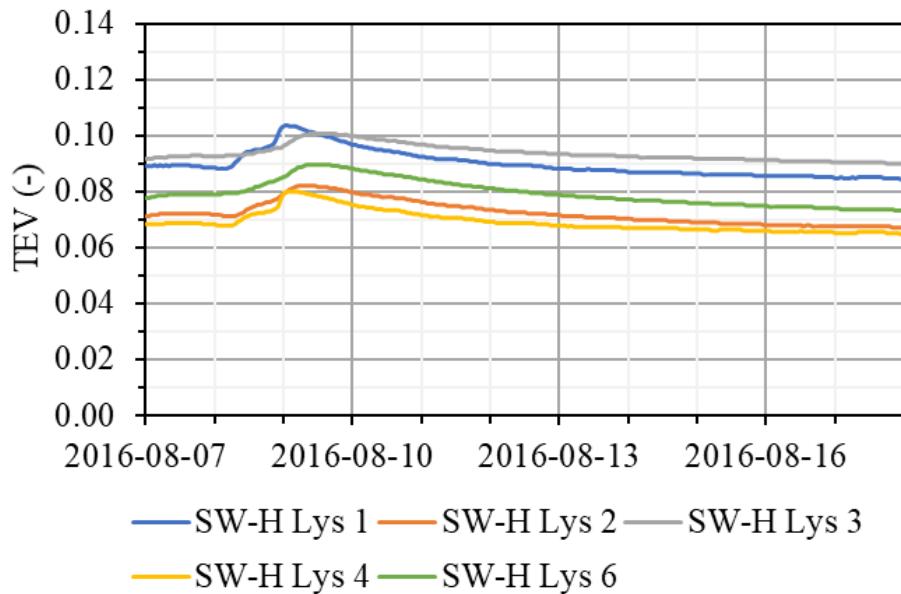


Figure N.1 Variations des TEV dans le haut de la couche de sable (0,5 m sous la surface, 20 cm sous l'interface entre la roche stérile concassée et la couche de sable) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016).

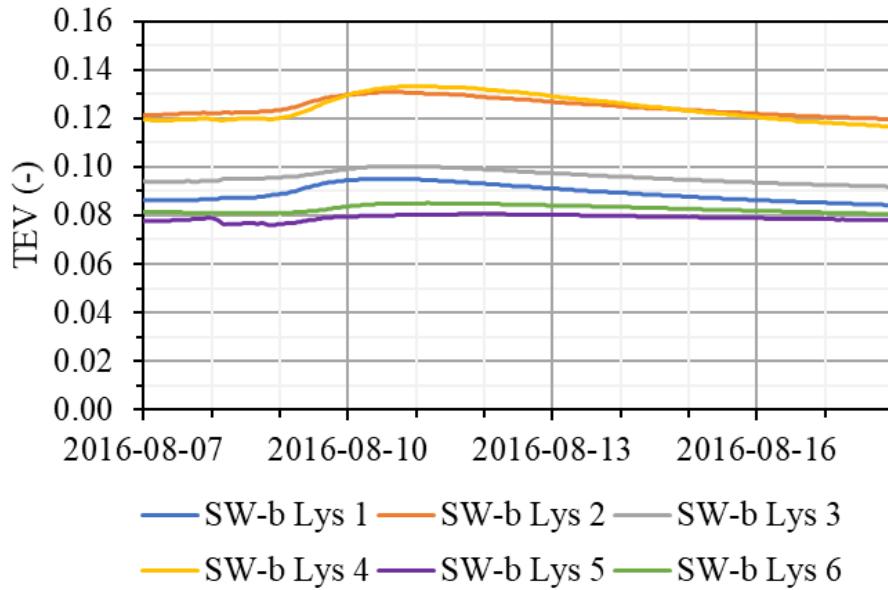


Figure N.2 Variations de TEV dans le bas de la couche de sable de la CCE (0,8 m sous la surface de la halde, 20 cm au-dessus des stériles) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016).

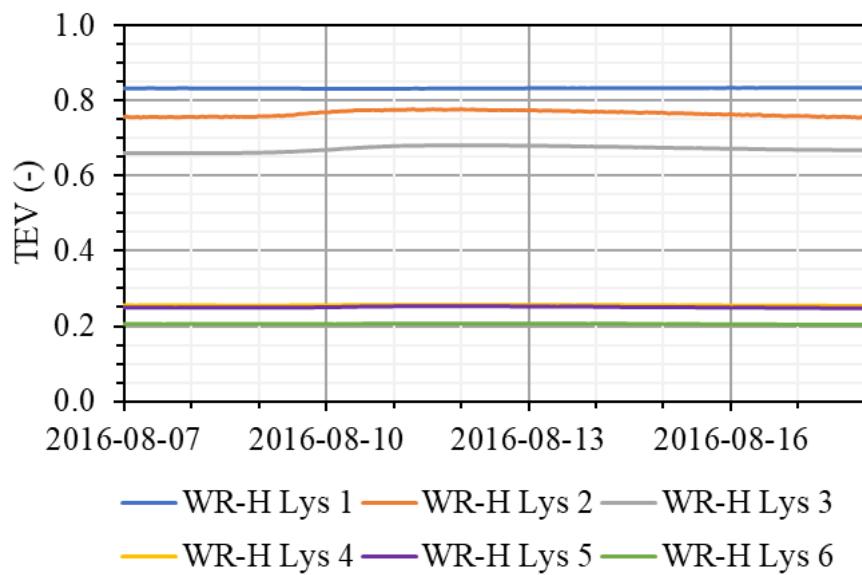


Figure N.3 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,1 m sous la surface de la halde, 10 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016).

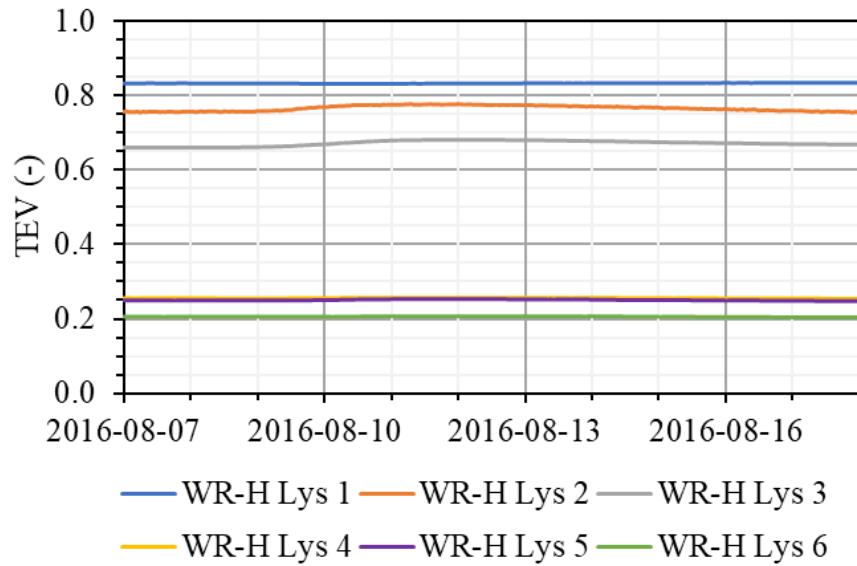


Figure N.4 Variations de TEV dans le haut des stériles (1,3 m sous la surface de la halde, 30 cm au-dessous de la CCE) lors de l'événement de précipitation P2 et pour les 21 jours suivants (du 7 au 18 août 2016).

ANNEXE O - PROFILS DE SUCCION DE LA SIMULATION AVEC LES STÉRILES BOLDUC

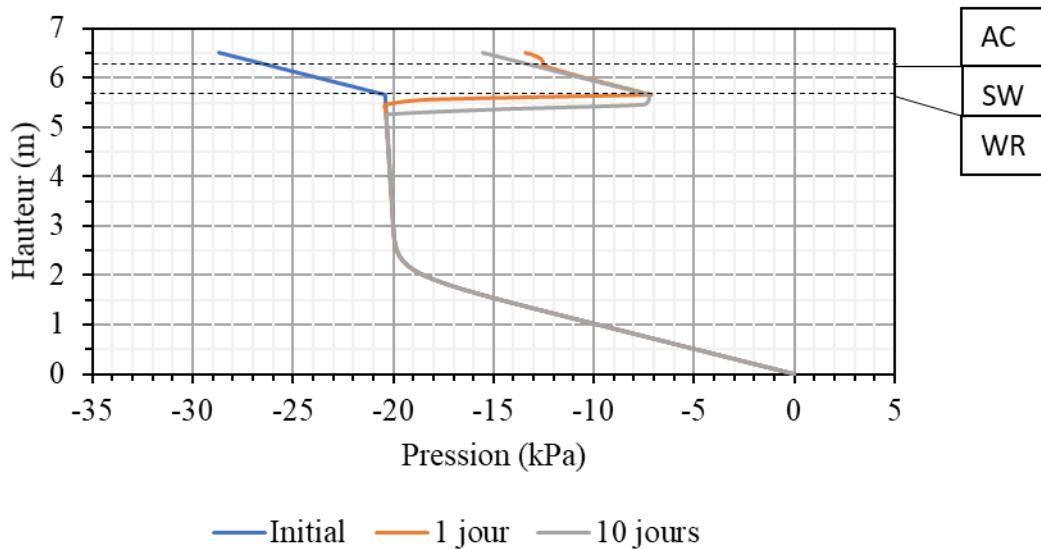


Figure O.1 Profil de succion à $x=10$ m de la simulation avec les stériles Bolduc en remplacement des stériles de Lac Tio. Les profils initial ($t=0$ sec), un jour après le début de l'essai ($t=86400$ sec) et après 10 jours de drainage ($t=900000$ sec) sont représentés dans la figure.

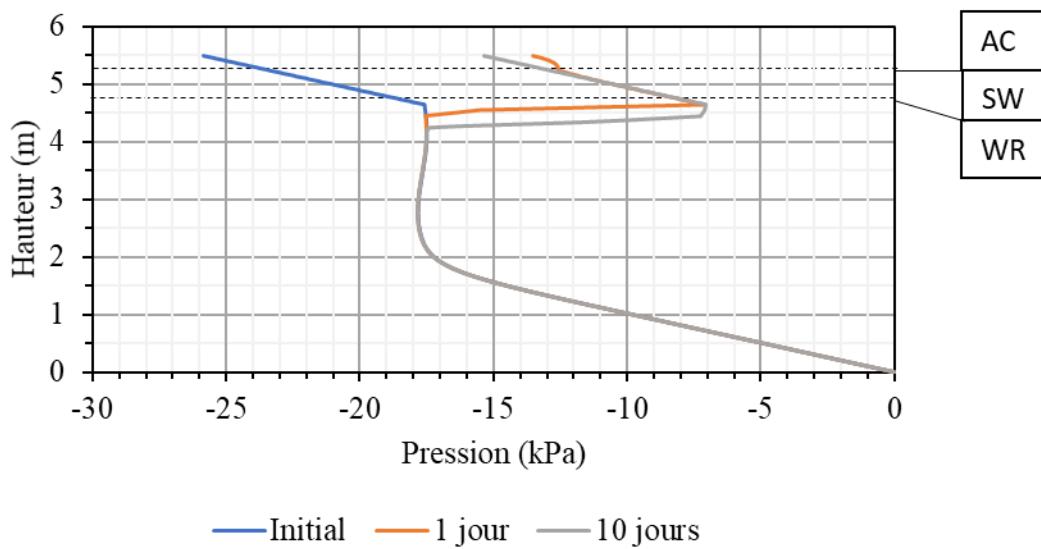


Figure O.2 Profil de succion à $x=30$ m de la simulation avec les stériles Bolduc en remplacement des stériles de Lac Tio. Les profils initial ($t=0$ sec), un jour après le début de l'essai ($t=86400$ sec) et après 10 jours de drainage ($t=900000$ sec) sont représentés dans la figure.

