PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Évaluation de l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif de type stockage-relargage constitué de rejets calcaires phosphatés en climat aride
Auteur: Author:	Jihane Knidiri
Date:	2015
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Knidiri, J. (2015). Évaluation de l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif de type stockage-relargage constitué de rejets calcaires phosphatés en climat aride [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/2055/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/2055/
Directeurs de recherche: Advisors:	Bruno Bussière, Mostafa Benzaazoua, & Rachid Hakkou
Programme: Program:	Génie minéral

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA PENTE SUR LE COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UN RECOUVREMENT ALTERNATIF DE TYPE STOCKAGE-RELARGAGE CONSTITUÉ DE REJETS CALCAIRES PHOSPHATÉS EN CLIMAT ARIDE

JIHANE KNIDIRI

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)

NOVEMBRE 2015

© Jihane Knidiri, 2015.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Ce mémoire intitulé :

ÉVALUATION DE L'EFFET DE LA PENTE SUR LE COMPORTEMENT HYDROGÉOLOGIQUE D'UN RECOUVREMENT ALTERNATIF DE TYPE STOCKAGE-RELARGAGE CONSTITUÉ DE REJETS CALCAIRES PHOSPHATÉS EN CLIMAT ARIDE

présenté par : KNIDIRI Jihane

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

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

M. BAUDRON Paul, Doctorat, président

M. BUSSIÈRE Bruno, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BENZAAZOUA Mostafa, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. HAKKOU Rachid, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. THERRIEN René, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma mère et à mon père

REMERCIEMENTS

Il est toujours délicat de remercier l'ensemble des personnes qui ont contribuées à l'aboutissement de ce travail de recherche. Que ceux qui ne sont pas mentionnés n'en tiennent pas rigueur.

Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur Bruno Bussière pour avoir encadré et dirigé mes travaux de recherche et pour m'avoir apporté, non seulement ses conseils scientifiques précieux, mais également son soutien constant tout au long de ma maîtrise. L'aboutissement de ce travail est dû à sa rigueur scientifique et son expertise. Je tiens ici à lui exprimer ma gratitude, mon profond respect et ma reconnaissance.

Je remercie également mes co-directeurs Mostafa Benzaazoua et Rachid Hakkou ainsi que le professeur Abdelkabir Maqsoud pour leur aide et le temps qu'ils ont consacré pour lire et commenter mes articles.

Je ne pourrais assez remercier Bruno Bossé pour son aide, son soutien, sa disponibilité, nos discussions éclairées, ses conseils et sa collaboration tout au long de ce projet.

Mes chaleureux remerciements vont aussi aux membres de la direction et aux techniciens de l'unité de recherche et de service en technologie minérale (URSTM) pour leur aide précieuse au cours des travaux de laboratoire, pour leur gentillesse et pour leur bonne humeur: soit Louise, Lucie, Denis, Sylvette, Alain, Yvan, Patrick, Pierre-Alain, Janie.

Merci à tous mes amis que je connaissais avant et que j'ai eu l'occasion de connaitre au Québec particulièrement Yassine Taha pour son soutien, Aurélie Chopard (chopchop) et Babacar El Kandji pour la relecture de ce manuscrit, Amal Sahi, Abdessamad Khalil, Rabei Argane, Mohamed Edahbi, Abdeljalil Ait Khouya, Magalie, Abdellatif Elghali, Marie-Pier Éthier, Vincent Boulanger-Martel, Alex Kalonji, Ibrahima Hane, Amine Khalf.

Je tiens aussi à remercier les gens de Kettara : Hassan, Abdellatif, Jamal, Youssef pour leur dévouement et leur aide sur le terrain; et aussi Mohamed Elbalbali pour la manutention du système d'irrigation. Sans oublier Étienne Parent avec qui j'ai travaillé sur le terrain.

Je ne saurais exprimer ma gratitude envers Hassan Bouzahzah et sa petite famille, pour leur support et leur aide.

Mes dernières pensées vont à ma famille, mes parents, Joudia et Jamal, ma sœur Hiba et mon frère Farid. Merci pour votre amour, votre confiance et votre soutien depuis déjà bien longtemps. Et puis parce que je laisse le meilleur pour la fin, je remercie Mehdi, pour avoir supporté les hauts et les bas durant la période de rédaction et pour m'avoir toujours soutenue.

RÉSUMÉ

Dans les climats arides et semi-arides, le taux d'évaporation est élevé et les précipitations sont faibles. Dans ces conditions, le drainage minier acide (DMA), généré à partir de l'oxydation de minéraux sulfurés contenus dans les rejets miniers lorsque ceux-ci sont exposés à l'air et à l'eau, peut être contrôlé en réduisant l'infiltration d'eau. Parmi les techniques disponibles pour ce faire, l'utilisation des systèmes de recouvrements alternatifs type SR, connus sous l'appellation anglaise «store-and-release», est probablement la meilleure approche autant d'un point de vue technique qu'économique. Ces recouvrements sont conçus avec des matériaux ayant des propriétés hydrogéologiques spécifiques leur permettant de stocker l'eau des précipitations en saisons humides et de la retourner à l'atmosphère via le processus physique d'évaporation (ou biophysique d'évapotranspiration) en saisons sèches.

Le site minier abandonné de Kettara est l'un des sites miniers les plus générateurs de DMA au Maroc. Dans cette région, le drainage minier est une source de pollution qui affecte les écosystèmes environnants ainsi que les personnes vivant à proximité du site. Afin de pallier à ce problème de pollution, la restauration du site s'avère nécessaire.

La mise en place d'un recouvrement de type SR par-dessus les rejets Kettara a ainsi été proposée par Hakkou et al. (2009). Ces mêmes auteurs ont également suggéré d'utiliser les rejets calcaires phosphatés provenant des mines de phosphate situées à proximité de la mine Kettara comme principale composante du recouvrement. Afin d'évaluer plus à fond cette option, plusieurs essais en 1D et à des échelles différentes (colonnes instrumentées et cellules expérimentales instrumentées) ont été réalisés sur le site minier abandonné. Les résultats obtenus ont confirmé le potentiel de rejets calcaires phosphatés comme matériau de recouvrement SR pour contrôler les infiltrations d'eau. Toutefois, d'importantes incertitudes demeuraient quant à l'influence des conditions inclinées sur le comportement hydrogéologique du recouvrement SR. Cet aspect est important pour la restauration des digues présentes au site Kettara pour retenir les rejets miniers, digues qui dépassent parfois la dizaine de mètres de hauteur. En effet, en raison de l'inclinaison de la pente, l'eau peut s'accumuler à l'interface inclinée lors d'événements de précipitations extrêmes, ce qui pourrait conduire à une rupture des effets de barrière capillaire. À cet endroit (appelé la limite de bas de pente ou downdip limit, DDL), la couverture n'est plus efficace pour contrôler l'infiltration d'eau dans les rejets miniers.

Ainsi, le principal objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de la pente sur un recouvrement SR construit directement sur le site minier abandonné de Kettara. De façon plus spécifique, les objectifs du projet consistent à : 1) caractériser les rejets calcaires phosphatés et les rejets grossiers constituant le recouvrement SR; 2) construire une cellule expérimentale d'un recouvrement SR inclinée directement sur le terrain; 3) Instrumenter la cellule expérimentale et faire le suivi de son comportement hydrogéologique sous des conditions climatiques naturelles et sous deux évènements de pluie importants (artificiels) pour la région; 4) Évaluer la capacité de stockage-relargage du recouvrement et déterminer la longueur effective de la barrière capillaire (L_{eff} ou dit autrement, identifier la position du point DDL) *in situ* lors des événements de précipitation importants; 5) Comparer les résultats obtenus sur le terrain pour L_{eff} avec les solutions analytiques et les résultats de modélisation numérique afin de mieux comprendre le comportement hydrogéologique du recouvrement SR étudié.

Pour atteindre nos objectifs, une caractérisation des principales propriétés physiques, hydrogéologiques et géotechniques a été réalisée sur les rejets calcaires phosphatés et les rejets miniers grossiers de Kettara. Ces travaux de caractérisation ont permis de montrer que les deux matériaux ont un contraste hydrogéologique suffisant pour créer les effets de barrière capillaire désirés à l'interface entre les deux matériaux. Une cellule expérimentale SR inclinée de 14,5° (8 m de hauteur et 10 m de largeur) a été construite sur le site minier de Kettara; le recouvrement comprenait 80 cm de rejets calcaires phosphatés placés directement sur les rejets grossiers réactifs de Kettara (bris capillaire). Afin de faire un suivi complet du comportement hydrogéologique de la cellule inclinée et des différentes composantes du bilan hydrique des lysimètres, plusieurs instruments (sondes de teneur en eau volumiques, capteurs de succion, tensiomètres) ont été installés dans la couche SR, à différentes profondeurs. De plus, une station météorologique a été mise en place. Le monitoring de la cellule inclinée a été effectué durant une année (d'avril 2014 à avril 2015) pour des conditions naturelles, ainsi qu'après application de deux évènements artificiels de précipitations importantes (100 mm/48h et 155 mm/48h). Les résultats de terrain ont montré que sous des conditions climatiques naturelles et même durant le premier évènement de précipitations important, la presque totalité de l'eau qui s'infiltre est stockée dans le recouvrement et ensuite libérée dans l'atmosphère dans les mois qui suivent; aucune percolation dans les rejets grossiers n'a été détectée. Toutefois, lorsque la couverture a été soumise à des précipitations plus importantes (simulation d'une précipitation de 155 mm en 48h) suivies 6 jours plus tard d'un

deuxième événement naturel de précipitations (60 mm en 24h), tous les capteurs de teneur en eau volumique ont été affectés, de la percolation a été mesurée dans tous les lysimètres et l'eau récupérée avait un pH variant entre 2 et 3.

Plusieurs modélisations numériques ont été effectuées à l'aide du code numérique SEEP/W pour reproduire et valider le comportement hydrogéologique du recouvrement SR lors de l'application d'événements de précipitations importants. Les résultats de modélisations numériques ont montré qu'il était possible de reproduire de façon réaliste le comportement hydrogéologique du recouvrement SR incliné. Ils ont aussi montré que durant la simulation des deux évènements de pluie de 48 heures, que ce soit de 100 mm ou de 155 mm, le régime permanent n'a pas été atteint. La valeur de L_{eff} a été déterminée à l'aide de trois méthodes : les essais de terrain, les solutions analytiques et la modélisation numérique. Les résultats de L_{eff} prédits par le modèle numérique, une fois le régime permanent atteint, sont similaires aux résultats prédits par la solution analytique de Morel-Seytoux (1994). Avant l'atteinte du régime permanent, le modèle numérique donne des résultats proches de ce qui a été mesuré sur le terrain. Les résultats montrent également que pour le cas étudié, la courbe de rétention d'eau en mouillage est la courbe qui permet de mieux caractériser le comportement hydrogéologique du recouvrement SR incliné.

Cette étude montre que le comportement hydrogéologique du recouvrement est influencé par la pente et qu'un taux de précipitation critique ne doit pas être dépassé (≈ 100 mm en 48 heures) afin de contrôler l'infiltration d'eau dans les rejets miniers réactifs. Les résultats de cette étude confirment également le potentiel de valorisation des rejets miniers phosphatés en tant que composante principale d'un système de recouvrement hydrogéologique SR pour contrôler l'infiltration vers les rejets générateurs de DMA. L'utilisation de ces matériaux miniers, en plus d'être efficace pour contrôler la génération de DMA, permettent aussi de réduire les coûts de restauration.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is one of the major liability encountered worldwide for the mining sector. This phenomenon result from the oxidation of sulfide minerals contained in mine wastes when exposed to air and water. In arid and semiarid climates, AMD can be controlled by reducing water infiltration. In fact, among the available techniques, the use of alternative cover systems store-and-release (SR) is probably the best approach considering technical and economic parameters. These covers are designed with materials having specific hydrogeological properties allowing them to store water from rainfall in wet seasons until it can be subsequently removed by evaporation (or evapotranspiration) in dry seasons.

The abandoned Kettara mine site is one of the most AMD generators in Morocco located in arid climate. In this region, the AMD is a source of pollution affecting the surrounding ecosystems and people living nearby the mine site. To overcome this pollution problem, site remediation is required.

The use of a SR cover in Kettara mine has been proposed by Hakkou et al. (2009). These same authors also suggested using phosphate mine wastes from phosphate mines located near Kettara as a main component of the SR cover. To further assess this option, several trials in 1D and at different scales (instrumented columns and instrumented experimental cells) were carried out on the abandoned mine site. Results confirmed the potential of phosphate mine waste as an SR cover material to control water infiltration. However, significant uncertainties remain about the influence of inclined conditions on the hydrogeological behavior of SR cover, as the fine-grained mine tailings the site are retained by dykes as high as 10 m. Due to the slope inclination, water can accumulate above the tilt interface during extreme precipitation events, which could create a breakthrough of the capillary barrier; at this location, (called the dip down limit, DDL) the cover is no longer effective to control water infiltration into the mine wastes. Therefore, the main objective of this study is to evaluate the effect of slope on SR cover built directly on the abandoned Kettara mine site. More specifically, the project objectives are to: 1) characterize the phosphate mine wastes and Kettra's coarse wastes; 2) build an inclined experimental SR cover test cell in the field; 3) Instrument and monitor the experimental inclined cell under natural climatic conditions and under two important precipitation events (artificial) for the region climate ; 4) Determine the storage and the release capacity of the cover and the effective length of the capillary barrier (L_{eff}

or otherwise identify the position of point DDL) in situ during significant precipitation events; 5) Compare L_{eff} results obtained in the field, those obtained with analytical solutions and numerical modeling results in order to better understand the hydrogeological behavior of studied SR cover.

To reach our objectives, a characterization of the main physical, hydrogeological and geotechnical properties was performed on phosphate mine wastes and Kettara's coarse wastes. These characterization results have shown that the two materials have a sufficient contrast to create the desired capillary barrier effects at the interface between the two materials. An experimental SR cover with an inclination slope of 14.5° (8 m high and 10 m wide) was built on the mine site; The tested SR cover was made of phosphate mine wastes (0.8 m) placed over a capillary break layer (CBL) made of coarse-grained materials

Cover performance was monitored for a period of one year under actual conditions and two significant precipitation event using volumetric lysimeters, suction sensors, and volumetric water content sensors installed at four stations and at different strategic depths. Under natural climatic conditions and even during the first significant rainfall event, the inclined SR cover limited water percolation, almost all infiltration was diverted and released to the atmosphere by the physical process of evaporation. However under extreme conditions (155 mm/ 48, followed by natural rainfall event of 63 mm/ 24), the cover was not able to store the water and the percolation was seen in all the lysimeters. The collected leachate had a pH that range between 2 and 3.

Several numerical simulations were performed using the numerical code SEEP / W to reproduce and validate the hydrogeological behavior of SR cover significant rainfall events where applied. The results of numerical modeling showed that it was possible to reproduce realistically the hydrogeological behavior of the inclined SR cover. They also showed that during the simulation of the two important precipitation events in 48 hours, either 100 mm or 155 mm, the steady state was not reached. The value of L_{eff} was determined using three methods: field trials, analytical solutions and numerical modeling. L_{eff} results predicted by the numerical model, once the steady state reached, are similar to the results predicted by the analytical solution of Morel-Seytoux (1994). Before reaching the steady state, the simulation results were similar to those measured in the field. The results also show that for the case studied, the main wetting curve of water retention curve is the curve that better characterize the hydrological behavior of the inclined SR cover.

This study shows that the hydrogeological behavior of the SR cover is influenced by the slope effect and that there is a critical precipitation rate that must not be exceeded (≈ 100 mm in 48 hours) to control water infiltration in reactive tailings. The results also confirms the suitability of phosphate mine wastes for use as components of SR covers even in inclined conditions for Kettara mine site located near Marrakech, Morocco. The use of these waste mine materials, in addition of being effective to control AMD generation they can also reduce the cost of the rehabilitation.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ VI

ABSTRACT IX

TABLE DES MATIÈRES XII

LISTE DES TABLEAUX XVII

LISTE DES FIGURES XVIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXVII

LISTE DES ANNEXES XXXII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Formation du drainage minier acide 2

1.2 Principales méthodes de prévention et de contrôle du drainage minier 4

1.2.1 Climats nordiques 5

1.2.2 Climats humides 5

1.2.3 Climats semi-arides à arides 7

1.3 Contexte et objectif du projet de recherche 9

1.4 Contenu, contributions scientifiques et originalité du projet 10

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 13

2.1 Notions fondamentales 13

2.1.1 Écoulement de l'eau en milieu non saturé 13

2.1.2 Fonctions hydriques 16

2.2 Recouvrement de type «Store-and-Release» 23

2.2.1 Fonctionnement 23

2.2.2 Coût de construction, limites et avantages des recouvrements de type SR 26
2.3 Facteurs influençant la performance du recouvrement alternatif 27
2.3.1 Effet du climat 27
2.3.2 Effet de l'épaisseur et propriétés des matériaux 29
2.3.3 Effet de la végétation 30
2.4 Effet de géométrie 30
2.4.1 Limite de bas de pente et capacité de déviation 32
2.4.2 Solutions analytiques pour évaluer la capacité de déviation 34
2.5 Synthèse de travaux sur des recouvrements alternatifs appliqués dans le contexte minier en climat semi-aride à aride 36
2.5.1 Système de recouvrements SR horizontaux (1D) 37
2.5.2 Systèmes de recouvrement SR inclinés (2D) 39
2.6 Besoins en recherche sur l'effet de pente sur le comportement hydrogéologique des recouvrements (SR) 42
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE, DE LA CONCEPTION ET DE LA CONSTRUCTION DE LA CELLULE EXPÉRIMENTALE 44
3.1 Description du site minier Kettara 44
3.1.1 Situation géographique 44
3.1.2 Cadre géologique et historique de la mine Kettara 45
3.1.3 Études antérieures sur les recouvrements stockage-relargage (SR) sur la mine Kettara 47
3.2 Caractérisation des matériaux 52
3.2.1 Matériaux 52
3.2.2 Méthodes et résultats de caractérisation 53
3.3 Localisation de la cellule expérimentale inclinée 61

3.4 Conception de la cellule 63
3.4.1 Étape 1 : Nivellement de la pente 64
3.4.2 Étape 2 : Installation des lysimètres 64
3.4.3 Étape 3 : Mise en place de la couche calcaire phosphatée 65
3.4.4 Étape 4 : Emplacement des drains 67
3.5 Instrumentation et suivi 68
3.5.1 Teneur en eau volumique 69
3.5.2 Succion matricielle 70
3.5.3 Suivi des conditions météorologiques 73
3.6 Contrôle qualité durant la construction 74
3.6.1 Rejets grossiers de Kettara 75
3.6.2 Rejets calcaires phosphatés 76
3.7 Application des conditions extrêmes 78
3.7.1 Premier événement de précipitation (100 mm) 79
3.7.2 Deuxième événement de précipitation (155 mm) 80
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : HYDROGEOLOGICAL BEHAVIOUR OF AN INCLINED STORE-AND-RELEASE COVER EXPERIMENTAL CELL MADE WITH PHOSPHATE MINE WASTES 83
4.1 Abstract 83
4.2 Résumé 84
4.3 Introduction 85
4.4 Description of the field tests 87
4.4.1 Site Description 87
4.4.2 Design and construction of the inclined experimental cell 88
4.4.3 Experimental cell instrumentation and monitoring 90

4.5 Materials Properties 94
4.6 Results 97
4.6.1 Climatic conditions 97
4.6.2 Hydrogeological behaviour under natural climatic conditions 99
4.6.3 Hydrological behaviour after the second artificial rainfall event 104
4.7 Discussion 108
4.7.1 Influence of the slope on the store-and-release capacity 108
4.7.2 Determination of diversion length and the Downdip limit (DDL) 113
4.8 Conclusions and recommendations 116
4.9 Acknowledgements 118
4.10 References 118
CHAPITRE 5 DISCUSSION 128
5.1 Méthodes numériques pour simuler l'écoulement de l'eau non saturé en milieu poreux 128
5.2 Fonctions hydriques des matériaux simulés 130
5.3 Résultats de la modélisation numérique 134
5.3.1 Évènement de mouillage de 100 mm 134
5.3.2 Évènement de mouillage de 155 mm 140
5.4 L'influence de la courbe de rétention d'eau sur les modélisations numériques 145
5.5 Comparaison de la longueur effective de la barrière capillaire calculée de manière numérique, analytique et estimé sur le terrain 148
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 151
6.1 Conclusion 151
6.2 Recommandations 154
BIBLIOGRAPHIE 156

ANNEXES 178

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Équations mathématiques des modèles descriptifs les plus utilisées pour décrire la CRE 19

Tableau 2.2 : Équations mathématiques des modèles utilisés pour estimer de la fonction de perméabilité 21

Tableau 2.3 : Avantages et limites des recouvrements SR en climat semi-aride et aride (adapté de Bossé, 2014) 27

Tableau 2.4 : Quelques exemples des principaux sites miniers qui ont utilisé les recouvrements store-release (SR) en climats semi-arides à aride (adapté de Bossé. 2014) 38

Tableau 2.5 : Propriétés des matériaux utilisés dans le recouvrement du site Goldstrike (Zhan et al. 2014) 40

Tableau 3.1 : Paramètres caractéristiques des distributions granulométriques. 55

Tableau 3.2 : Densités relatives des matériaux utilisés 55

Tableau 3.3 : Valeurs de k_{sat} obtenues par approche expérimentale et méthodes prédictives 59

Tableau 3.4 : Paramètres des courbes de rétention d'eau (Bossé, 2014) 61

Tableau 3.5 : Caractéristiques des sondes EC-5 utilisées 70

Tableau 3.6 : Caractéristiques des instruments de mesure de succion utilisés (MPS-2/ Jetfill/ bloc Watermark) 73

Tableau 3.7 **:** Paramètres granulométriques des rejets grossiers de Kettara 75

Tableau 3.8 : Paramètres granulométriques des rejets calcaires phosphatés 77

Tableau 4.1 : Hydrogeotechnical properties of the two SR cover materials 95

Tableau 4.2 : Monthly water balance for the inclined experimental SR cover at Kettara mine site 111

Tableau 4.3 **:** Mathematical expressions of Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morel-Seytoux (1994) analytical solutions 115

Tableau 4.4 **:** Main hydraulic properties of the simulated inclined SR cover: measured and calculated effective length (L_{eff}) with the Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morel-Seytoux analytical solutions.....116

Tableau 5.1 : Principaux paramètres hydrogéologiques des matériaux utilisés dans la modélisation numérique.....130

Tableau 5.2 : Détails des paramètres du modèle numérique.....134

Tableau 5.3 : Principaux paramètres utilisés pour le calcul des solutions analytiques visant à évaluer la (L_{eff}) de la couverture SR inclinée simulée 150

Tableau 5.4 : Comparaison entre les valeurs de L estimées par les solution analytiques, les modélisations numériques à l'équilibre et celles mesurées sur le terrain 150

Tableau A.1 : Calcul du volume des rejets calcaires phosphatés.....185

Tableau A.2 : Instrumentation selon le plan A et B.....187

Tableau A.3 : Bilan économique : Plan A :.....190

Tableau A.4 : Bilan économique : Plan B.....191

Tableau E.1: Essais de contrôle qualité.....208

Tableau E.2 : Contrôle qualité avant l'évènement de mouillage de 155 mm (octobre 2014).....209

Tableau E.3 : Résultats de teneur en eau à la profondeur 10, 50, 75, 85 cm pour la Station.....210

Tableau E.4 : Résultats de teneur en eau à la profondeur 10, 50, 75, 85 cm pour la Station 4....211

Tableau E.5 : Teneur en eau (W%) à la profondeur 75 cm pour les stations 1, 2 et 4.....211

Tableau F.1 : Mesure des débits dans les gouteurs du système d'irrigation 215

Tableau F.2 : Résultats du pH des eaux de percolation 215

Tableau I.1 : Constantes de la régression linéaire a (pente) et b (ordonnée à l'origine), R^2, EQM, ESM et t-statistique des formules de Hargreaves et Samani (calibrée et originale) par rapport au standard de Penman-Monteith (pour le site de Kettara). 226

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Problématique du DMA sur le site minier de Kettara (Maroc) photo prise en 2014.....2

Figure 2.1: Écoulement d'eau à travers un élément de sol (d'après Hillel, 1988) 14

Figure 2.2 : Courbe de rétention d'eau d'un sable et d'un silt (Aubertin et al. 2015) 17

Figure 2.3 : Courbe de rétention d'eau (adapté de Fredlund et al. 2012).....18

Figure 2.4 : Fonctions de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al. 2015) 20

Figure 2.5 : Systèmes de recouvrement pour le contrôle du DMA par réduction des infiltrations d'eau (Adapté de Bossé, 2014) 24

Figure 2.6 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique d'une couverture Store-and-release (1D) avec effet de barrière capillaire.....25

Figure 2.7 : Comportement hydrogéologique de deux recouvrements SR d'épaisseur de 100 (a) et 50 (b) cm (Bossé, 2014). 29

Figure 2.8 : Recouvrement SR inclinée avec les différentes composantes du bilan hydrique.....32

Figure 2.9 : Représentation schématique de l'écoulement d'eau à travers une couverture inclinée et rupture du bris capillaire au point DDL représenté par le point rouge (adapté de Bussière, 1999).....33

Figure 2.10 : Simulation d'un essai d'irrigation/infiltration sur la mine Goldstrike (Zhan et al. 2014) 41

Figure 2.11: Représentation schématique du système de monitoring (Zhan et al. 2014) 42

Figure 3.1 : Localisation du site minier Kettara (adapté de Bossé et al. 2013).....45

Figure 3.2 : Rejets à granulométrie grossière posés de manière à retenir les résidus fins 47

Figure 3.3 : Colonnes instrumentées 48

Figure 3.4 : Profil de teneur en eau volumique : (a) simulation d'un événement extrême de 100 mm; (b) simulation d'un événement extrême de 155 mm (Bossé et al. 2013) 49

Figure 3.5 : a) Schéma d'une cellule 1D de 100 cm de rejets calcaire (Bossé, 2014), b) Photo des 4 Cellules expérimentales 1D.....51

Figure 3.6 : Photos des rejets calcaires phosphatés (a et b) et des rejets grossiers de Kettara (c et d).....52

Figure 3.7 : Courbe granulométrique des deux composantes du recouvrement SR (rejets calcaires phosphatés et le bris capillaire) 54

Figure 3.8 : Courbes densité sèche-teneur en eau (a) et porosité –teneur en eau (b) (Bossé, 2014) 56

Figure 3.9 **:** CRE obtenues par mesures expérimentales en cellule de Tempe, par mesures directes de terrain et CRE obtenues par Bossé (2014) 60

Figure 3.10 : Courbe de rétention d'eau (Bossé, 2014) 60

Figure 3.11 : Emplacement choisi pour la construction de la cellule expérimentale inclinée sur le site minier Kettara (Bossé, 2014).....62

Figure 3.12 : Configuration schématique 3D de la cellule inclinée 63

Figure 3.13 : Nivellement de la digue 64

Figure 3.14 : Mise en place des lysimètres (a), collecte des eaux de percolation (b, c et d),.....65

Figure 3.15 **:** Mise en place et compactage de la couche calcaire phosphatée (a et b) mise en place des rejets calcaires phosphatés (c) compactage manuel des rejets calcaires phosphatés (d) vue de la cellule inclinée après la mise en place de la couche de rejets phosphatés.....66

Figure 3.16 : Événement de pluie lors de la mise en place de la couche SR 67

Figure 3.17 : Installation d'un drain de surface (a) et de la géomembrane pour récupérer les eaux s'écoulant à l'interface entre la couche de bris capillaire et la couche de rétention d'eau (b) 68

Figure 3.18 **:** Stations de mesures 2, 3 et 4 de la cellule inclinée (la station 1 est sur la partie plane en haut de la pente).....69

Figure 3.19 : Instrumentation utilisée dans la cellule inclinée; a) Tensiomètre Jetfill et système d'acquisition Em 50; b) bloc Watermark; c) sonde EC 5; d) capteur MPS-2 72

Figure 3.20 : Station météorologique installée au site Kettara 74

Figure 3.21 : Courbes granulométriques typiques des rejets grossiers de Kettara (bris capillaire) 76

Figure 3.22 : Courbes granulométriques des rejets calcaires phosphatés 77

Figure 3.23 **:** Essais de contrôle qualité : a) et b) mesure de la porosité in situ; c) mesure de l'angle de la pente à l'aide d'une station totale 78

Figure 3.24 : Échelle de temps pour les simulations des conditions extrêmes 79

Figure 3.25 **:** Mise en place du système d'irrigation pour simuler 100 mm 81

Figure 3.26 : Mise en place du système d'irrigation pour simuler 155 mm 82

Figure 4.1 : 3D schematic representation of the inclined SR field experimental cell and corresponding instrumentation sensors 89

Figure 4.2 : Photos illustrating the inclined SR field experimental cell construction steps.....91

Figure 4.3: Photos illustrating the instrumentation used to monitor the inclined SR experimental cell (a) matric suction sensor (MPS-2) (b) volumetric water content sensors (EC5) (c) Matric suction sensor (Watermark) (d) JetFill tensiometer (e) surface runoff collector (f) later drainage collectors.....94

Figure 4.4: Measured and fitted water retention curves (WRCs) of fine- and coarse-grained material placed in the experimental cell; MDC is the main drying curve and MWC is the main wetting curve 96

Figure 4.5 : Average daily air temperatures (a), potential evapotranspiration (b), and rainfall (c) from April 2014 to April 2015 in the study area 98

Figure 4.6 : Time trends for volumetric water content at depths of 10, 50, 75 and 85 cm for the 4 stations in the inclined experimental SR cover from April 2014 to November 2014 101

Figure 4.7 : Measured matric suction at depths (a) 10 cm with MPS-2 (only values < 500 kPa are presented due to sensors precision), (b) 75 cm with Jetfill tensiometers and (c) 75 cm with Watermark sensors after the first wetting event 103

Figure 4.8 : Time trends for volumetric water content at depths of 10 cm, 50 cm, 75 cm and 85 cm for the inclined experimental SR during the second artificial rainfall event reinforced by another natural rainfall event, from November 2014 to the end of March 2015 106

Figure 4.9 : Measured matric suction at depths of (a) 10 cm with MPS-2 ((only values < 500 kPa are presented due to sensors precision), (b) 75 cm with Jetfill tensiometers and (c) 75 cm with Watermark sensors after the second artificial rainfall event reinforced by another natural rainfall event.....107

Figure 4.10 : Daily water balance for Station 3 109

Figure 4.11 : Cumulative release rate of net infiltration evolution after the significant artificial rainfall event simulation (155mm/48).....112

Figure 5.1 **:** Courbes de rétention d'eau des matériaux utilisés dans les modélisations numériques 131

Figure 5.2 : Fonctions de perméabilité des matériaux utilisés dans les modélisations numériques 131

Figure 5.3 : Maillages et conditions frontières utilisés pour la modélisation numérique et emplacements des stations de mesures.....133

Figure 5.4 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 2 136

Figure 5.5 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 3 137

Figure 5.6 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 4 138

Figure 5.7 : Pressions à l'interface durant l'évènement de mouillage de 100 mm.....139

Figure 5.8 : Fonction de précipitations appliquée comme condition frontière durant le régime transitoire.....140

Figure 5.9 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 2 142

Figure 5.10 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 3 143

Figure 5.11 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 4 144

Figure 5.12 : Pressions à l'interface durant l'évènement de mouillage de 155 mm 145

Figure 5.13 **:** Profils de teneur en eau en utilisant (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC) 147

Figure 5.14 : Profils de succion matricielle avec (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC) 147

Figure 5.15 : Pressions à l'interface obtenue avec (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC) 148

Figure A.1 : Zone d'étude expérimentale avec une largeur de 10m et une hauteur de 11m (Bossé et al. 2014). 179

Figure A.2 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale 180

Figure A.3 : Exemple d'installation du matériel de mesure dans un système incliné (Zhan et al.2007) 181

Figure A.4 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale inclinée avec 7 stations de mesures 182

Figure A.5 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale inclinée avec 4 stations de mesure 183

Figure A.6 : Aplanissement de la pente de 45° à 14° 184

Figure A.7 : Schéma d'un lysimètre 188

Figure A.8 : Exemples de drain 188

Figure A.9` : Exemple d'un système d'irrigation (Zhan et al., 2001) 189

Figure A.10 : Simulation d'événements extrêmes pour le système incliné 190

Figure A.11 : Schéma des phases de construction du projet 192

Figure A.12 : Schéma de la cellule inclinée avec système d'irrigation 195

Figure A.13 : Matériel de mesures .....

Figure B.1 : Différents rejets de la mine Kettra 197

Figure B.2: Carte satellite de la mine Kettara 198

Figure B.3 : Rejets grossiers mis en tas 198

Figure B.4 : Rejets fins entourés par la digue 199

Figure C.1 : Zone d'étude 200

Figure C.2 : Travaux d'aplanissement de la pente (a, b, c, d, e) 202

Figure C.3 : Transport des rejets calcaires phosphatés (a et b) 203

Figure C.4 : Mise en place de la couche calcaire 204

Figure C.5: Drain sous forme de géomembrane relié à un tuyau 205

Figure D.1 : Courbes de calibration des sondes EC-5 pour les rejets grossiers et les rejets calcaires phosphatés de Kettara 207

Figure E.1 : Essais de granulométrie 209

Figure E.2 : Résultats de teneur en eau de 0 à 10 cm de profondeur pour la station 2 et 4 210

Figure F.1 : Construction du bassin d'eau pour l'irrigation 212

Figure F.2 : Mise en place du système d'irrigation 213

Figure F.3 : Démarrage des travaux d'irrigation 214

Figure F.4 : Eau de percolation des lysimètres 215

Figure G.1 : Bilan hydrique pour les 4 stations : 1 (a), 2 (b), 3 (c), and 4 (d). 216

Figure G.2 : Évolution de la teneur en eau volumétrique à 10, 50, 75 et 85 cm de profondeur pour les 4 stations de la couverture SR expérimentale inclinée durant l'évènement de mouillage de 155mm.....217

Figure G.3 : Bilan hydrique des 4 stations de mesures (station 1, 2, 3 et 4) d'avril 2014 à avril 2015. 219

Figure G.4: Évolution de la teneur en eau volumétrique à 10, 50, 75 et 85 cm de profondeur pour les 4 stations de la couverture SR expérimentale inclinée d'Avril 2014 à Avril ici 2015 ...220

Figure H.1 : Les différentes étapes de la conception d'une couverture store-and-release inclinée 222

Figure J.1 : Systèmes de recouvrement conventionnel (a) et les recouvrements alternatifs type store-and-release (b) pour le contrôle du DMA 228

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

α	-	Paramètre de van Genuchten
a	-	Constante (pente de régression linéaire)
AEV	-	Valeur d'entrée de l'air (air entry value)
ASTM	-	American society for testing and materials
b	-	Constante (ordonnée à l'origine de régression linéaire)
BC	-	Bris capillaire
CEBC	*CCBE*	Couverture avec effets de barrière capillaire
C_c		Coefficient de courbure
CRDI	*IDRC*	Centre de recherches pour le développement international
CRE	*WRC*	Courbe de rétention d'eau
C_u		Coefficient d'uniformité
ΔS	-	Variation d'eau stockée
DNC	-	Drainage neutre contaminé
DRA	*ARD*	Drainage rocheux acide (ou drainage minier acide *DMA/AMD*)
DRX	*XRD*	Diffractométrie de rayons X
D_x		Diamètre des particules à *x* % de passant
E	-	Évaporation réelle
e	-	Indice des vides
e.g.	-	Exempli gratia
e_a	-	Pression de vapeur effective de l'air
ECH_2O	-	Sonde de teneurs en eau DECAGON (*EC-5, EC-TM, 5TM*)
Eh	-	Potentiel d'oxydoréduction
EP	*PE*	Évaporation potentielle

EPA		Environmental protection agency (USA)
e_s	-	Pression de vapeur saturante de l'air
ETP	*PET*	Évapotranspiration potentielle
F_s	-	Facteur de sécurité
GCB	-	Geosynthetic clay liner (ou *GCL*)
G_s	-	Gravité spécifique ou densité relative (D_r)
G_{sc}	-	Constante solaire
H	-	Hauteur
h	-	Charge hydraulique
HYDRUS	-	Code numérique (*HYDRUS-1D*)
θ	-	Teneur en eau volumique
θ^d	-	Teneur en eau volumique de la *MDC*
θ_e	-	Teneur en eau volumique effective
θ_r	-	Teneur en eau volumique résiduelle
θ_s	-	Teneur en eau volumique à saturation
θ^w	-	Teneur en eau volumique de la *MWC*
ICARD	-	International conference on acid rock drainage
ICP-AES	-	Spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif
		Id est
i.e.	-	International network for acid prevention
INAP		Irrigation
Irr	-	Conductivité hydraulique saturée
k_{sat}	-	Conductivité hydraulique ou fonction de perméabilité - $k(\psi)$
k_u	-	Paramètre de connectivité entre les pores ou longueur

l	-	Laboratoire de chimie des matériaux et de l'environnement
LCME	-	Longueur efficace de la barrière cappilare
L_{eff}	-	Longueur de déviation
L_d	-	Paramètre de van Genuchten, valeur mesurée ou masse
m	-	Masse
M	-	Maximum
max	-	Courbe de rétention d'eau en drainage
MDC	-	Masse humide
M_h	-	Minimum
min		Modèle modifié de Kovács
MK	-	Capteur de pression DECAGON (*MPS-2*)
MPS	-	Masse sèche
M_s	-	Masse d'eau
M_w	-	Courbe de rétention d'eau principale en mouillage
MWC	-	Porosité ou paramètre de van Genuchten
n	-	Paramètre de van Genuchten de la *MDC*
n^d	-	Paramètre de van Genuchten de la MWC
n^w	-	Office chérifien des phosphates
OCP	-	Précipitations ou pression atmosphérique
P	-	Moyenne des précipitations maximales annuelles
p	-	Potentiel hydrogène
pH	-	Indice de plasticité
PI	-	Précipitation maximale probable
PMP	-	Percolation (infiltration profonde)

P_r		Masse volumique
ρ	-	Masse volumique de l'air
ρ_a	-	Masse volumique de l'eau
ρ_w	-	Débit hydraulique
Q	-	Débit spécifique
q	-	Constante universelle des gaz parfaits
R		Coefficient de détermination
R^2	-	Ruissellement
R_0	-	Rayonnement extra-terrestre
R_a	-	Résistance aérodynamique
r_a		Réflectométrie dans le domaine fréquentiel
RDF	-	Réflectométrie dans le domaine temporel
RDT	-	Rayonnement net de surface
R_n	-	Quantité d'eau stockée ou surface
S	-	Store-and-release
SR	-	Store-divert-and release
SDR	-	Code numérique (SEEP/W GÉOSLOPE)
SEEP	-	Température moyenne de l'air (ou T_a) ou période de retour
T	-	Temps
t	-	Vitesse des vents
U	-	Code numérique (*UNSAT-H*)
UNSAT	-	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
UQAT	-	Unified soil classification system
USCS	-	Volume

V	-	Volume total
V_t	-	Volume d'eau
V_w	-	Limite de liquidité
w_l	-	Teneur en eau à l'optimum Proctor
w_{opt}	-	Limite de plasticité
w_p	-	Valeur d'entrée de l'eau (water entry value)
WEV	-	World meteorological organization
WMO	-	Coordonnée cartésienne
x	-	Coordonnée cartésienne
y	-	Altitude ou coordonnée cartésienne
z	-	Latitude
φ		Masse volumique de l'eau
φ_w	-	Densité sèche maximale à l'optimum Proctor
Υ_{dmax}		Succion matricielle (ou pression capillaire)
ψ	-	Pression à laquelle le matériau commence à se drainer
ψ_a	-	Pression à laquelle l'eau commence à entrer
ψ_w	-	Masse molaire de la vapeur d'eau
ω_w		Unidimensionnel – Bidimensionnel
1D - 2D	-	

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Conception d'une cellule expérimentale inclinée stockage-relargage de terrain sur le site minier abandonné de Kettara-Maroc 178

Annexe B – Rejets de la mine Kettara 197

Annexe C – Photos complémentaires de la Construction de la Cellule expérimentale 200

Annexe D – Courbes de calibration de sondes (EC-5).....206

Annexe E – contrôle qualité 208

Annexe F – Simulations des évènements de précipitations 212

Annexe G – Résultats du bilan hydrique et de la teneur en eau volumique.....216

Annexe H – Étape de construction d'une cellule expérimentale inclinée.....221

Annexe I – Comparaison des méthodes d'estimation directe/indirecte du rayonnement net et calibration de la formule d'évapotranspiration potentielle de Hargreaves et Samani (1985) 223

Annexe J – schéma des systèmes de recouvrements hydrogéologiques pour le contrôle du DMA en climat aride 228

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'industrie minière est l'un des secteurs économiques les plus importants pour beaucoup de pays à travers le monde. Après la révolution industrielle, la demande en ressources minérales non renouvelables n'a cessé de croître proportionnellement à l'augmentation de la population mondiale et au développement des sciences et des technologies (St-Amant 2014). Durant ces dernières années, la découverte de nouveaux gisements, l'application de nouveaux procédés de traitement et de nouvelles techniques d'exploitation ainsi que l'intensification des rythmes de production ont permis à l'industrie minière d'être encore plus productive. Or, si le développement minier est considéré par certains comme positif sur le plan des retombées socio-économiques, il est reconnu que ce dernier cause également des impacts environnementaux négatifs (Ripley et al. 1996, Aubertin et al. 2002, 2015). Pour réduire ces impacts, depuis quelques dizaines d'années maintenant, la majorité des pays industrialisés encadre l'industrie minière avec des règles environnementales de plus en plus strictes. Entre autres, ces règles exigent aux entreprises de prévoir des travaux de restauration des sites miniers afin de minimiser et contrôler les risques environnementaux et de santé publique à la fin de la vie de la mine.

L'extraction du sol de métaux précieux et de métaux de base se fait généralement de deux manières: par des exploitations à ciel ouvert ou par des mines souterraines. Dans les deux cas, l'exploitation et le traitement des minerais mènent à la production de grandes quantités de rejets miniers solides constitués de roches stériles et de rejets de concentrateurs, appelés ici résidus miniers (on retrouve également le terme rejets de concentrateur dans la littérature). Ces résidus miniers sont constitués de particules de roche finement broyées dans le but d'en extraire la portion ayant une valeur commerciale. Ils sont habituellement déposés sous forme de pulpe (30% à 45% de solide) dans des aires d'entreposage prévues à cet effet, nommées parcs à résidus (Aubertin et al. 2002, Martin et al. 2005, Bussière et al. 2007). Les menaces environnementales associées à ces ouvrages sont principalement liées à leurs instabilités chimiques (génération de drainage minier contaminé) et physiques (rupture des digues de retenue) sur le court et le long terme (Bussière et al. 2005, Bussière 2007, Aubertin et al. 2015). Dans le cadre de cette étude, l'emphase sera mise sur le contrôle de l'instabilité chimique causant le plus de problèmes : la génération du drainage minier acide (DMA).

1.1 Formation du drainage minier acide

Le drainage minier acide (DMA), aussi appelé parfois drainage rocheux acide, est l'un des problèmes environnementaux les plus importants auxquels doit faire face l'industrie minière moderne (Aubertin et al. 2002, Bussière 2007). Ce dernier résulte de l'oxydation naturelle des minéraux sulfurés (pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, arsénopyrite, etc.), exposés aux infiltrations de l'eau et à la circulation de l'air (Kleinmann et al. 1981, Lapakko 1994, Nicholson and Scharer 1994, Perkins et al. 1995, Belzile et al. 2004, Edraki et al. 2005). Les effluents miniers contaminés par le DMA (dont une image typique est présentée à la figure 1-1) sont caractérisés par un pH parfois très bas, une forte acidité et des concentrations élevées en sulfates solubles et en métaux dissous (Kleinmann et al. 1981, Jambor 1994, Nordstrom 2000, Aubertin et al. 2002).

Figure 1.1: Problématique du DMA sur le site minier de Kettara (Maroc) photo prise en 2014

Les réactions globales à la base du DMA peuvent être présentées de façon simplifiée à l'aide des équations présentées ci-dessous (la pyrite, un minéral sulfuré, est prise ici à titre d'exemple) (Kleinman et al. 1981; Aubertin et al. 2002b). La réaction d'oxydation directe de la pyrite par l'oxygène et l'eau est présentée à l'équation (1.1). Les équations (1.2) à (1.4) décrivent le comportement du fer. Le Fe^{2+} s'oxyde en Fe^{3+} qui à son tour précipite en hydroxyde de fer à pH

supérieur typiquement à 4,5. Lorsque le pH descend sous 4,5, il peut y avoir oxydation indirecte de la pyrite par le fer ferrique (agent oxydant).

L'oxydation directe:

$$2FeS_2 + 7\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+ \quad 1.1$$

L'oxydation indirecte:

$$2Fe^{2+} + 1/2O_2 + 2H+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O \quad 1.2$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad 1.3$$

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15\ Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16\ H^+ \quad 1.4$$

Réaction globale:

$$FeS_2 + 15/4\ O_2 + 7/2\ H_20 \rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4 \quad 1.5$$

Il est important de noter que divers facteurs influencent la réactivité des sulfures : la température, la formation de minéraux secondaires sur les surfaces (passivation des surfaces), la taille des particules, leur structure cristalline, la surface exposée, le pH de l'eau qui percole à travers les rejets ainsi que la disponibilité de l'oxygène (biotique ou abiotique). En effet, l'oxygène est l'élément déclencheur dans plusieurs situations et le paramètre clé du contrôle de l'oxydation des sulfures (Jambor 1994, Nordstrom and Alpers 1999, Aubertin et al. 2002).

L'oxydation des minéraux sulfurés peut être catalysée par les bactéries (Blowes et al. 2003). On retrouve de nombreuses bactéries sur les sites miniers, tant neutrophiles qu'acidophiles. Principalement, trois types de bactéries interviennent directement dans la formation du drainage minier acide (Plante, 2012) : Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans et Leptospirillum ferrooxidans. Il est à noter que l'action des bactéries est plus marquée à un pH égal ou inférieur à 3 (Kwong 1993, Nicholson and Scharer 1994). Dans la littérature, on mentionne une accélération de la réaction par un facteur de 10^3 à 10^6 (Singer and Stumm 1970, Nordstrom 2000).

La production du DMA peut ne pas avoir lieu si le pouvoir alcalin de la roche est suffisamment élevé pour neutraliser l'acidité générée par l'oxydation des sulfures (Robertson et Kirsten, 1989). Les minéraux carbonatés comme la calcite ($CaCO_3$) et la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) sont les principaux neutralisants de l'acide et ils ont le pouvoir de réagir à court terme pour neutraliser

l'acidité produite (Kwong 1993, Skousen et al. 1997, Blowes et al. 2003, Bouzahzah et al. 2015). Les silicates, quant à eux, ont une réactivité moindre mais peuvent contribuer à neutraliser l'acide à long terme (Lawrence and Scheske 1997, Paktunc 1999). Il est important de mentionner que d'autres réactions (autres que l'oxydation et la neutralisation; e.g précipitation des minéraux secondaires) peuvent se produire lors de la formation du DMA et peuvent modifier la qualité des eaux de percolations (modifications de la concentration de certains éléments), voire même affecter certaines propriétés hydrogéologiques des résidus miniers (par exemple une baisse de la porosité) (Aubertin et al. 2002a).

Les parcs à résidus miniers, en particulier lorsqu'ils sont générateurs de DMA, nécessitent de prendre des mesures qui limiteront les impacts sur l'environnement. Il est essentiel de pouvoir caractériser et surveiller ces sites pour connaître les risques potentiels de pollution et mettre en œuvre des solutions appropriées afin d'assurer leur restauration. Une des façons pour atteindre cet objectif consiste à contrôler la production du drainage minier acide par la prévention. On entend par prévention les mesures qui visent à réduire ou inhiber les réactions d'oxydation des sulfures à la source. Les méthodes visant à prévenir la production du drainage minier contaminé ont pour objectif d'éliminer, ou de réduire à des niveaux très faibles, la disponibilité de l'oxygène atmosphérique, d'eau ou des sulfures. Comme ce sont les trois composantes principales des réactions d'oxydation qui causent le drainage minier acide (voir les équations 1.1 à 1.5), en éliminant un ou plusieurs de ces composantes, on peut réduire la production de contaminants à des niveaux très faibles.

1.2 Principales méthodes de prévention et de contrôle du drainage minier

Pour contrer la génération de DMA, des méthodes de contrôle peuvent être appliquées pour limiter l'apport d'un, ou de plusieurs, des trois composants associés aux réactions d'oxydation (eau, oxygène et sulfure). Les méthodes de contrôle du DMA sont habituellement adaptées aux conditions climatiques des régions où se trouvent les sites miniers à restaurer.

1.2.1 Climats nordiques

Le contrôle du drainage minier acide en climat nordique peut être basé sur le maintien des résidus miniers à basse température à l'aide de recouvrements isolants. Cette méthode vise à intégrer les résidus miniers dans le pergélisol afin de les maintenir dans un état constamment gelé (typiquement < -5°C). Le pergélisol étant défini comme un sol dont la température est égale ou inférieure à 0°C pour deux années consécutives (Rykaart and Hockley 2009). Étant donné qu'à faible température, les cinétiques de réactions géochimiques et biochimiques du DMA sont presque nulles et la migration des polluants est limitée (l'eau est majoritairement gelée), cela permet de contrôler les risques de contamination. Plus d'informations sur la restauration des sites miniers en climat nordique peuvent être trouvées dans Coulombe (2012) et MEND (2012).

1.2.2 Climats humides

En climat humide, la réduction de l'apport en oxygène vers les rejets sulfurés est considérée comme la méthode la plus efficace pour contrer la génération d'acide (Bussière 1999, Dagenais et al. 2005). Pour contrôler cet apport en oxygène, on peut mettre en place un recouvrement ayant une perméabilité au gaz faible afin de limiter son transport jusqu'aux résidus miniers réactifs. L'eau, les sols, les matériaux géosynthétiques et des combinaisons de ces différents matériaux peuvent former une ou plusieurs composantes des recouvrements peu perméables au gaz. On peut également utiliser des recouvrements qui consomment l'oxygène et qui, par leur consommation, limitent l'oxygène disponible pour l'oxydation des rejets miniers générateurs de DMA. Les matériaux organiques (résidus forestiers, résidus provenant d'usines de pâtes et papiers, tourbe et compost, etc.) sont souvent utilisés comme composantes des recouvrements à consommation d'oxygène. Comme ce type de recouvrement est relativement peu utilisé, il ne sera pas discuté davantage dans ce document. Il arrive parfois que, malgré les volumes d'eau importants provenant des précipitations, la méthode de restauration retenue vise à contrôler les infiltrations d'eau dans l'aire d'entreposage des rejets miniers. Ce type d'approche s'apparente à ce qui est fait dans les aires d'entreposage de déchets domestiques et dangereux.

On présente brièvement dans ce qui suit les principales techniques qui peuvent être utilisées pour contrôler la migration de l'oxygène et de l'eau en climat humide, à savoir : le recouvrement en eau,

le recouvrement monocouche avec nappe surélevée, les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC) et les recouvrements imperméables.

1.2.2.1 Recouvrement en eau

La technique de recouvrement en eau consiste à ennoyer les résidus miniers. Une couverture d'eau est maintenue suffisamment épaisse (valeur minimale habituellement de 1m) au-dessus des résidus à l'aide d'infrastructures étanches. Le concept des recouvrements aqueux repose sur le fait que le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau est d'environ 10 000 fois plus faible que celui dans l'air. L'ajout d'une couche de sable sur les résidus est recommandé pour limiter le transfert des métaux, particulièrement lorsqu'il y a possibilité de remise en suspension des résidus miniers en raison de l'action des courants et des vagues. Pour plus d'informations sur cette technique, le lecteur peut consulter la thèse d'Awoh (2012).

1.2.2.2 Recouvrement en eau - nappe surélevée

La technique de la nappe phréatique surélevée (NPS), considérée comme un cas particulier des recouvrements en eau, utilise le même principe que ces derniers. Elle vise à maintenir les résidus dans un état proche de la saturation par capillarité, ce qui va inhiber la réaction d'oxydation des sulfures. Son efficacité est basée sur le faible taux de diffusion de l'oxygène sous des conditions de saturation ou proche de la saturation (Ouangrawa 2007, Demers 2008). L'efficacité de la technique NPS dépend de nombreux facteurs, notamment les propriétés de rétention capillaire des résidus (qui est fonction de la taille des pores et leur distribution), les conditions climatiques, le bilan hydrogéologique du bassin de retenue, ainsi que la minéralogie des résidus. Le lecteur intéressé peut consulter (Ouangrawa et al. 2005, Ouangrawa et al. 2006) pour plus d'informations.

1.2.2.3 Couverture à effet de barrière capillaire (CEBC)

La couverture à effets de barrière capillaire (CEBC) est constituée de plusieurs couches de matériaux ayant chacune leur rôle spécifique (Aubertin 1995). Les CEBC peuvent, en se servant des effets de barrière capillaires, réduire l'apport en oxygène aux résidus sous-jacents par le maintien d'un degré de saturation élevé dans une des couches de matériaux qui constituent le recouvrement (couche de rétention d'eau) (Aachib 1997, Bussière 1999). Les effets de barrière capillaire sont créés lors de la superposition de matériaux de propriétés granulométriques différentes en condition non saturée. Ce principe sera détaillé dans le chapitre 2.

1.2.2.4 Recouvrements imperméables

Ce type de recouvrement fait intervenir des matériaux avec une faible conductivité hydraulique saturée k_{sat} (généralement $\leq 10^{-9}$m/s) comme l'argile compactée (Benson et al. 2001), les géomembranes ou les géocomposites bentonitiques (GCB) (qui peuvent remplacer la couche d'argile au sein de ces recouvrements hydrogéologiques multicouches). Les recouvrements imperméables sont souvent utilisés en climat humide pour la restauration d'aires d'entreposage de déchets domestiques. Ils sont aussi utilisés dans le domaine minier où le matériau à faible perméabilité est mis entre les résidus miniers réactifs et une couche superficielle qui favorise le développement de végétation (Wilson et al. 1997). Cette configuration est également connue sous l'appellation anglaise « Subtitle 'D' cover » (Dwyer 2003, EPA 2011). Dans la majorité des cas, ces systèmes de recouvrement pour les déchets domestiques disposent d'une double protection contre les infiltrations d'eau: une couche d'argile compactée (ou de GBC) ainsi qu'une géomembrane. Malheureusement, cette approche de double protection n'est habituellement pas appliquée dans le secteur minier (comme le site Poirier et Normétal (Maurice 2002, 2012) et une partie du site Aldermac (Cyr et al. 2011)) où l'on utilise une seule géomembrane.

Dans le domaine des sites d'enfouissement, il existe d'autres configurations de recouvrements conventionnels connues sous l'appellation anglaise « Subtitle 'C' cover » (Dwyer 2003; EPA 2011), où une première couche peut être ajoutée entre les résidus réactifs et la couche à faible perméabilité afin d'empêcher les remontées capillaires d'eau contaminée et/ou limiter les interactions. Une deuxième couche intermédiaire, ou un géocomposite drainant avec une forte conductivité hydraulique, peut également être mise entre la couche à faible perméabilité (protégée par une géomembrane) et la couche superficielle du recouvrement (Aubertin et al. 1997, Woyshner et al. 1997). Cette couche vise à favoriser l'écoulement latéral des infiltrations d'eau vers l'extérieur du système tout en limitant l'assèchement de la couche à faible perméabilité.

1.2.3 Climats semi-arides à arides

Dans les régions dotées d'un climat semi-aride et aride, où les précipitations annuelles sont faibles et le taux d'évaporation élevé, il est difficile de conserver une couche saturée en permanence pour empêcher la diffusion de l'oxygène vers les résidus miniers sous-jacents. Dans ces conditions, le drainage minier est habituellement contrôlé en réduisant l'infiltration des eaux météoriques vers les résidus miniers. Les systèmes de recouvrement hydrogéologique similaires à ceux présentés pour

les climats humides (recouvrements imperméables) peuvent être une option. Cependant, une autre approche est de plus en plus utilisée pour contrôler les infiltrations d'eau dans les aires d'entreposage des déchets soit les recouvrements alternatifs. Dans la littérature, ces systèmes alternatifs sont connus sous les appellations suivantes : couvertures évapotranspirantes (ET), *« store-and-release covers* » (SRC) (Benson et al. 2004, Scanlon et al. 2005, Fayer and Gee 2006) ou encore « *water balance covers »* (Fayer et al. 1992, Khire et al. 1995, Morris and Stormont 1997, Stormont and Morris 2000, Benson et al. 2001, Gee et al. 2006, Zhan et al. 2006, EPA 2012, Zhan et al. 2013). L'appellation de «store-and-release» ou «stockage-relargage» (SR) sera utilisée dans le document.

Les couvertures SR stockent l'eau, dans la couche fine, durant les périodes humides et la libèrent à l'atmosphère par évaporation ou évapotranspiration durant les périodes sèches. Il existe deux catégories de recouvrements SR : les couvertures monolithiques (constitué d'une seule couche de matériau fin) et les recouvrements SR qui comprennent un bris capillaire (matériau fin placé sur un matériau grossier). Les recouvrements SR peuvent être mis en place sur des surfaces inclinées. Dans ce cas, l'eau peut être déviée à l'interface entre le matériau grossier et le matériau fin (Aubertin et al. 2009). En climat aride à semi-aride, ce phénomène s'ajoute à celui de l'évaporation pour contrôler les infiltrations d'eau. Cependant, des travaux antérieurs de laboratoire et de terrain ont montré que l'inclinaison du système de recouvrement peut, dans certaines conditions, affecter sa capacité à contrôler la percolation. En effet, quand le recouvrement est incliné, l'eau d'infiltration a tendance à s'accumuler à l'interface des deux matériaux, ce qui augmente le degré de saturation du matériau constituant le recouvrement. Lorsque le matériau atteint une saturation pratiquement complète, les effets de barrière capillaire se dissipent et le recouvrement n'est plus en mesure de limiter la percolation. La localisation de ce point de rupture des effets de barrière capillaire appelé la limite de bas de pente (ou Down Dip Limit : DDL) correspond à l'endroit où la pression atteint la valeur d'entrée d'eau du matériau grossier (WEV-succion à laquelle l'eau commence à entrer) (Ross 1990, Steenhuis et al. 1991). La distance entre la partie la plus haute de la pente et le point DDL correspond à la longueur de déviation (L_d). Les recouvrements store-and-release sont spécialement conçus pour les climats secs. Toutefois, des études récentes ont montré qu'ils peuvent être construits pour contrôler l'infiltration d'eau dans d'autres types de climats (Kelln et al. 2008, Rahardjo et al. 2012).

L'évaluation de la performance d'un recouvrement SR en conditions inclinée est importante. C'est pourquoi le présent projet vise à déterminer l'influence de la pente sur les recouvrements SR. Ces recouvrements SR inclinés, étant le principal sujet du mémoire, seront décrits plus en détail dans le chapitre 2.

1.3 Contexte et objectif du projet de recherche

Tel que mentionné dans les sections précédentes, les recouvrements alternatifs de type « *store-and-release* (SR) » sont utilisés de plus en plus en climat semi-aride à aride pour contrôler la génération du DMA (Benson et al. 2001; Zhan et al. 2006, 2014, Aubertin et al. 2009; Bossé et al. 2015). Cependant, à la connaissance de l'auteur, la plupart des études menées sur l'efficacité des recouvrements SR n'ont pas investigué sur le terrain l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique de ce type de recouvrement, autant pour sa capacité de stockage, de déviation que de relargage. Le présent projet vise donc à mieux comprendre et à évaluer l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique des recouvrements SR. Ce projet se démarque par le fait qu'il est basé sur de la modélisation physique sur le terrain à l'échelle intermédiaire sur un site minier générateur de DMA au Maroc (le site Kettara) et aussi par le matériau de recouvrement étudié qui est non pas un sol, mais un rejet minier non problématique d'un point de vue environnemental provenant d'une mine de phosphate située près du site Kettara. En plus d'étudier le comportement du recouvrement en conditions naturelles, deux événements de précipitation importants pour la région du site Kettara ont été appliqués sur le dessus du recouvrement. Les objectifs spécifiques de l'étude sont les suivants :

- Caractériser les rejets calcaires phosphatés utilisés comme matériaux de recouvrement afin de mieux comprendre leur comportement hydrogéologique du système étudié;
- Construire sur le terrain un recouvrement SR incliné directement sur les rejets grossiers réactifs du site Kettara (site abandonné) catégorisé comme un site générateur d'un DMA important;
- Instrumenter la couverture SR et faire le suivi de le teneur en eau volumique, de la succion matricielle (à différentes profondeurs dans le recouvrement et à différents endroits le long de la pente), de la percolation dans des lysimètres et du ruissellement sous les conditions naturelles et lors d'importants évènements de précipitation;

- Évaluer la limite de bas de pente (ou DownDip limit ou DDL) et la longueur de déviation (L_d) *in situ*;
- Comparer les résultats obtenus sur le terrain pour la longueur de déviation (L_d) avec les solutions analytiques et les résultats de modélisation afin de mieux comprendre la capacité de déviation de l'eau du recouvrement SR étudié lors d'événements de précipitation importants.

1.4 Contenu, contributions scientifiques et originalité du projet

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été effectués afin d'atteindre les objectifs spécifiques cités précédemment. Après une première contextualisation de la problématique dans le présent chapitre, le chapitre 2 présentera une revue de littérature en lien avec le projet. Dans un premier temps, les principales équations qui gouvernent l'écoulement de l'eau en milieu non-saturé sont décrites, suivi d'une présentation des propriétés hydrogéologiques des matériaux saturés et non saturés. Une description du fonctionnement des recouvrements SR et des facteurs influençant leurs performances suit. Une attention particulière est accordée à l'effet de la géométrie sur l'efficacité de ces recouvrements. Ensuite, un résumé des études antérieures 1D et 2D sur les recouvrements SR dans un contexte minier en climats semi-aride et aride est présenté.

Le chapitre 3 présente une description du site d'étude, le site Kettara, et un résumé des études antérieures effectuées sur ce même site. Les principales méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des matériaux constituant le recouvrement SR et les résultats de caractérisation sont ensuite décrits. On poursuit ce chapitre avec une description de la cellule expérimentale de terrain, des différentes étapes de construction de la cellule, de l'instrumentation et des paramètres mesurés pour le suivi de son comportement hydrogéologique.

Le chapitre 4 qui constitue le cœur du mémoire contient les principaux résultats du suivi environnemental de la cellule expérimentale inclinée installée directement sur le site de la mine Kettara. Les évolutions des principaux paramètres (teneur en eau volumique et succion) sont comparées pour les quatre stations de mesures installées dans la cellule expérimentale inclinée (avant et après les évènements d'importantes précipitations de 100 et 155 mm). Le comportement hydrogéologique de la cellule a été évalué sous des conditions climatiques naturelles et extrêmes pendant presqu'un an (355 jours). Ce chapitre met l'accent sur les principaux facteurs affectant la capacité de déviation et de libération d'eau de la couverture SR ainsi que la localisation du point

de bas de pente (DDL). Les résultats de terrain quant à la longueur de déviation (L_d) du recouvrement et des solutions analytiques visant à prédire L_d sont comparés.

Le chapitre 5 quant à lui présente des résultats complémentaires de modélisations numériques. Le comportement hydrogéologique du recouvrement SR testé au site Kettara est reproduit avec le code numérique SEEP/W lors de l'application d'événements de précipitations importants. L'influence de l'utilisation de la courbe en mouillage et en drainage sur les résultats de modélisation est également présentée. Les longueurs de déviation estimées avec les résultats de terrain, les solutions analytiques et la modélisation numérique sont ensuite comparées et discutées. Enfin, le mémoire se termine par le chapitre 6 qui présente les principales conclusions et recommandations de ce travail.

Il est important de noter que ce mémoire constitue une composante d'une étude plus vaste entreprise en 2012 sur la restauration de la mine abandonnée de Kettara (Bossé, 2014). Cette mine, localisée au Maroc sous un climat aride, est génératrice d'un important DMA avec des impacts environnementaux négatifs sur la localité, la faune et la flore adjacentes (Hakkou et al. 2008a, b). L'utilisation de rejets calcaires phosphatés pour le contrôle du drainage minier acide par réduction des infiltrations d'eau est l'une des particularités de ce travail. Non seulement ils sont disponibles en grande quantité, inertes et non valorisée, mais ils ont également l'avantage d'être situés à proximité dudit site minier. Plusieurs essais de terrains, en 1D et à des échelles différentes, ont récemment confirmé la potentialité des rejets calcaires phosphatés à être l'une des composantes d'un tel recouvrement (Bossé et al. 2015, Bossé 2014). Cependant, pour valider le concept de restauration par un recouvrement SR au site Kettara, il était essentiel de se pencher sur la performance du recouvrement en conditions inclinées puisqu'une partie du site est constituée de digues qui peuvent atteindre plus d'une dizaine de mètre de haut.

L'évaluation de l'effet de pente sur le comportement des couvertures SR est un exercice assez complexe et très peu étudié, notamment sur le site minier Kettara. Dans le but de mieux cerner la problématique et d'étudier l'efficacité du recouvrement SR incliné à long terme, il est important d'étudier son comportement hydrogéologique sous des conditions climatiques naturelles et sous des conditions d'évènements de précipitations importants pour la région. À la connaissance de l'auteur, l'évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement SR incliné dans une cellule expérimentale de terrain soumise à des évènements de précipitations importants, n'a jamais

été réalisée. On retrouve dans la littérature certains travaux en cellule 1D ou encore sur des portions de sites existants (Zhan et al. 2001,2014; Bossé, 2014; Bossé et al. 2015). De façon plus générale, l'étude apporte des informations supplémentaires concernant la longueur de déviation de barrières capillaires inclinées des recouvrements SR et la capacité de libération du matériau utilisé dans le recouvrement lorsque ce dernier est incliné. Même si le projet est appliqué à un cas réel, les connaissances développées pourront être utilisées dans d'autres cas de recouvrements SR inclinés situés en climats semi-aride à aride.

Les principales contributions scientifiques de ce mémoire ont été présentées dans un article de conférence publié à la conférence internationale sur le drainage minier acide (ICARD) (révisé par les pairs) et un article de revue soumis à la Revue canadienne de la géotechnique (le chapitre 4 du présent mémoire). Les références complètes des articles publiés et soumis sont les suivantes :

Knidiri, J., Bussière, B.**,** Hakkou, R., Benzaazoua, M., Parent, É., Maqsoud, A., (2015) : Design, Construction and Preliminary Results for an Inclined Store-and-Release Cover Experimental Cell Built on an Abandoned Mine Site in Morocco. – Proc. the 10th International Conference on Acid Rock Drainage, IMWA 2015. Santiago, Chile (GECAMIN).

Knidiri, J., Bussière, B., Hakkou, R., Bossé, B., Maqsoud, A., Benzaazoua, M., (2015). Hydrogeological Behaviour Of An Inclined Store-And-Release Cover Experimental Cell Made With Phosphate Mine Waste. Soumis à la Revue canadienne de la géotechnique (Octobre 2015).

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Une brève revue de littérature sur le DMA et les différentes méthodes de contrôle a été présentée au Chapitre 1. Puisque le présent projet vise à évaluer l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique des recouvrements SR en climat semi-aride à aride, les lois qui régissent le fonctionnement des couvertures SR sont d'abord présentées dans ce chapitre. Ensuite, les facteurs influençant la performance de ce type de recouvrement sont identifiés, en mettant l'accent sur les effets de la géométrie de la couverture. Quelques cas réels où les couvertures SR ont été appliquées, en climat semi-aride à aride, sont ensuite décrits. Enfin, suite à cette revue de littérature, les principaux besoins en recherche pour mieux comprendre l'effet de la pente sur ce type de recouvrement sont identifiés.

2.1 Notions fondamentales

2.1.1 Écoulement de l'eau en milieu non saturé

L'écoulement de l'eau dans la zone située au-dessus de la nappe phréatique, appelée zone vadose, correspond à un écoulement où l'eau est en condition de pression négative (ou succion). La loi de Darcy, utilisée initialement pour l'écoulement de l'eau en milieu poreux saturé, et l'équation de continuité ont été utilisées pour définir l'équation permettant de décrire l'écoulement de l'eau dans les milieux non saturés (Buckingham 1904, Richards 1931, Childs and Collis-George 1950); cette équation est appelée équation de Richards (1931). Plus d'informations sur la loi de Richards sont présentées dans ce qui suit (voir aussi Hillel 1980, Fredlund and Rahardjo 1993).

2.1.1.1 Équation de continuité

La description d'un écoulement non saturé en régime transitoire peut se faire à partir d'un volume élémentaire de sol ou d'un élément fixe. L'équation de continuité traduit alors le principe de conservation de la masse d'un écoulement au sein d'un volume connu. Cette équation est généralement définie à partir d'un bilan de masse sur un volume élémentaire dxdydz (parallélépipède rectangulaire) défini dans un repère cartésien x,y,z, tel que montré à la figure 2 - 1. Les côtés du volume élémentaire sont Δx, Δy et Δz; le volume est donc de $\Delta x.\Delta y.\Delta z$. L'équation de continuité peut être déduite à partir de la démonstration suivante (Hillel, 1980a) : si

l'on considère seulement le débit spécifique ou unitaire q dans la direction x, la différence entre le débit qui entre et celui qui sort de l'élément peut être défini comme suit:

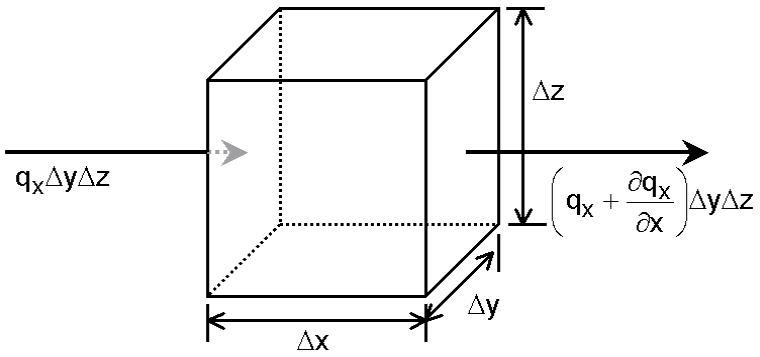


Figure 2.1: Écoulement d'eau à travers un élément de sol (d'après Hillel, 1988)

La différence entre le débit qui entre et celui qui sort est appelée recharge quand elle est positive et décharge quand elle est négative. Cette différence doit être égale au taux de gain ou de perte d'eau dans le volume élémentaire par unité et elle est définie par l'équation 2.2

$$\Delta q_x = q_x \Delta y \Delta z - \left[q_x + (\partial q_x / \partial x)\Delta x\right]\Delta y \Delta z \qquad 2.1$$

$$\Delta q_x = -(\frac{\partial q_x}{\partial x})\Delta x \Delta y \Delta z \qquad 2.2$$

La variation du débit spécifique correspond à la variation de la teneur en eau volumique θ (volume d'eau/volume total) en fonction du temps, multipliée par le volume Δx Δy Δz.

$$\Delta q_x = (\frac{\partial \theta}{\partial t})\Delta x \Delta y \Delta z \qquad 2.3$$

En égalisant les deux équations (2.2 et 2.3), on obtient l'équation de continuité pour le cas présenté à la figure 2-1:

$$-(\partial q_x / \partial x) = (\frac{\partial \theta}{\partial t}) \qquad 2.4$$

Où q_x représente le débit spécifique suivant l'axe x.

2.1.1.2 Loi de Darcy :

La loi de Darcy a été définie originellement pour le cas d'un écoulement laminaire et isotherme au sein d'un matériau poreux saturé. Elle permet le calcul du débit spécifique pour un milieu saturé (Hillel, 1980a):

$$q_x = k_{sat} \frac{\partial h}{\partial x} \qquad 2.5$$

Où : h est la charge hydraulique et k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée.

2.1.1.3 Équation de l'écoulement d'eau en milieu non saturé

L'écoulement de l'eau en milieu poreux non saturé s'effectue dans des conditions de pression négative (ou succion) dans le milieu. La pellicule d'eau dans un milieu non saturé est soumise à la pression de l'air (u_a), qui est plus grande que la pression des pores de l'eau (u_w). La différence de pressions ($u_a - u_w$) est appelée la succion matricielle qui provient des effets de tension de surface qui apparaissent quand on met en contact deux fluides ou un fluide et un gaz (eau-air). Richards (1931) a étendu la loi de Darcy pour les milieux non saturés en ajoutant une relation dépendante entre la valeur de la conductivité hydraulique k et la succion ψ (i.e., k = k(ψ)). Le débit spécifique peut alors être calculé à partir de l'équation suivante :

$$q_x = -k_x(\psi)\frac{\partial h}{\partial x} \qquad 2.6$$

En combinant les équations (2.4) et (2.6), on obtient une équation qui définit l'écoulement de l'eau dans les sols non saturés, connue comme étant l'équation de Richards (1931) valide pour tous les types d'écoulement (permanent ou transitoire). Cette équation est utilisée dans les modèles numériques qui simulent l'écoulement de l'eau (Aubertin and Bussière 2001).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(-k_x(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x}\right)\right) \qquad 2.7$$

Dans un repère cartésien $\frac{\partial z}{\partial x}$ est égal à zéro. L'équation qui définit un écoulement non saturé en milieu poreux (1D) est la suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(-k_x(\psi)\left(\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)\right) \qquad 2.8$$

L'équation en (2D) devient comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial z}\right) + \frac{\partial k_z(\psi)}{\partial z} \qquad 2.9$$

En considérant que la charge peut s'écrire sous forme h = ψ+ z, on peut réécrire l'équation comme suit (Fredlund et Rahardjo, 1993) :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = C(h) + \frac{\partial h}{\partial t} \qquad 2.10$$

C(h) la capacité de stockage (ou d'emmagasinement) définie par dψ/dθ où θ est la teneur en eau volumique.

2.1.2 Fonctions hydriques

2.1.2.1 Courbe de rétention d'eau (CRE)

Pour prédire l'écoulement de l'eau dans un milieu non saturé, il est essentiel de connaître les propriétés des matériaux dans ces conditions de pressions négatives. Pour caractériser les propriétés hydriques d'un milieu poreux dans des conditions non saturées, on utilise la courbe de rétention d'eau (CRE) (figure 2-2), qui relie la teneur en eau volumique des matériaux (θ) et la succion matricielle ($\psi = u_a - u_w$). La CRE représente la capacité d'un matériau à stocker l'eau à des pressions négatives. Cette relation est spécifique à chaque type de matériau (ex silt/sable figure 2-2).

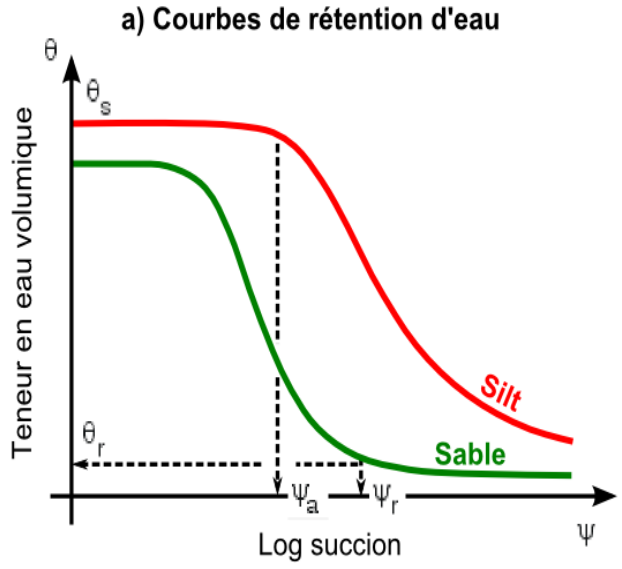


Figure 2.2 : Courbe de rétention d'eau d'un sable et d'un silt (Aubertin et al. 2015)

La courbe de rétention d'eau permet d'obtenir deux paramètres importants :

- **La pression d'entrée d'air (AEV ou ψ_a) :** Elle correspond à la pression nécessaire pour combattre la tension capillaire exercée dans les plus gros pores et provoquer le début de la désaturation (Aubertin et al. 1995) . Il y a plusieurs méthodes permettant d'évaluer la valeur de ψ_a. La plus utilisée est la méthode des tangentes (figure 2-3) qui permet d'obtenir ψ_a à partir de la courbe de rétention d'eau (Fredlund and Xing 1994). Elle peut être représentée par trois lignes étroites : horizontale pour la portion saturée de la courbe, inclinée pour la zone de transition et enfin sub-horizontale (de faible pente) pour la zone résiduelle (figure 2-3). La courbe de rétention d'eau peut changer en fonction de nombreux facteurs tels la granulométrie, la porosité et la minéralogie de la phase solide, la tortuosité du système des pores et le sens de l'écoulement (en mouillage ou en drainage) (Peregoedova 2012).

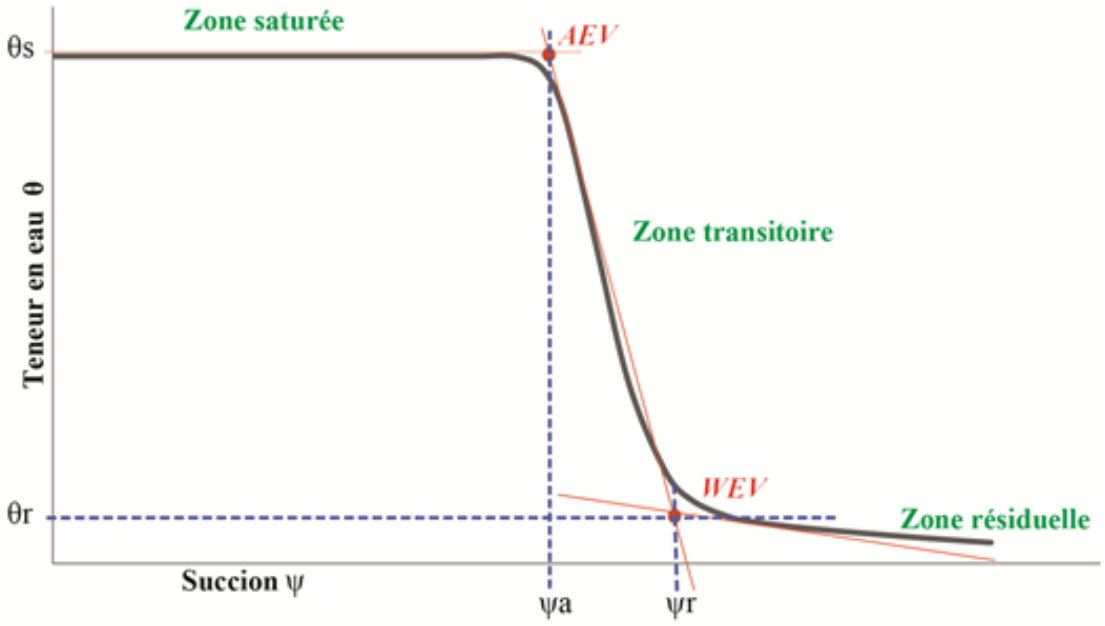


Figure 2.3 : Courbe de rétention d'eau (adapté de Fredlund et al. 2012)

Une autre méthode de détermination de ψ_a a été proposée par Aubertin et al. (1998). Cette méthode est basée sur l'hypothèse que ψ_a correspond à 90% de saturation des matériaux (ou la teneur en eau volumique égale à 0.9 θ_s. Une troisième méthode consiste à estimer ψ_a comme étant l'inverse du paramètre α obtenu en ajustant les points expérimentaux (θ- ψ) à partir du modèle van Genuchten (1980).

- **La pression résiduelle (ψ_r)** : Cette valeur de pression correspond à celle où la teneur en eau volumique du sol (θ) atteint sa valeur résiduelle (θ_r). Cette valeur peut aussi être obtenue par la méthode des tangentes (Fredlund and Xing 1994) (figure 2-3).

La capacité de rétention d'eau d'un matériau est plus grande lorsque les pores sont de petite taille et que la surface spécifique, qui augmente les forces d'adsorption des particules solides, est grande (Peregoedova 2012). Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'évaluer la CRE au laboratoire : on cite la cellule de pression ("Tempe Cell") (ASTM D 6836), la cellule triaxiale (ASTM D 5084), les essais en colonne (ASTM D 5856) (qui sont davantage utilisés pour les matériaux grossiers), ainsi que la plaque drainante, le papier filtre et les solutions salines. La description de certaines de ces méthodes peut être trouvée dans Fredlund and Rahardjo (1993), Ricard (1994), Dane and Topp (2002), Hernandez (2007),Tarantino et al. (2009), Peregoedova (2012) et Fredlund et al. (2012).

Les modèles mathématiques qui décrivent la CRE lissent les points [θ-ψ] obtenues sur le terrain ou en laboratoire. Les modèles descriptifs les plus utilisés sont ceux développés par, Van Genuchten (1980) et Fredlund and Xing (1994). On présente dans le tableau 2-1 les équations mathématiques de ces modèles descriptifs.

Tableau 2.1 : Équations mathématiques des modèles descriptifs les plus utilisées pour décrire la CRE

Modèle	Équations	Paramètres
Brooks et Corey (1964)	$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{\lambda_{BC}}$	$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{\lambda_{BC}}$ où : θ_e = teneur en eau effective ; θ = teneur en eau volumique ; θ_s = teneur en eau volumique à saturation ; θ_r = teneur en eau volumique résiduelle ; λ_{BC} = paramètre de lissage de courbe relié à l'agencement des pores ; ψ_a = pression d'entrée d'air ; ψ = pression de succion.
van Genuchten (1980)	$\theta_e = \left[\frac{1}{1+(\alpha_v \psi)^{n_v}}\right]^{m_v}$	où m_v, n_v=constantes d'ajustement du modèle. α_v = paramètre qui représente $(1/\psi_a)$ $[L^{-1}]$; et $(m_v = 1-1/n_v)$
Fredlund et Xing (1994)	$\theta = \left[\frac{c(\psi)(\theta_s - \theta_r)}{\left\{\ln\left[e+(\psi/a_f)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}\right] + \theta_r$ avec : $c(\psi) = \frac{\ln\left[1+(\psi/\psi_r)\right]}{\ln\left[1+(1000000/\psi_r)\right]}$	où : e = nombre népérien (2.71828) ; a_f = valeur approximative de ψ_a ; n_f et m_f = paramètres du modèle c (ψ) une fonction de correction

2.1.2.2 Fonction de perméabilité

La fonction de perméabilité k_u représente la variation de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau (ou de la succion matricielle) (Fredlund et Rahardjo, 1993). La désaturation d'un matériau engendre des discontinuités dans la trajectoire de l'eau interstitielle. Celles-ci sont accompagnées de la formation de ménisques mettant en jeu les forces de rétention capillaire (Musy and Soutter 1991). L'entrée d'air rend les chemins d'écoulement tortueux, ce qui augmente la résistance à l'écoulement d'eau en milieu non saturé. Ainsi la capacité du sol à conduire l'eau diminue lorsque la teneur en air augmente. Donc, en raison de leur capacité à se drainer rapidement, la conductivité hydraulique des matériaux grossiers (comme les sables et les graviers) diminue plus rapidement avec l'augmentation de la succion que celle des matériaux fins (e.g silt) comme schématisé dans la figure 2-4.

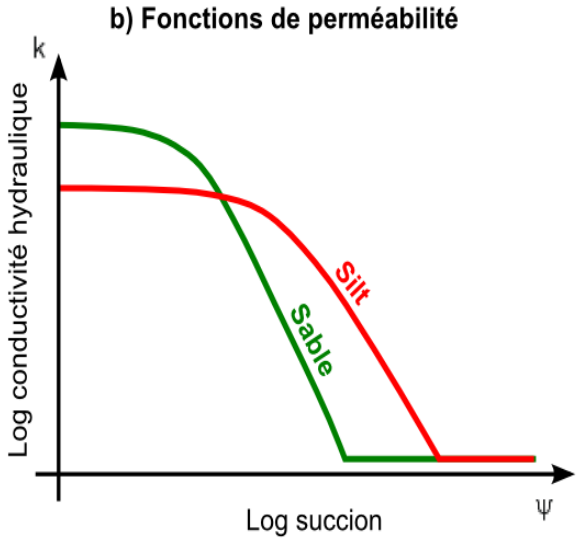


Figure 2.4 : Fonctions de perméabilité d'un sable et d'un silt (Aubertin et al. 2015)

Parce qu'il est assez difficile d'obtenir la courbe (k_u-ψ) en laboratoire, elle est habituellement déduite à partir de méthodes indirectes qui utilisent la courbe de rétention d'eau (Bussière 1999). Il existe dans la littérature plusieurs modèles qui permettent d'estimer la relation k(ψ) à partir de la fonction θ (ψ). Certains de ces modèles sont empiriques alors que d'autres sont d'origine statistique (Bussière, 1999). Parmi les modèles les plus connus, on présente au tableau 2-2 ceux de (Gardner 1958), de (Rijtema 1965), qui sont utilisées dans certaines solutions analytiques pour évaluer la capacité de déviation de barrières capillaires inclinées en raison de leur simplicité

mathématique (e.g. Ross 1990, Steenhuis et al. 1991, Stormont 1995), de Childs et Collis-George (1950) modifié par Kunze et al. (1968), de Burdine (1953), de Fredlund et al. (1994) et celui de (Mualem 1976). Plus de détails sur ces modèles et sur d'autres peuvent être trouvés dans Mualem (1986) et Fredlund et al. (1994).

Tableau 2.2 : Équations mathématiques des modèles utilisés pour estimer de la fonction de perméabilité

Modèle	Équation	Paramètres
Gardner (1958)	$k_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} = \exp(a_s \psi)$	k_{rel} : conductivité hydraulique relative; a_s : paramètre du sol (ou sorptive number); k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée; ψ_a: Pression d'entrée d'air; ψ_r: Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle.
Rijtema (1965)	$k = k_{sat} \quad \psi \leq \psi_a$ $k_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} = \exp[a_s(\psi + \psi_a)]$ $\psi_a \leq \psi \leq \psi_r$ $k = k_{\psi_r} \frac{\psi}{\psi_r} \quad \psi \geq \psi_r$	a_s : paramètre du sol (ou sorptive number); k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée; ψ_a: Pression d'entrée d'air; ψ_r: Succion pour atteindre la teneur en eau résiduelle.
Childs et Collis-George (1950)	$k_{rel} = \frac{k(\theta)}{k_{sat}} = \theta_e^l \frac{\int_0^{\theta_r} (\theta_e - \zeta)\psi^{-2}(\zeta)d\zeta}{\int_0^1 (1-\zeta)\psi^{-2}(\zeta)d\zeta}$	l : est un paramètre qui représente l'interconnectivité des pores ζ est une variable d'intégration
Burdine (1953)	$k_{rel} = \theta_e^l \left[1 - \left(\theta_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$	l est un paramètre qui représente l'interconnectivité des pores; m : paramètre de lissage de courbes (=1-2/n_v).
Mualem (1976)	$k(\theta) = k_{sat}\left\{1 - \left[1 - \theta_e^{(1/m)}\right]^m\right\}^2 \theta_e^{\eta}$	k_{sat} : la conductivité hydraulique saturée ; θ_e : teneur en eau effective ;
Fredlund et al. (1994)	$k_{rel} = \frac{\sum_{i-j}^{N} \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y}\theta'(e^y)}{\sum_{i-l}^{N} \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y}\theta'(e^y)}$	N est le nombre de sous-intervalle; i est la variable compteur; j est le numéro de l'intervalle; y est le point milieu du i^{eme}; θ' est la dérivée de θ_e

2.1.2.3 Effets de barrière capillaire

Parmi les divers types de systèmes de recouvrement pour limiter la génération du DMA en climat tempéré ou semi-aride à aride, certains utilisent les effets de barrière capillaire soit pour empêcher les infiltrations d'eau (en climat sec) ou contrôler la migration des gaz (en climat humide). Les effets de barrière capillaire apparaissent en milieu non saturé lorsqu'il y a superposition d'un matériau fin (tel un sol silteux) par-dessus un matériau grossier (tel un sable ou un gravier) (Morel-Seytoux 1992a, Bussière 1999). En raison du contraste de granulométrie des matériaux (matériau fin et grossier) et de la différence des propriétés hydrogéologiques non saturées (CRE et k_{sat}) entre les deux matériaux en contact (e.g. silt et sable à la figure 2-4), l'écoulement de l'eau de la couche fine vers la couche grossière tend à être faible et ce, autant en 1D qu'en 2D.

Les phénomènes d'effets de barrière capillaire, qui contrôlent l'écoulement d'un matériau à l'autre, peuvent s'expliquer à l'aide des fonctions hydriques des matériaux. Les relations teneurs en eau volumique (θ)-succion (ψ) et conductivité hydraulique non saturée (k_u)- succion (ψ) permettent de décrire les conditions d'écoulement en milieu non saturé. Sur la figure 2-4, on remarque que la valeur de k diminue progressivement à mesure que la succion augmente ou que la teneur en eau volumique est réduite. Lorsque par exemple un silt et un sable, qui sont deux matériaux de granulométrie différente, sont comparés, on constate que le sol fin est moins perméable que le sol grossier à l'état saturé ($\psi = 0$). En revanche, sous certaines conditions de succion, le matériau grossier peut devenir moins perméable que le matériau fin. Étant donné qu'il se draine facilement, la chute de la valeur de k est plus marquée dans le matériau grossier (e.g. le sable) que dans le matériau fin (e.g. le silt). Ainsi, si un sable drainé se retrouve sous un silt, l'eau contenue dans ce dernier n'aura pas tendance à s'écouler vers le bas puisque le sable drainé a une très faible conductivité hydraulique non saturée. Une description détaillée des effets de barrière capillaire peut être trouvée dans plusieurs publications (e.g. Nicholson et al. 1989, 1990; Akindunni et al. 1991; Morel-Seytoux, 1992; Aachib et al. 1993; Aubertin et al. 1993, 2002a; Bussière, 1999; Bussière et al. 2001, 2003b) .

2.2 Recouvrement de type «Store-and-Release»

2.2.1 Fonctionnement

Dans les climats semi-aride à aride, où le taux d'évaporation est élevé et les précipitations faibles, limiter les infiltrations d'eau est le moyen le plus efficace pour contrer la génération du DMA. Une option consiste à avoir recours aux couvertures conventionnelles avec une faible conductivité hydraulique saturée k_{sat} (généralement $\leq 10^{-9}$ m/s) comme l'argile compactée, les géomembranes ou les géocomposites bentonitiques (Albrecht and Benson 2001, Dwyer 2003; Albright et al. 2012). Cependant, il a été démontré que ces systèmes de recouvrement ont de la difficulté à maintenir leur performance à long terme (Albright et al. 2003 Benson and Khire 1995; Dwyer, 2001; Albrecht and Benson, 2001; Albright et al. 2004, 2010; Zornberg et McCartney, 2007; Stark et al. 2008; Ng et al. 2015; Aubertin et al. 2015).

Les systèmes de recouvrement alternatifs type stockage-relargage se présentent souvent comme étant l'option la plus appropriée (Benson et al. 2001, EPA 2003, Benson et al. 2005). Ces derniers, contrairement aux couvertures conventionnelles, ont la particularité d'utiliser un matériau avec des propriétés hydrogéologiques spécifiques, favorisant le stockage des eaux météoriques durant les saisons humides ainsi que leur libération durant les saisons sèches (Aubertin et al. 2015). Certains auteurs comme (Zornberg et al. 2003) comparent le recouvrement SR à une éponge qui stocke l'humidité durant les périodes pluvieuses et la libère dans l'atmosphère par évaporation durant les périodes sèches.

Il existe deux types de recouvrement alternatifs : le modèle de base (monolithique) et les systèmes avec bris capillaire (figure 2-5). Le type monolithique correspond à l'installation d'un matériau fin (du sable silteux au silt argileux) directement sur les résidus miniers réactifs (e.g. Durham et al. 1999, O'Kane et al. 2000, Dwyer 2003, Albright et al. 2004, Milczarek et al. 2009, Rock et al. 2012). Dans cette configuration, le matériau fin doit posséder une épaisseur suffisante pour contrôler la percolation profonde, une bonne capacité stockage-relargage des eaux météoriques ainsi que des propriétés satisfaisantes pour éviter la dessiccation et favoriser l'implantation d'une végétation durable et son développement racinaire.

Les systèmes avec bris capillaire quant à eux, impliquent l'ajout d'une couche grossière (un bris capillaire ou discontinuité hydraulique) sous la couche monolithique fine pour créer l'effet de

barrière capillaire (voir la partie 2.1.2.3). Cette couche grossière peut être constituée de graviers, sable, ou stérile minier avec une faible valeur d'entrée d'air (typiquement < 5 kPa). Le contraste de granulométrie des matériaux et la différence des propriétés hydrogéologiques non saturées entre les deux matériaux en contact tendent alors à limiter l'écoulement de l'eau de la couche fine vers la couche grossière (Zhan et al. 2014) Par conséquent, l'ajout du bris capillaire dans une couverture de type SR a deux objectifs : (1) améliorer la capacité stockage-libération des eaux météoriques pendant les saisons humides, (2) empêcher les percolations vers les rejets ainsi que les interactions directes entre l'eau contaminée et le recouvrement par remontée capillaire (Milczarek et al. 2011a). Par ailleurs, l'ajout d'un bris capillaire fournit un facteur de sécurité supplémentaire à la couverture (Scanlon et al. 2006) surtout durant les conditions extrêmes où des précipitations importantes peuvent survenir. Pour une même épaisseur, une couverture SR avec effet de barrière capillaire est donc considérée plus efficace que les couvertures SR monolithiques (Zornberg and McCartney 2006).

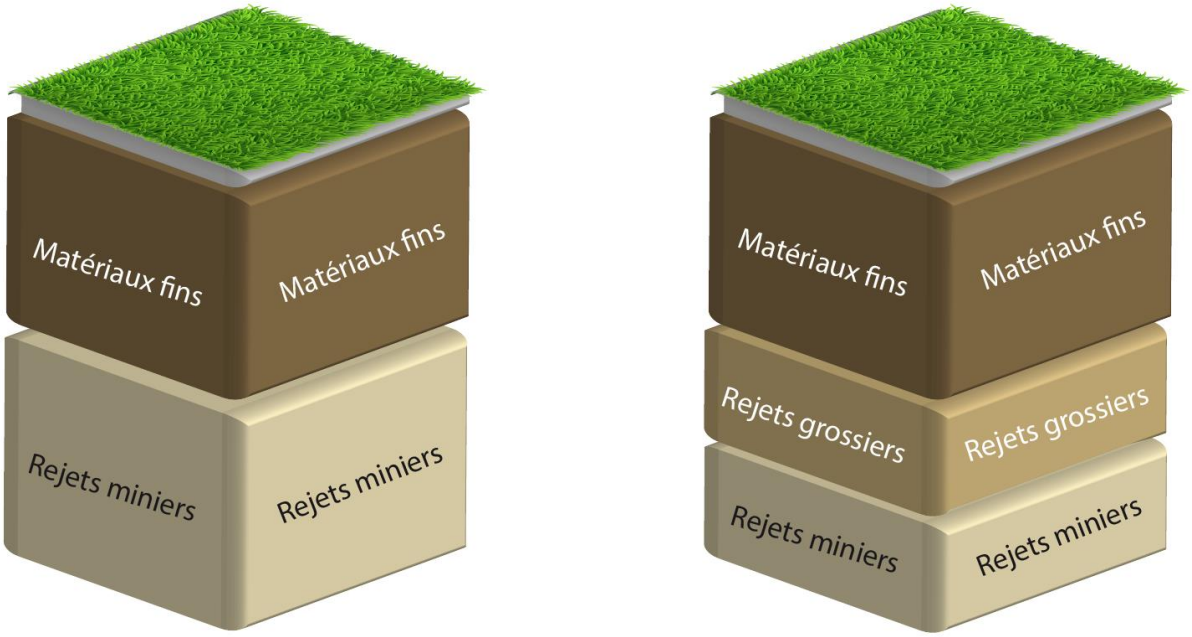


Figure 2.5 : Systèmes de recouvrement pour le contrôle du DMA par réduction des infiltrations d'eau (Adapté de Bossé, 2014)

Généralement, la performance d'un recouvrement SR est évaluée à partir de la méthode du bilan hydrique. Ce dernier comprend quatre principales composantes : les précipitations, le ruissellement, les infiltrations et l'évaporation (Musy and Soutter 1991). La formule simplifiée du bilan hydrique (figure 2-6) peut être écrite de la façon suivante (e.g. Benson et al. 2001, Scanlon et al. 2005).

$$\mathbf{E = P - R_0 - Pr - \Delta S} \qquad 2.11$$

où : E est l'évaporation, P est la précipitation, R_0 est le ruissellement, Pr est la percolation, ΔS: variation de la teneur en eau volumique (aussi appelée stockage) dans la couverture.

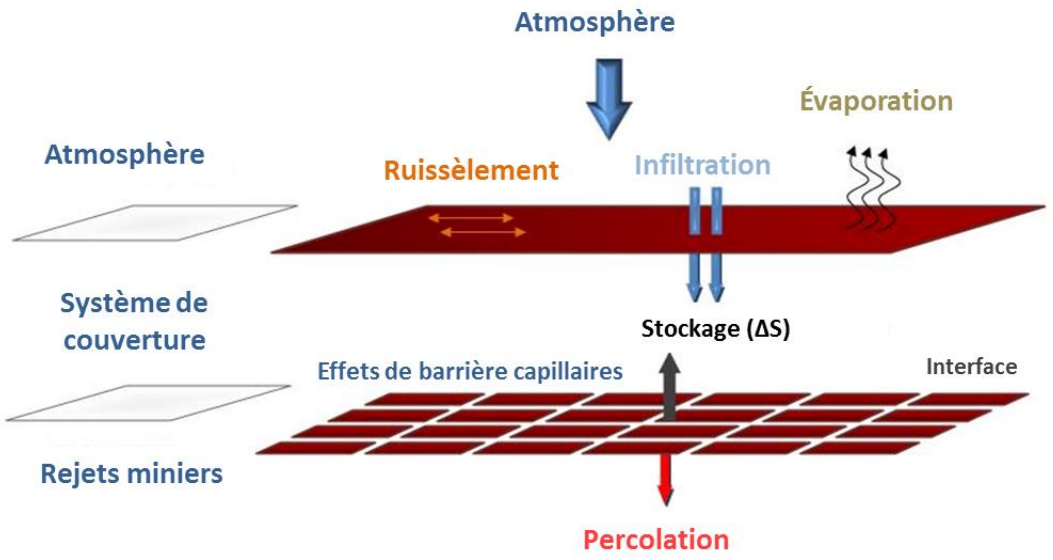


Figure 2.6 : Représentation schématique des composantes du bilan hydrique d'une couverture Store-and-release (1D) avec effet de barrière capillaire

L'évaporation réelle est habituellement calculée indirectement en soustrayant de la précipitation (P) le ruissellement (R_0), la percolation (Pr) et la variation de la teneur en eau (ΔS). La méthode du bilan hydrique est souvent utilisée lors de l'évaluation de la capacité stockage-relargage des couvertures SR. Plus de détails sur cette méthode peuvent être trouvés dans (Benson et al. 2001, Scanlon et al. 2001, Bossé 2014).

Il est à noter que, jusqu'à ce jour, les systèmes de recouvrement type SR ont principalement été étudiés ou appliqués au niveau d'aires d'entreposage de rejets municipaux (EPA 1997, Benson et al. 2004, Scanlon et al. 2005, Fayer and Gee 2006, Hauser 2008, Albright et al. 2010,

Apiwantragoon et al. 2015), industriels ou radioactifs (Waugh 2004, Waugh 2004, Qian et al. 2010). Peu de travaux ont évalué la performance de recouvrements SR dans un contexte minier; cet aspect sera discuté plus loin dans ce chapitre.

2.2.2 Coût de construction, limites et avantages des recouvrements de type SR

Dans des conditions semi-aride et aride, l'utilisation des systèmes conventionnels avec couches à faible conductivité hydraulique saturée a été essentiellement remplacée par les recouvrements de type SR (Albright, 2004). Cela principalement en raison des coûts élevés de construction des systèmes conventionnels, de la performance mitigée à long terme des matériaux géocomposites et de la complexité de leur construction (Dwyer et al. 2000, Dwyer 2001, Dwyer 2003, Wilson 2003, Hauser 2008). Cependant, les coûts de construction, que ce soit pour les systèmes de recouvrement conventionnels ou les recouvrements de type SR, sont fonction de la disponibilité et la localisation des matériaux intervenant dans les différentes composantes du système de recouvrement (Bussière et al. 1999; Gee et al. 2006).

La construction d'un recouvrement SR (avec ou sans bris capillaire) peut être faite avec plusieurs type de matériaux (ex : matériaux silteux peu plastiques), qui doivent être disponibles en quantité suffisante et avoir les propriétés hydrogéologiques (ex. k_{sat} et CRE) adéquates à court et long terme. En effet, les propriétés de certains matériaux fins peuvent parfois naturellement évoluer au cours du temps et affecter la performance des recouvrements à long terme (Benson et al. 2007). Les phénomènes pouvant affecter à long terme les propriétés des matériaux de recouvrement sont notamment les cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage et la présence des racines ou autres bio-intrusions. Cette évolution peut prendre la forme d'une augmentation de la conductivité hydraulique saturée (Milczarek et al. 2015) et/ou d'une modification de la courbe de rétention d'eau avec l'apparition de macropores (Dagenais et al. 2005). En résumé, les recouvrements SR lorsqu'ils sont utilisés dans des régions à climat semi-aride à aride, où les précipitations sont faibles et le taux d'évaporation élevé, représentent une option de restauration intéressante sur le plan économique et technique. Le tableau 2-3 ci-dessous présente les principaux avantages et limites des systèmes de recouvrement de type SR en climats semi-aride à aride (Rock et al. 2012, Bossé 2014).

Tableau 2.3 : Avantages et limites des recouvrements SR en climat semi-aride et aride (adapté de Bossé, 2014)

Avantages	Limitations
Installation facile	Climat peut limier la performance
Performance souvent supérieure aux couvertures conventionnelles	Design dépend des caractéristiques du site
Bon rapport coût/efficacité	Durabilité de la végétation
L'ajout de la végétation augmente l'efficacité	Nécessite des matériaux naturels et à proximité du site pour le bris capillaire
Stabilité à long terme	Changement des propriétés hydrauliques des matériaux avec le temps (processus physique, chimique et biologique)
Possibilité d'utiliser plusieurs types de matériaux naturels	Pas d'information à long terme

2.3 Facteurs influençant la performance du recouvrement alternatif

En raison de l'interaction du recouvrement SR avec les conditions climatiques et le milieu environnant, certains facteurs peuvent influencer la performance du recouvrement à contrer la percolation profonde et, par le fait même, la génération du DMA. Ces différents facteurs d'influence sont décrits plus en détail dans ce qui suit.

2.3.1 Effet du climat

Tel que mentionné précédemment, la performance d'un recouvrement SR dépend principalement des caractéristiques du site à restaurer, et plus particulièrement des conditions climatiques locales (quantité, distribution et forme des précipitations). Les conditions météorologiques critiques sont spécifiques à chaque site minier et jouent un rôle important dans la sélection des propriétés du sol, de l'épaisseur de la couverture et de l'inclinaison de la pente requise (Zornberg and McCartney, 2007). La percolation n'est pas seulement fonction du taux de précipitation annuelle, mais dépend aussi de leur distribution dans le temps et de leur intensité. Selon Khire et al. (2000), les conditions

les plus extrêmes ont lieu lors des saisons d'importantes précipitations, en d'autres termes lorsque ces dernières sont fréquentes et l'évapotranspiration est faible. Ces conditions vont favoriser une zone d'accumulation d'eau en profondeur dans la couche fine (couche de rétention d'eau) et suite à des évènements de pluies successives, il y aura un risque de rupture des effets de barrière capillaire à l'interface de la couche fine et grossière ce qui va favoriser la percolation (khire 1998, Khire et al. 1999, 2000) Les conditions climatiques peuvent également jouer un rôle sur le comportement physique d'un recouvrement SR (e.g., érosion, fissuration, dessiccation, etc.) (Rock et al. 2012).

Lors du design d'un recouvrement de type SR, plusieurs critères climatiques doivent être considérés tels que les hauteurs journalières des précipitations maximales possibles et probables. L'application de ces critères de design doit garantir un facteur de sécurité confortable sur la performance de l'ouvrage à long terme (Bossé, 2014). Généralement, il y a 3 approches employées pour évaluer la robustesse d'un système de recouvrement de type SR à long terme : (1) elle consiste à choisir l'année (sur les trois à cinq dernières années) où les précipitations sont les plus élevées, et d'appliquer ces conditions durant une période de 10 années successives (Benson et al. 1998, Boehm et al. 1998, Winkler 1999, Khire et al. 2000); (2) Une autre méthode utilisée consiste à simuler plusieurs évènements extrêmes rapprochés dans le temps (Zhan et al. 2001); (3) la troisième approche est la simulation d'une précipitation maximale probable (PMP), définie comme étant la hauteur théorique des précipitations maximales sur une durée déterminée, physiquement possible lors d'anomalies climatiques connues (Bossé, 2014). La PMP peut être estimée à partir d'une multitude d'approches physiques, statistiques ou probabilistes. Pour plus de détails sur ces méthodes, le lecteur intéressé peut consulter Bossé (2014).

En plus de la précipitation, le rayonnement solaire, les températures minimales et maximales, la vitesse du vent, l'humidité relative sont les autres paramètres souvent utilisés dans les modèles numériques pour calculer l'évapotranspiration potentielle et évaluer la performance à long terme (Zornberg et McCartney, 2007). En d'autres termes, les recouvrements SR avec ou sans barrières capillaires doivent être conçus pour des conditions météorologiques et hydrogéologiques spécifiques au site et doivent être en mesure de supporter des conditions météorologiques extrêmes (Khire et al. 2000).

2.3.2 Effet de l'épaisseur et propriétés des matériaux

Le choix de l'épaisseur de la couche fine doit être vérifié par des simulations numériques réalisées avec les conditions climatiques les plus extrêmes. L'augmentation de l'épaisseur de la couverture peut améliorer son efficacité (Junqueira et al. 2006). Toutefois, au-delà d'une certaine épaisseur, les gains deviennent minimes. Bossé (2014) a montré que, tel qu'attendu, plus l'épaisseur de la couche SR est importante plus les risques de percolation sont diminués. Toutefois, les recouvrements plus épais ont une capacité de libération plus faible puisque l'eau stockée en profondeur prend plus de temps à sortir par évaporation (voir figure 2-7).

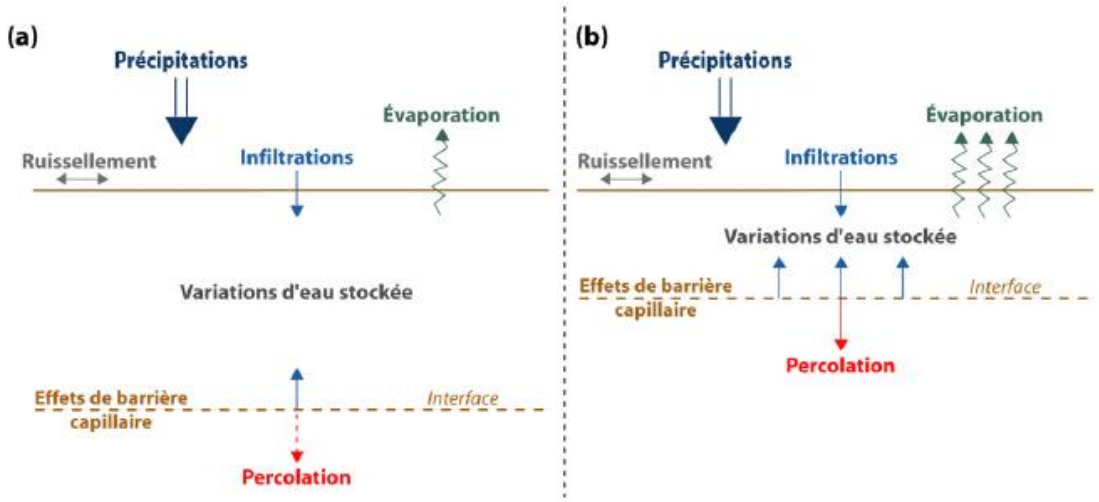


Figure 2.7 : Comportement hydrogéologique de deux recouvrements SR d'épaisseur de 100 (a) et 50 (b) cm (Bossé, 2014).

De plus, il est important de souligner que les propriétés hydrogéologiques (k_{sat} et CRE) du matériau peuvent influencer grandement le comportement des couvertures SR. En effet, le taux de libération de l'eau stockée vers l'atmosphère et la capacité de stockage est fonction des propriétés des matériaux qui constituent la couche SR (Morris and Stormont, 1999; Bossé, 2014). Le matériel idéal aurait une bonne rétention d'eau (pression d'entrée d'air ψ_a relativement élevée), une teneur en eau résiduelle rapidement atteinte et une conductivité hydraulique qui permet de retourner rapidement à l'atmosphère l'eau stockée (Morris et Stormont 1999; Zornberg and McCartney, 2007; Bossé et al. 2015). Pour éviter des modifications importantes des propriétés des matériaux dans le temps, il est recommandé d'utiliser des sols peu plastiques, résistant aux cycles climatiques et à l'érosion (Khire et al. 2000; Zornberg and McCartney 2007, Aubertin et al. 2015).

2.3.3 Effet de la végétation

De façon générale les systèmes de recouvrements SR sont conçus afin d'isoler les rejets miniers de l'environnement extérieur et empêcher l'infiltration de l'eau. Dans un climat semi-aride à aride, la végétation peut augmenter le processus d'évaporation des couvertures SR en amplifiant la transpiration. En effet, les racines agissent comme des petites pompes d'aspiration puisant l'eau du sol. Ce processus est influencé par le type de végétation (Liu et al. 2003), le stade végétatif, la résistance stomatique, le type de climat, la distribution et la densité des racines (Zornberg et McCartney, 2007; Zhan et al. 2014). Les plantes peuvent aussi diminuer l'érosion (Arnold et al. 2015); Arnold et al. 2014) et le ruissellement (Albright et al. 2010, Smesrud et al. 2012), stabiliser les pentes, favoriser la consolidation (en pompant l'eau) et peuvent même diminuer le taux d'oxygène dans le recouvrement. Scanlon et al. (2005) ont examiné la performance de deux couvertures SR dans un climat aride (Texas) et semi-aride (New Mexico) à l'aide de mesures sur le terrain (pendant 5 ans) et des modélisations numériques (jusqu'à 25 ans). Les auteurs ont conclu que la végétation est une composante importante qu'il faut prendre en considération lors du design des recouvrements SR afin de diminuer la percolation.

Cependant les plantes n'ont pas seulement des effets positifs sur les recouvrements. Elles peuvent notamment augmenter la conductivité hydraulique saturée à long terme et créer des macroporosités (DeJong et al. 2015, Larchevêque et al. 2015). C'est la raison pour laquelle il faut choisir le type de plante approprié, en tenant compte par exemple de la longueur des racines, qui convient le plus au site minier et au recouvrement utilisé (Khire et al. 2000).

2.4 Effet de géométrie

Aux points précédents, l'impact des propriétés des matériaux sur le comportement hydrique des recouvrements SR a été mis en évidence. Cependant, la géométrie du recouvrement peut affecter de façon significative son comportement hydrogéologique dans une situation réelle (effet de la pente, longueurs et inclinaison des couches). En effet, si les recouvrements SR sont construits sur des surfaces inclinées (comme c'est le cas pour les SR placées sur les côtés des aires d'accumulation de rejets miniers, digue et haldes à stérile), la distribution de l'eau dans la couverture peut être affectée (Ross 1990, Steenhuis et al. 1991, Bussière 1999, Bussière et al. 2003b, Zhan et al. 2014). En terme plus concret, cela signifie que le comportement

hydrogéologique des recouvrements avec effets de barrière capillaire va être différent selon qu'il soit en condition horizontale (ou avec très faible pente) ou en condition inclinée. Le comportement des recouvrements SR en 1D est relativement bien connu (Aubertin et al. 2009; Zhan et al. 2014); il existe en revanche plus d'incertitudes concernant le comportement de ces mêmes couvertures lorsqu'elles sont mises en place sur des surfaces inclinées (Aubertin et al. 1997, Bussière 1999, Tami et al. 2004, Cifuentes et al. 2006, Aubertin et al. 2009).

Certains travaux de laboratoire et de terrain (dont la plupart sont effectués dans des conditions climatiques tempérées et humides) ont décrit l'influence de la pente sur des systèmes de recouvrement intégrant notamment des effets de barrière capillaire (e.g. Ross 1990, Stormont 1995, Stormont 1996, Morris and Stormont 1997, Bussière et al. 1998, Bussière 1999, Zhan et al. 2001, Kämpf et al. 2003, Tami et al. 2004, Martin et al. 2005, Parent and Cabral 2006, Zhan et al. 2006, Abdolahzadeh et al. 2011, Hopp et al. 2011, Jansik et al. 2011, Maqsoud et al. 2011, Song and Yanful 2011, Rahardjo et al. 2012, Zhan et al. 2014, Liu et al. 2015, Ng et al. 2015, Vachon et al. 2015). On sait que la capacité à contrôler les infiltrations d'eau va dépendre de la configuration et la géométrie du système (épaisseur et longueur des couches, angle de la pente) (Bussière et al. 2003b, Alfnes et al. 2004, Tami et al. 2004), des conditions climatiques, des propriétés non saturées des matériaux composants le recouvrement, de l'épaisseur du recouvrement, ainsi que l'état initial du matériau.

Dans un climat semi-aride à aride, à la déviation de l'eau s'ajoute l'évaporation qui influencera également le contrôle des infiltrations d'eau (Rahardjo et al. 2012; Zhan et al, 2014). Les couvertures SR inclinées, connues également sous l'appellation Stockage Déviation et Relargage (SDR) (Aubertin et al. 2009), ont pour objectif principal de promouvoir au mieux l'évaporation, le ruissellement, le stockage et le drainage latéral, pour éviter l'infiltration de l'eau dans les résidus miniers lors des conditions de précipitation extrêmes (Aubertin et.al. 2009; Ng et al. 2015) (Figure 2-8).

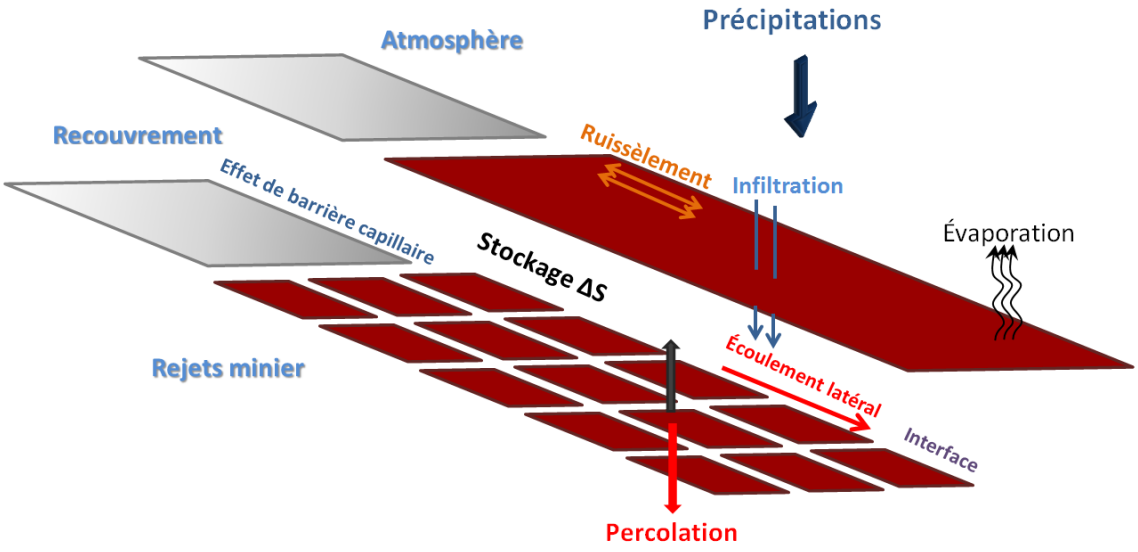


Figure 2.8 : Recouvrement SR inclinée avec les différentes composantes du bilan hydrique

2.4.1 Limite de bas de pente et capacité de déviation

La déviation de l'eau associée au stockage-relargage peut augmenter l'efficacité de la couverture à contrôler la percolation de l'eau (Ross, 1990; Stormont, 1996; Zhan et al. 2001, Aubertin et al. 2009). Cependant, le comportement d'un recouvrement incliné est relativement complexe puisque la répartition des eaux infiltrées n'est pas homogène sur toute la longueur de la pente. Les teneurs en eau volumiques deviennent de plus en plus élevées vers la partie basse (Bussière et al. 2003b, Mancarella et al. 2012). Quand il y a un apport d'eau significatif (e.g. un grand événement de précipitation), l'eau s'accumule à l'interface des deux couches (fine et grossière) et s'écoule vers le bas de la pente (figure 2-9). Quand l'eau se déplace le long de cette interface, le degré de saturation et la conductivité hydraulique du matériau fin (couche de rétention d'eau) augmentent progressivement et l'effet de la barrière capillaire disparaît graduellement jusqu'à ce que la succion à l'interface atteigne la valeur d'entrée d'eau (WEV) du matériau grossier (Morris et Stormont, 1999; Cifuentes et al. 2006; Aubertin et al. 2009; Rahardjo et al. 2012). L'emplacement le long de la pente où ce phénomène à lieu (disparition des effets de barrière capillaire) est appelé limite de bas de pente (DDL pour «Down Dip Limit») (Ross, 1990). En réalité, cette limite ne correspond pas à un point, mais plutôt à une région où le bris capillaire disparaît graduellement (Bussière, 1999). La quantité d'eau s'écoulant latéralement jusqu'à ce point représente la capacité de déviation de la barrière capillaire (Q_{max}). La longueur de déviation (L_d) représente la longueur le

long de la pente entre le haut de la pente et le point DDL (Aubertin et al. 2009) et la longueur effective de la barrière capillaire (L_{eff}) représente la distance horizontale entre la partie la plus haute de la pente et la limite de bas de pente (DDL) (Ross, 1990).

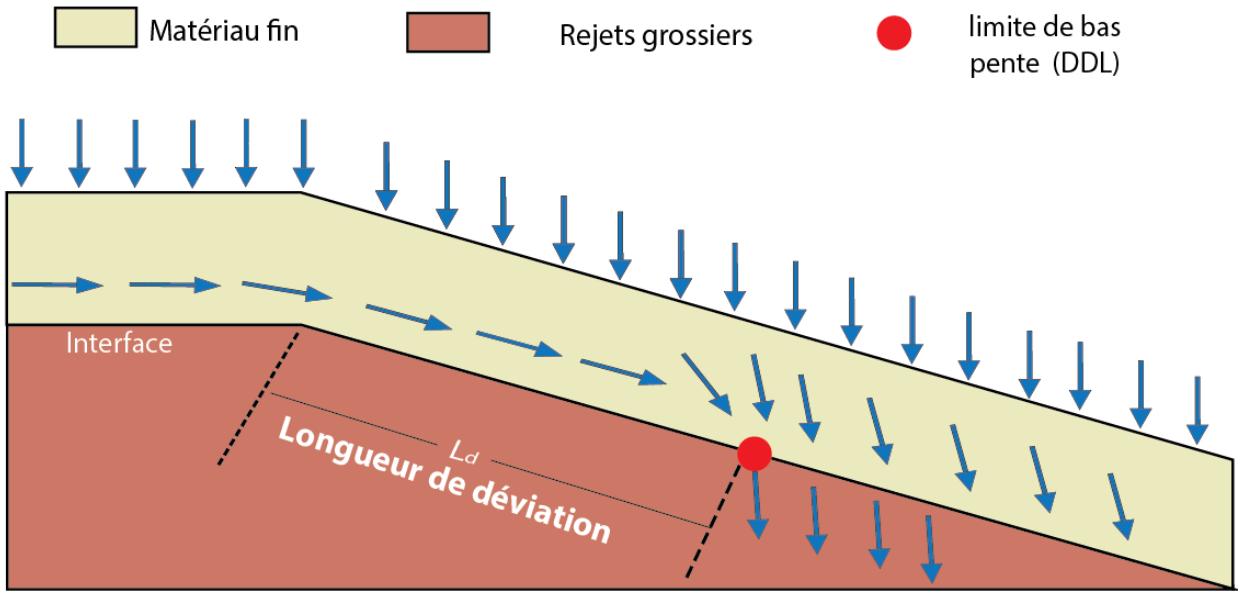


Figure 2.9 : Représentation schématique de l'écoulement d'eau à travers une couverture inclinée et rupture du bris capillaire au point DDL représenté par le point rouge (adapté de Bussière, 1999)

Une couverture SR inclinée est considérée comme efficace si la longueur de déviation (L_d) est supérieure à la longueur de la pente, ce qui va diminuer les risques de percolation vers les rejets réactifs (Aubertin et al. 2015). Une longue période de précipitation diminue la longueur effective de la barrière capillaire et déplace le point DDL vers le haut (Bussière et al. 2003b; Zhan, 2006, 2014). Dans cette optique, la capacité de déviation et la longueur effective de la barrière capillaire idéales peuvent être estimées à l'aide de solutions analytiques. Les valeurs de L_d prédites par les solutions analytiques sont habituellement inférieures à celles mesurées en laboratoire ou prédites par les méthodes numériques (Bussière 1999, Bussière et al. 2002, 2003a). C'est pourquoi il est important d'utiliser des modélisations numériques 2D qui donnent plus de précision sur la localisation du point DDL et une bonne prédiction des infiltrations lors des événements extrêmes de pluie, même pour les scénarios les plus critiques (Bussière, 1999; Aubertin, 2009).

L'ajout de couches additionnelles où la variabilité de leurs épaisseurs peut, dans certains cas, augmenter l'efficacité et la performance du recouvrement SR (en augmentant la valeur de L_{eff}) (Stormont, 1995, Morris and stormont, 1999, Martin et al. 2006 ; Aubertin et al. 2009, Harnas et al. 2014 ; Ng et al. 2015). Pour trouver une configuration optimale, il est nécessaire d'évaluer différents scénarios à l'aide de modélisations numériques, de modélisations physiques au laboratoire, de parcelles expérimentales ainsi que d'une bonne connaissance des propriétés des matériaux (Aubertin et al. 2015).

2.4.2 Solutions analytiques pour évaluer la capacité de déviation

Les solutions analytiques, malgré leurs faiblesses, sont tout de même utiles pour évaluer de façon préliminaire la capacité de déviation (Q_{max}) et la longueur effective de la barrière capillaire (L_{eff}) de recouvrements avec effets de barrière capillaire inclinés (e.g. Pease and Stormont, 1996; Bussière, 1999; Tami et al. 2004; Bussière et al. 2007b). Les principales solutions analytiques proposées dans la littérature sont présentées dans cette partie. On introduit d'abord la solution analytique proposée par Ross (1990) suivie d'une équation modifiée qui a été proposée par Steenhuis et al. (1991). Ensuite, une solution analytique quelque peu différente proposée par Morel-Seytoux (1994) est décrite. Il est important de noter que ces solutions analytiques font les hypothèses suivantes : le régime est permanent, l'épaisseur de la couche est infinie, il n'y a aucune évapotranspiration (ET), la nappe phréatique est très loin de la surface et la succion à une distance donnée de l'interface ne dépend pas de l'emplacement le long de la pente (Bussière, 1999, Aubertin et al. 2009). Cette dernière hypothèse peut être irréaliste pour des situations réelles sur le terrain, d'où la nécessité d'utiliser ces solutions avec précaution (Bussière et al. 2007b). Pour chaque solution, la longueur effective de la barrière capillaire peut être évaluée en divisant la valeur de Q_{max} par le taux de précipitation P.

2.4.2.1 Solution analytique de Ross (1990)

Ross (1990) a étudié les concepts de l'utilisation des couvertures avec effet de barrière capillaire pour l'utilisation dans les sites d'enfouissement de déchets domestiques. Il a montré que dans un système incliné, on retrouvera peu d'eau d'infiltration à l'interface dans le haut de la pente tandis que la quantité d'eau d'infiltration augmentera au fur et à mesure que l'on descend la pente jusqu'à un point critique, le point DDL. Il a développé une solution analytique pour évaluer la capacité de

déviation et la longueur effective de la barrière capillaire, en régime permanent, pour différents cas particuliers. Cette solution analytique est l'une des plus largement utilisées.

$$Q_{max} = k_{sat_2} \frac{tan\alpha}{a_{s_2}} \left[\left(\frac{P}{k_{sat_1}} \right)^{\frac{a_{s_2}}{as_1}} - \frac{P}{k_{sat_2}} \right] \qquad 2.12$$

Dans cette équation, on retrouve : α : angle de la pente ; k_{sat} : conductivité hydraulique saturée (m/s) ; a_s : paramètre qui est fonction de la géométrie des pores (Philip, 1969) ; P : le taux de précipitation (m/s); p : paramètre utilisé pour décrire la fonction de perméabilité (p = 3+ 2M). Les indices 1 et 2 se réfèrent au matériel grossier et fin.

2.4.2.2 Modification de la solution analytique de Ross (1990) par Steenhuis et al. (1991)

Les auteurs ont révisé la solution de Ross (1990) pour estimer la longueur effective de la barrière capillaire et la capacité de déviation maximale en utilisant une estimation différente de la conductivité hydraulique en fonction de la succion matricielle. En effet, le modèle de Ross (1990) utilise une expression simplifiée (proposé par Gardner, 1958) pour représenter la fonction de perméabilité k_u de la couche de rétention d'eau. La version modifiée proposée par Steenhuis et al. (1991) utilise quant à elle le modèle de Rijtema (1965) (ces deux expressions sont détaillées dans la partie 2.1.2.2). Steenhuis et al. (1991) émettent l'hypothèse que l'eau ne s'infiltre dans la couche grossière que si la pression à l'interface devient supérieure à la pression d'entrée d'eau du matériau grossier (WEV ou ψ_0^*) qui devient un paramètre critique pour déterminer la capacité de déviation d'une CCBE inclinée (e.g. Bussière 1999; Aubertin et al. 2006). Cette valeur peut être considérée comme similaire à la succion résiduelle ψ_r, lorsque les effets d'hystérésis ne sont pas tenus en compte (Bussière et al. 1998). L'équation s'écrit comme suit:

$$Q_{dm} = k_{sat_2} \tan\alpha \left[a_{s_2}^{-1} \left(1 - \frac{P}{k_{sat_2}} \right) + \psi_{a_2} - \psi_w \right] \text{ avec } (\psi_{a_2} \geq \psi_w) \qquad 2.13$$

où : ψ_a : pression d'entrée d'air (AEV en m d'eau) ; ψ_w : pression d'entrée d'eau (WEV) dans le matériel grossier (m d'eau) ; a_s : valeur de la sorption en fonction de la géométrie de la porosité Philip (1969)

2.4.2.3 Solution analytique de Morel-Seytoux (1994)

L'approche proposée par Morel-Seytoux (1994) est significativement différente de celles mentionnées ci-dessus. Elle implique la connaissance de la succion capillaire efficace du sol fin $\psi_{c\text{-}a}$ qui caractérise le comportement non saturé et l'équation de Brooks and Corey (1964) pour décrire les fonctions non saturées. En outre, une autre particularité intéressante de cette solution réside dans l'intégration de la fraction transmise q* comme étant un paramètre du modèle, ce qui permet une évaluation de la capacité de déviation de l'eau d'une barrière capillaire inclinée à un pourcentage donné de percolation (q* est égal à 1 au point DDL où toute l'infiltration est censée se produire), ce qui n'est pas possible avec les autres solutions analytiques.

L'équation de Morel-Seytoux (1994) est plus générale et considérée plus réaliste que la solution de Ross (1990) et Ross modifiée par Steenhuis et al. (1991) qui ne sont valables que pour q* égal à 1 (Bussière 1999, Bussière et al. 2003). Elle peut s'exprimer de la façon suivante :

$$Q_{dm} = k_{sat_2} tan\alpha \left[\psi_{c_2} - \psi_{aM_1} \left(\frac{q^* P}{k_{sat_1}} \right)^{\frac{-M_1}{p_1}} \right] \qquad 2.14$$

où : ψ_c : pression capillaire effective ; ψ_{aM} : pression d'entrée d'air de la courbe de mouillage ;

q^* : fraction transmise ; M : paramètre de Brooks and Corey (1964) utilisé pour décrire la courbe de rétention d'eau ; p : paramètre utilisé pour décrire la fonction de perméabilité (p = 3+ 2M) .

Ces trois solutions analytiques seront utilisées plus loin dans le document pour estimer la longueur effective de la barrière capillaire du recouvrement SR incliné installé au site Kettara et pour comparer ces valeurs prédites avec les résultats obtenus sur le terrain et à l'aide de la modélisation numérique.

2.5 Synthèse de travaux sur des recouvrements alternatifs appliqués dans le contexte minier en climat semi-aride à aride

Un résumé des plus récentes études utilisant la technique des recouvrements SR dans le domaine minier est présenté dans ce qui suit. On rappelle que l'utilisation de ces recouvrements a été principalement développée pour les sites d'enfouissement de rejets municipaux, industriels et radioactifs (Albright et al. 2004; Rock et al. 2012; EPA 2013). On distingue dans les deux

prochaines sections les cas des recouvrements SR en 1D pour ensuite mettre l'emphase sur les recouvrements SR inclinés (2D), étant donné que le présent projet porte sur l'effet de la pente sur ce type de recouvrement.

2.5.1 Système de recouvrements SR horizontaux (1D)

Au cours des dernières années, un intérêt grandissant s'est développé pour les recouvrements de type SR utilisés dans un contexte de restauration minière. Plusieurs travaux de recherche ont étudié l'efficacité des systèmes de recouvrement SR pour le contrôle du DMA dans des conditions climatiques semi-arides à arides. Dans les cas retrouvés dans la littérature, les sites miniers ont utilisé des matériaux d'origine naturelle dans les recouvrements SR. Ces matériaux, ayant des propriétés hydrogéologiques qui répondaient aux exigences demandées, ont pu limiter la percolation et minimiser les risques de contamination par les eaux. Le tableau 2-4 présente quelques études de cas des sites miniers qui ont appliqués la technologie des recouvrements horizontaux type SR utilisés dans des régions où le bilan hydrique est négatif (ETP > P). Les exemples montrent la composition des recouvrements SR (épaisseur, textures des matériaux, présence de végétation) ainsi que le climat qui varie d'un site à l'autre. On remarque aussi que les épaisseurs des recouvrements ne dépassent pas 2 m (avec ou sans bris capillaire). Lorsque les effets de barrière capillaire sont présents, l'épaisseur diminue; cela est dû au fait que l'effet de barrière capillaire fourni un facteur de sécurité supplémentaire (Scanlon et al. 2006) comme mentionné précédemment (section 2.2). La présence de la végétation semble augmenter l'efficacité du recouvrement (Keller et al. 2011; Zhan et al. 2014) (voir section 2.3.3). Il est important de souligner que les recouvrements SR ont efficacement pu limiter la percolation, qui dans la plupart des cas présentés ne dépasse pas 1% même en conditions extrêmes, à l'exception du cas de la mine Questa où les auteurs n'ont pas donné assez d'informations pour statuer sur la performance. Le design de ce type de recouvrement reste encore problématique à cause de la relation complexe entre le climat, les matériaux du recouvrement et leurs interactions. Cette relation est spécifique à chaque site : il n'y a donc pas de norme générale de construction pour les couvertures SR. Ainsi, les critères de performance dépendent des conditions de chaque site minier.

Tableau 2.4 : Quelques exemples des principaux sites miniers qui ont utilisé les recouvrements store-release (SR) en climats semi-arides à aride (adapté de Bossé. 2014)

Site minier	**pays**	**Climats**	**Travaux de restauration**		**Type de recouvrement**	**Propriétés des matériaux de recouvrement**	**Performance du recouvrement**	**Performance et Références**
			Essai expérimental	Recouvrement final				
Kettara	Maroc, Marrakech	Semi-aride P=334 mm << ETP=2,178 mm/an	Couvertures de 50 cm (effet de barrière capillaire) Couverture 100cm (effet de barrière capillaire)	–	-Stérile -Rejet de concentrateur	k_{sat} = 9.8 × 10^{-6} à 3.7 × 10^{-5} cm/s, AEV=40 kPa	Conditions naturelles couvertures 50 et 100 cm= =pas de percolation Conditions extrêmes Percolation dans la couverture de 50 cm	(Bossé 2014) (plus de détails seront présentés au chapitre 3).
Phoenix	Battle Mountain, NV - USA	Semi-aride P = 207 mm/an EP = 1787 mm/an	–	Recouvrement de 2 m	Stériles	–	Percolation inférieure à 1% des précipitations annuelles	Keller et al. (2011)
Morenci	AZ - USA	Semi-aride P = 452 mm/an EP > 1700 mm/an	Recouvrement de 0.6 m	–	Rejets de concentrateur	k_{sat}= de 10^{-4} à 10^{-7} cm/s	Percolation inférieure 1% des précipitations annuelles	(Milczarek et al. 2003) (Milczarek et al. 2011)
Monticello	UT - USA	Semi-aride P = 390 mm/an EP = 1000 mm/an	–	Recouvrement de 1.6 m (+ bris capillaire)	Rejets de concentrateur	–	Percolation inférieure à 0.6 mm/année	(Waugh et al. 2008)
Golden Sunlight	Whitehall MT - USA	Aride P = 243 mm/an EP = 1048 mm/an	Recouvrement de 0.8 à 1.8 m	–	Rejets miniers	k_{sat}= 2,4 x 10^{-4} and 1.4 x 10^{-4} cm/s	Percolation ≤ 1%_	(Junqueira et al. 2006)
Kidston	Queensland - Australie	Semi-aride /subtropical P = 700 mm/an EP = 2800 mm/an	–	Recouvrement de 1.5 m	Stériles	k_{sat}= 5 x 10^{-10} m/s à 2 x 10^{-8} m/s AEV = 10 kpa	Percolation ≈1,1%	(Williams et al. 2006)
Teck Cominco Kimberly	Kimberley, British Columbia	Semi-aride P= 402 mm< EP=704mm	45cm (effet de barrière capillaire)	–	Till	k_{sat}=1 x 10^{-6} cm/s à 1 x 10^{-4} cm/s	Percolation < 4 %_	(Gardiner et al. 1997) (O'kane 2004)
Questa	NM - USA	P = 310 mm/an EP = 1715 mm/an	Recouvrement de 0.2 à 0.6 m (avec et sans végétation)	–	Rejets de concentrateur	k_{sat}= 1.45x10^{3}cm/s	6% des précipitations annuelles en été	(Wels et al. 2001, 2002)
Mt. Whaleback	nord-ouest d' Australie	aride tropical P = 320 mm/an <<EP = 3000 mm/an	Recouvrement de 2 à 4 m	–	Stérile	$k_{sa=}$ 10^{-5}cm/s AEV = 8 kPa	Percolation ≈1,4 % _	(O'Kane et al. 2000, O'Kane and Waters 2003, MEND 2004b)

P précipitations, *EP* évaporation potentielle

2.5.2 Systèmes de recouvrement SR inclinés (2D)

Comme sur tous les sites miniers, les recouvrements ont habituellement une certaine pente afin de favoriser le ruissellement et le drainage (minimum entre 1° et 5°) (Bussière, 1999). L'angle de la pente peut atteindre 15° à 20° pour les digues des parcs à résidus et même plus dans le cas des haldes à stériles, qui ont des pentes fortement inclinées. La performance d'un système de couverture peut être très différente sur une surface inclinée (2D) par rapport à une surface horizontale (1D). À la connaissance de l'auteur, peu de travaux ont évalué le comportement des recouvrements SR inclinés (2D) dans le domaine minier, notamment sur des cas réels (Aubertin et al. 2015). Parmi les travaux existants, on cite : la mine Goldstrike aux USA (Zhan et al. 2001, 2006, 2014), la mine Mt Whaleback en Australie (O'Kane and Waters, 2003), la mine Kidston également en Australie (Williams et al. 2006), la mine Phoenix (Keller et al. 2011) aux USA, dont les recouvrements ont été conçus pour des climats semi-arides à arides; et la mine Mildred lake en Alberta située dans un climat semi-aride froid (Kelln et al. 2008). À noter que certains travaux ont utilisé les recouvrements inclinés dans des climats humides, des climats tempérés (mine Cardia hill (Rohde 2009, Rohde and Williams 2009)) située en Australie, au Québec (Bussière et al. 2003b, Maqsoud et al. 2011), en Alaska (Hopp et al. 2011), et des climats tropicaux (Singapour (Rahardjo et al. (2012)).

Parmi tous ces cas, le cas le plus étudié est sans doute le cas du recouvrement placé sur les stériles de la mine Goldstrike aux USA qui sera décrit plus en détails dans ce qui suit.

La mine Barrick Goldstrike (USA) (Zhan et al. 2001, 2006, 2014)

Localisée à 60 km au Nord-Ouest d'Elko dans le nord du Nevada, la mine Barrick Goldstrike exploite un gisement d'or. La propriété Goldstrike comporte deux mines : la mine Betze-Post (à ciel ouvert) et la mine Meikle (souterraine). Le climat de la région est semi-aride et se caractérise par des hivers froids et des étés secs avec une température annuelle moyenne de 9,9°C et des précipitations moyennes annuelles aux alentours de 298 mm. L'évapotranspiration potentielle est de l'ordre de 1200 mm/an (4 fois plus grande que les précipitations) (Zhan et al. 2006). La plupart des précipitations sont sous forme de neige ou de pluie durant les orages d'été (Zhan et al. 2014).

À la fin de l'année 2004, environ 1,4 milliard de tonnes de roches stériles avaient été produites, comprenant un mélange d'environ 25% classées comme générateur d'acide et 75% classées comme non-générateurs d'acide. Afin de contrôler le DMA provenant des stériles potentiellement générateurs d'acide, l'utilisation d'une couverture SR a été sélectionnée pour restaurer le site.

Le design de la couverture a été effectué en plusieurs étapes : 1) Caractérisation des matériaux constituant le recouvrement SR, soit des matériaux fins (terre végétale ou topsoil et des matériaux silteux ou TCS; 2) Simulations numériques en 1D qui ont montré que les deux matériaux ont les propriétés adéquates pour être utilisés comme matériaux fins et stocker l'eau (les stériles grossiers quant à eux ont joué le rôle du bris capillaire); 3) Simulations numériques 2D puisque le comportement du recouvrement 2D est différent du comportement en 1D. Les résultats de la modélisation numérique montrent que lorsqu'exposée aux conditions naturelles, la couverture a stocké toute l'eau météorique et que le point DDL n'apparaît pas dans la pente. Afin d'évaluer la performance de la couverture en conditions extrêmes, des pluies de 7,8 cm/24h (période de retour de 100 ans) ont été appliquées pendant 3 jours. Ces essais ont montré qu'il n'y avait pas de percolation et que la couverture a pu stocker et dévier toutes les précipitations (Zhan et al. 2001, Zhan et al. 2001). Avant de passer à la construction finale, une cellule expérimentale (échelle intermédiaire) a été mise en place sur le terrain (7m x 7,5m) avec une inclinaison de 3:1 (figure 2-10). Les résultats de ces essais ont montré qu'une épaisseur de couverture de 90 à 120 cm sera en mesure de stocker de 12 à 16 cm d'eau, indépendamment de l'évaporation et du drainage latéral (Zhan et al. 2001). Le recouvrement final, quant à lui, est constitué de deux épaisseurs : 134 cm constitué du matériau Topsoil qui a été placé sur les pentes Ouest, le deuxième matériau TCS d'une épaisseur de 117 cm a été utilisé pour les sections du recouvrement placées sur les pentes Est et Sud. Le tableau 3 présente la conductivité hydraulique saturée et l'épaisseur des deux matériaux utilisés dans le système de recouvrement.

Tableau 2.5 : Propriétés des matériaux utilisés dans le recouvrement du site Goldstrike (Zhan et al. 2014)

Matériel	**k_{sat} (cm/s)**	**Épaisseur (cm)**
Matériaux silteux (TCS)	$1{,}3 \times 10^{-4}$	134
Topsoil	$1{,}5 \times 10^{-4}$	117

Les deux matériaux fins ont été placés sur un matériau grossier (le stérile minier dans ce cas-ci) pour créer les effets de barrière capillaire. Rappelons que les effets de barrière capillaire sont utilisés pour limiter l'écoulement d'eau dans le minerai lixivié et augmenter la capacité du matériau fin à stocker l'eau (Zhan et al. 2014).

Figure 2.10 : Simulation d'un essai d'irrigation/infiltration sur la mine Goldstrike (Zhan et al. 2014)

Afin de faire un suivi du comportement hydrogéologique du site, des stations de mesures qui comprenaient des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) pour la mesure des teneurs en eau volumiques et des capteurs thermiques HDS (Heat Dissipation Sensors) pour la mesure de la succion matricielle ont été installés dans la couverture (figure 2-11) (Zhan et al. 2001, 2014). Les résultats de la teneur en eau volumique et de la succion montrent que le recouvrement Topsoil dans les parties Sud et Ouest étaient plus efficaces pour stocker l'eau que le recouvrement TCS dans les parties Est (Zhan et al. 2014).

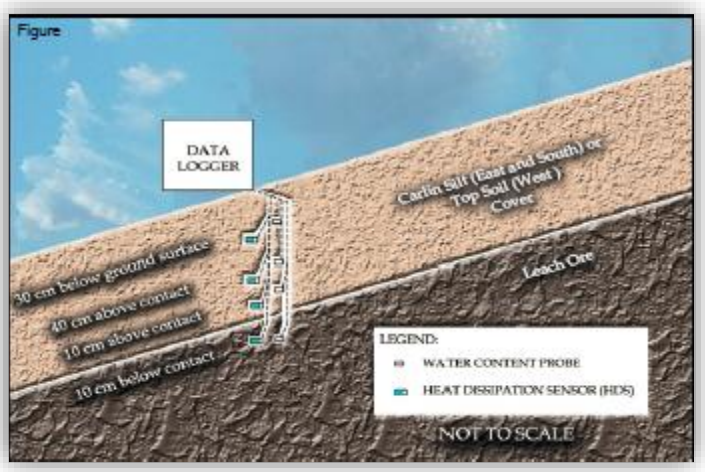


Figure 2.11: Représentation schématique du système de monitoring (Zhan et al. 2014)

La dernière étape était de voir l'effet de la végétation sur les recouvrements. Pour cela la couverture a été ensemencée avec plusieurs types de plantes pour sélectionner l'espèce la plus compatible avec la couverture et le type de climat afin d'augmenter son efficacité. Durant les 11 ans de suivi, les résultats et les mesures montrent que la couverture SR inclinée limite la percolation à travers les rejets. Ces années d'étude montrent que les taux de percolation profonde sont généralement inférieurs à 1% des précipitations annuelles; les plantes utilisées sont autonomes et le site minier restauré apparaît résistant à l'érosion.

2.6 Besoins en recherche sur l'effet de pente sur le comportement hydrogéologique des recouvrements (SR)

La revue de littérature a permis d'identifier les principes de fonctionnement des recouvrements SR et les principaux paramètres qui affectent leur performance. Ces principaux paramètres sont les propriétés hydrogéologiques (incluant une éventuelle anisotropie), la géométrie du système de recouvrement (épaisseur et angle de la pente), la végétation, ainsi que les conditions climatiques. Malgré la pertinence des travaux antérieurs effectués, beaucoup reste à faire pour bien comprendre et mieux prédire les effets de la géométrie sur le comportement hydrogéologique des recouvrements de type stockage-relargage (SR) en climats semi-arides à aride. La plupart des travaux réalisés jusqu'à présent sur l'effet de la pente ont été menées en utilisant des approches analytiques ou numériques, ou encore à l'échelle du laboratoire dans des boites inclinée (Song and

Yanful, 2011; Tami et al. 2004; Zhang et al. 2014; Ng et al. 2015) ou pour étudier la stabilité des pentes (Rahardjo et al 2012; Mancarella et al. 2012). Il est donc important que des travaux à l'échelle intermédiaire sur le terrain soient réalisés. De plus, la plupart des travaux réalisés l'ont été avec des matériaux d'origine naturelle. La possibilité d'utiliser des rejets miniers non problématiques comme couche de rétention d'eau d'un recouvrement de type SR mérite d'être étudiée davantage. En plus de contrôler la problématique du DMA, cette approche aurait l'avantage de réutiliser et valoriser des matériaux miniers qui sinon ne seraient pas exploités pour leurs caractéristiques hydrogéologiques favorables.

Dans cette optique, le présent projet vise à évaluer l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique d'un recouvrement SR à la mine de Kettara située au Maroc, dans un climat semi-aride. Le drainage minier acide (DMA) est l'un des problèmes environnementaux majeurs auxquels est confronté le site abandonné. Afin de pallier à ce problème, la mise en place d'un système de recouvrement SR visant à contrôler les infiltrations d'eau semble être la meilleure solution. Les essais en (1D) ont confirmé le potentiel de rejets calcaires phosphatés, localisés à proximité de Kettara, comme composante d'un recouvrement SR (Bossé et al. 2013). Cependant, aucune étude hydrogéologique en système incliné n'a été effectuée sur le site minier Kettara et ce, même si le site minier est ceinturé d'une digue d'une hauteur parfois supérieure à 10 m.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU SITE À L'ÉTUDE, DE LA CONCEPTION ET DE LA CONSTRUCTION DE LA CELLULE EXPÉRIMENTALE

Comme il a été démontré au chapitre 2, la géométrie peut influencer grandement le comportement hydrogéologique des recouvrements avec effet de barrières capillaires (Bussière et al. 2003, Aubertin et al. 2009). Il est donc important de réaliser des essais *in situ* à l'échelle intermédiaire pour déterminer l'effet des conditions environnantes (précipitations, température, vent, etc.) sur la performance du recouvrement SR avec effet de barrières capillaires. Dans cette optique, une cellule expérimentale a été construite directement sur le parc à rejets de Kettara, afin d'obtenir des résultats plus réalistes et représentatifs d'un recouvrement SR incliné. Cet essai a été réalisé en parallèle avec des essais de caractérisation au laboratoire.

Dans un premier temps, le site minier de Kettara est localisé est décrit, puis les travaux antérieurs (1D) effectués sur le site minier sont présentés. En second lieu, les principales caractéristiques hydrogéotechniques des matériaux choisis comme composante de recouvrement SR incliné pour l'étude sont également présentées. Ce chapitre se poursuit par la description des différentes étapes de la construction de la cellule expérimentale inclinée suivi de la présentation de l'instrumentation utilisée, des essais de contrôle qualité et des événements pluviaux importants testés.

3.1 Description du site minier Kettara

3.1.1 Situation géographique

La mine abandonnée de Kettara est située au milieu du village du même nom (figure 3-1). Ce village regroupe une population d'environ 2 000 habitants. Elle est localisée géographiquement à environ 35 km au Nord-Ouest de la ville de Marrakech (Maroc) (Figure 3-1). Selon l'indice d'aridité (= 0,076) qui est calculé à partir du ratio des précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle annuelle (UNEP 1997), le climat de cette région est classifié comme aride.

La température moyenne varie de 12 °C en Janvier à 29°C en Juillet. Les précipitations et l'évaporation potentielles moyennes annuelles cumulées sont respectivement de 150 mm et 1980 mm (Bossé, 2014).

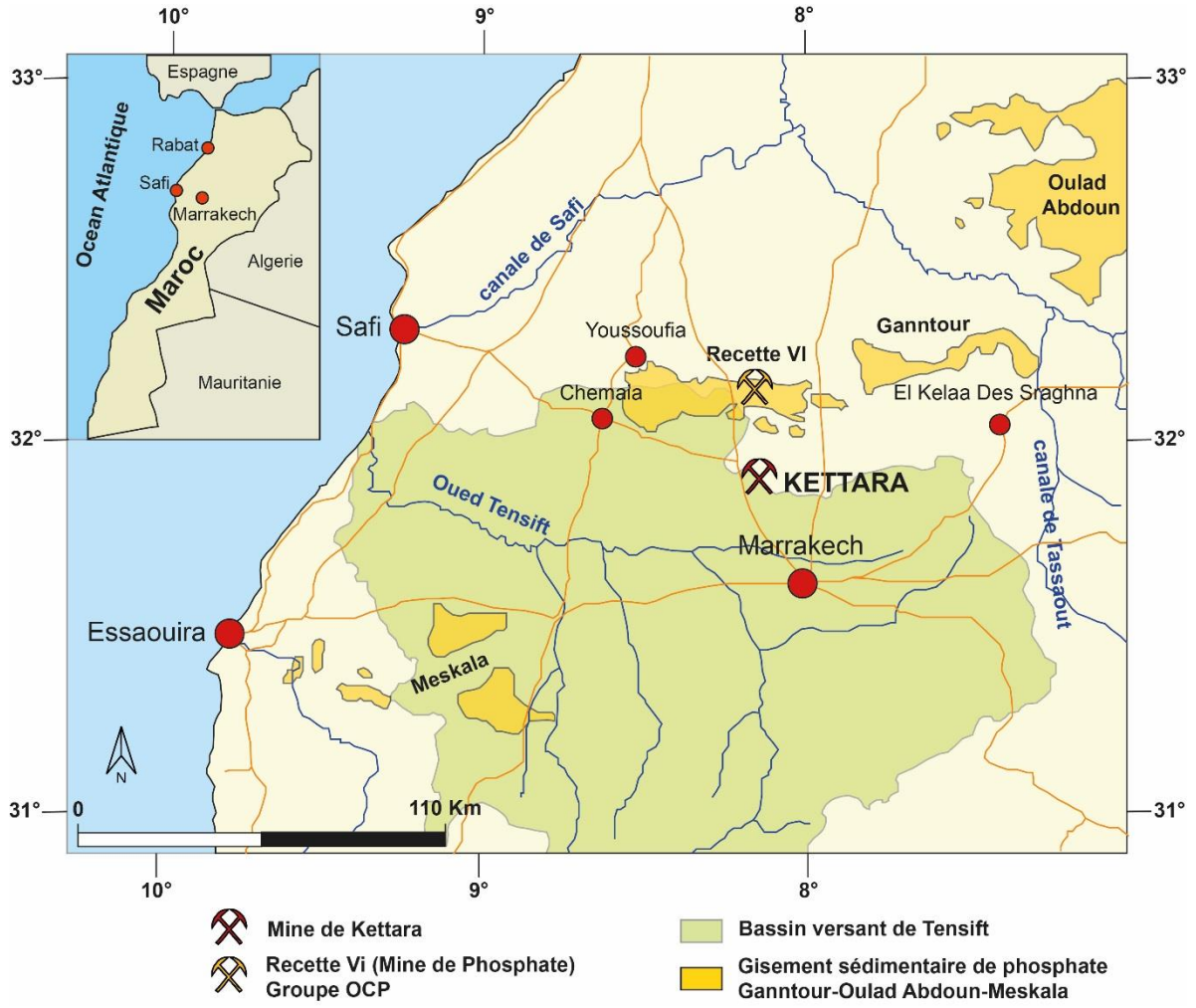


Figure 3.1 : Localisation du site minier Kettara (adapté de Bossé et al. 2013)

3.1.2 Cadre géologique et historique de la mine Kettara

La mine de Kettara est située au sein des Jebilet centrales. Le massif rocheux des Jebilet centrales forme une suite de petites collines d'altitudes variables entre 500 à 900 m et s'étend en direction E-W sur une longueur de 170 km et une largeur allant de 7 à 40 km. Les roches paléozoïques des Jebilet centrales encaissent une importante minéralisation de type amas sulfuré, dont celui du gisement de Kettara. L'amas subverticalisé de Kettara comporte plusieurs types de minerais dont la paragenèse minérale comprend, par ordre de fréquence : pyrrhotite, magnétite, pyrite, chalcopyrite, sphalérite, galène et arsénopyrite, parfois traversée de filonnets de sphalérite et de sidérose (Essaifi et al. (2001).

La mine de Kettara a connu trois phases d'exploitations minières qui se sont succédées au fil du temps. Pendant la première phase, entre 1938 à 1962, la mine a connu une exploitation à ciel ouvert du chapeau de fer exploité pour les oxydes de fer utilisés dans l'industrie de la peinture. Pendant la deuxième phase, entre 1955 à 1966, c'était plutôt la pyrrhotite qui a été exploitée (Huvelin 1977). Au cours de ces deux premières phases, environ un million de tonnes de stériles ont été générées (Khalil 2014). Pendant la troisième phase, entre 1964 et 1981, la mine a produit plus de 5,2 millions de tonnes de concentré de pyrrhotite contenant une moyenne de 29% de soufre (Hakkou et al. 2008a). Le concentré qui a été expédié à la société Maroc chimie pour la fabrication de l'acide sulfurique a été produit à l'usine de concentration située au niveau du site minier. Les opérations de traitement minéralurgiques consistaient essentiellement en des opérations de concassage puis une séparation gravimétrique en voie humide et une décantation pour séparer la fraction solide du liquide. Le processus d'enrichissement adopté (jigs) a produit un large éventail de fractions granulométriques dans les rejets miniers de Kettara (figure 3-2). Tout au long de cette période, plus de 3 millions de tonnes de rejets miniers riches en sulfures ont été déposées sur une superficie d'environ 28 ha sans égard à l'environnement (Hakkou et al. 2008a) (voir annexe 2).

Depuis la fermeture des opérations minières à Kettara, les rejets miniers produits ont été exposés aux conditions climatiques. Étant donné que ces rejets contiennent des sulfures, du DMA est généré ce qui constitue la principale source de pollution des environs (Hakkou et al. 2008a, 2008b). Selon Hakkou et al. (2005, 2008a), les rejets possèdent un fort potentiel de génération d'acide, avec un potentiel net de neutralisation (PNN) de l'ordre de -453 à -22,5 kg CaCO3/t.

Figure 3.2 : Rejets à granulométrie grossière posés de manière à retenir les résidus fins

3.1.3 Études antérieures sur les recouvrements stockage-relargage (SR) sur la mine Kettara

Le drainage minier acide (DMA) est l'un des problèmes environnementaux majeurs auxquels est actuellement confronté le site abandonné de Kettara (Hakkou et al. 2008a, b; Bossé 2014, Khalil, 2014). En effet, ce drainage contaminé constitue une source importante de pollution critique dans cette région; il est notamment accompagné de répercussions négatives sur le village, la faune et la flore (e.g. Khalil et al. 2008). Afin de contrôler le DMA, la mise en place d'un système de recouvrement visant à contrôler les infiltrations d'eau est sans doute l'alternative la plus appropriée (pour plus d'information, voir Bossé, 2014). En climat aride, où le taux d'évaporation potentiel dépasse de façon importante celui des précipitations annuelles, les systèmes de recouvrement stockage relargage (SR) utilisant le processus physique d'évaporation (ou évapotranspiration) permettent de réduire les infiltrations d'eau jusqu'aux rejets réactifs et de contrôler la percolation (voir chapitre 2); en d'autres termes la génération de drainage minier acide (DMA). Plusieurs essais de terrains, en 1D et à des échelles différentes (en colonnes et à l'aide de parcelles de terrain), ont confirmé le potentiel de rejets calcaires phosphatés, non-valorisés et à proximité du site de Kettara, comme composante d'un recouvrement SR (Bossé et al. 2013, Bossé 2014). Les parties suivantes

présentent un résumé des travaux qui ont été effectués par Bossé (2014) afin de bien comprendre le contexte du présent projet de maîtrise.

3.1.3.1 Essais en colonne instrumentée

Des essais préliminaires en colonnes instrumentées ont été réalisés afin de valider si les rejets calcaires phosphatés avaient les propriétés adéquates en tant que composante principale d'un recouvrement SR. Deux profils verticaux constitués de 50 et 100 cm de rejets calcaires phosphatés (particules < 1 mm), recouvrant 30 cm de rejets grossiers de Kettara (bris capillaire) (figure 3-3), ont été simulés physiquement sous des conditions climatiques naturelles et extrêmes (155 mm/j pendant 24 heures). Le comportement hydrogéologique de ces profils a été évalué pendant plus d'un an à partir des données météorologiques locales (climat semi-aride), des sondes de teneur en eau volumique et de capteurs de succion matricielle placés à 10, 25, 40 et 75 cm de profondeur dans le matériau à granulométrie fine. Pour plus d'informations concernant les configurations des colonnes, le lecteur intéressé peut consulter Bossé et al. (2013) et Bossé (2014).

Figure 3.3 : Colonnes instrumentées

Dans les deux cas testés, les rejets calcaires phosphatés ont efficacement stocké et libéré les eaux météoriques sous des conditions climatiques naturelles; seuls les senseurs situés à 10, 25 et 40 cm de profondeur ont été affectés par les précipitations. Sous des conditions climatiques extrêmes de 100mm puis de 150 mm appliqués pendant une période de 24 heures (figure 3-4), une augmentation

progressive de la teneur en eau volumique a été observée pour les deux colonnes (figure 3.4-a). Pour la colonne avec 100 cm de rejets calcaires phosphatés soumise à une précipitation de 100mm pendant 24 heures, le senseur situé à la profondeur (75 cm) n'a pas été affecté par l'événement extrême tandis que celui situé en bas de la colonne de 50 cm (40 cm) a montré une augmentation de la teneur en eau volumique (0,05 à 0,28). Alors qu'après la simulation de 155 mm (figure 3.4-b) pendant une période de 24 heures, la teneur en eau volumique à 10 et 40 cm a atteint la saturation (n= 0.43) ce qui veut dire qu'il y a eu une rupture des effets de barrière capillaire dans la colonne constituée de 50 cm de rejets calcaires (20 mm de DMA a d'ailleurs été mesurés au bas de la colonne). Pour la seconde colonne, aucune percolation n'a été mesurée même pour le cas d'une application d'une précipitation de 155 mm; la sonde à 75 cm de profondeur a toutefois été affectée par la simulation extrême.

Bien que ces résultats préliminaires proposent une épaisseur de rejets calcaires phosphatés comprise entre 50 et 100 cm d'épaisseur, des travaux à une échelle intermédiaire (cellule expérimentale 10 x 10 m) ont été recommandés avant la restauration finale et ce, directement sur le parc à rejets miniers du site de Kettara.

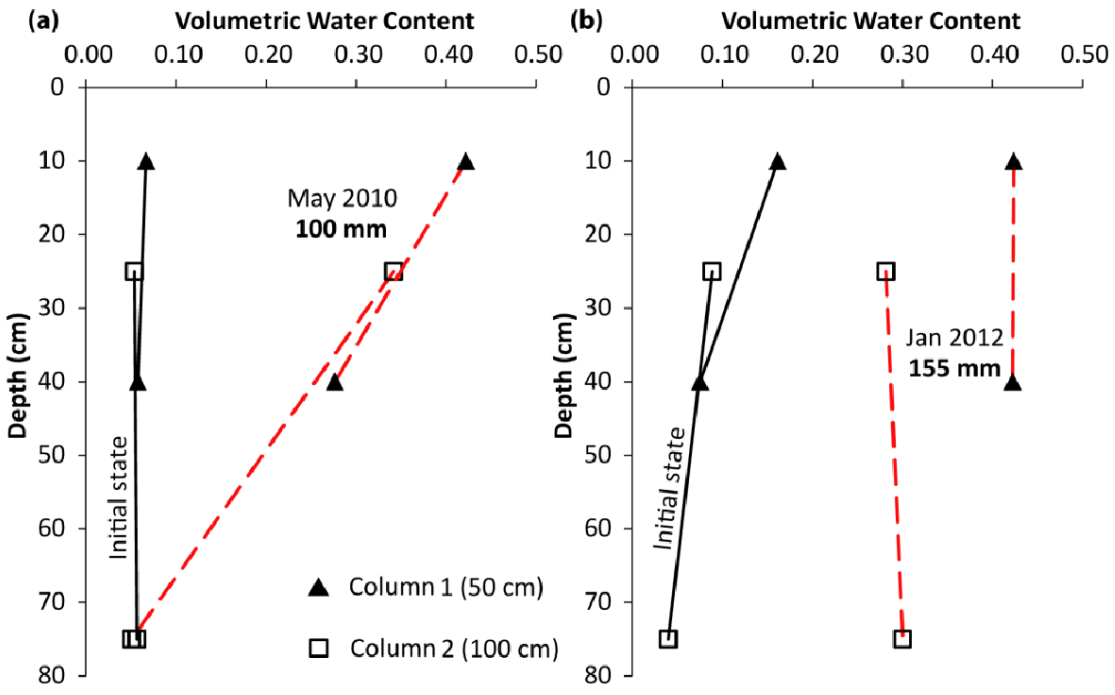


Figure 3.4 : Profil de teneur en eau volumique : (a) simulation d'un événement extrême de 100 mm; (b) simulation d'un événement extrême de 155 mm (Bossé et al. 2013)

3.1.3.2 Essais en cellule expérimentale (1D)

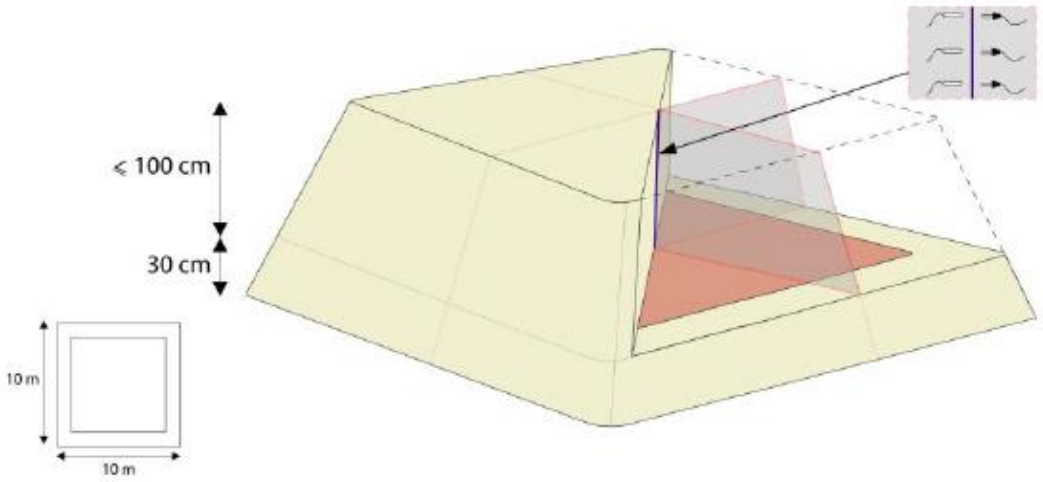
Suite aux essais en colonne, quatre cellules expérimentales instrumentées de 10 x 10 m ont été construites directement sur le parc à rejets miniers de Kettara (figure 3-5). Les configurations des cellules impliquent des textures et des épaisseurs de rejets miniers phosphatés spécifiques. Parmi ces cellules, deux sont similaires aux colonnes instrumentées évoquées précédemment : 50 et 100 cm de rejets calcaires phosphatés (particules < 1 mm) au-dessus de 30 cm de rejets grossiers de Kettara. Les deux autres cellules sont constituées de 100 cm de rejets miniers phosphatés avec des textures différentes : une granulométrie naturelle (sans le tamisage à 1mm) et un matériau à texture plus fine (rejets de concentrateur résultant d'une séparation par flottation). Le comportement hydrogéologique de ces parcelles a été évalué sous des conditions naturelles et extrêmes (155 mm/24h pour les cellules de 100 cm de rejets miniers phosphatés), à l'aide d'une station météorologique complète ainsi que des sondes de teneur en eau volumique et de capteurs de succion matricielle à 10, 25, 40, 50 et 75 cm de profondeur dans les matériaux SR. Le bris capillaire est également accompagné d'instruments de mesure afin de détecter les percolations en cas de rupture. Pour plus de détails concernant la conception des cellules expérimentales 1D, le lecteur est invité à consulter Bossé (2014).

Dans chacun des cas testés, les rejets miniers phosphatés ont efficacement stocké et libéré les eaux météoriques sous des conditions climatiques naturelles (avril à la fin de novembre) ; seuls les senseurs situés à 10 et 25 cm de profondeur ont été affectés pour les conditions climatiques naturelles. Sous des conditions extrêmes de 155 mm appliqués sur une période de 24 heures, les sondes situées de 10 à 75 cm de profondeur ont été affectées, mais aucune percolation n'a été mesurée dans la sonde du bris capillaire. Les résultats ont montré que les rejets les plus fins (rejets de concentrateur calcaires phosphatés) ont une plus faible capacité de libération que les autres matériaux et qu'ils sont plus sensibles au phénomène de dessiccation, ce qui pourrait affecter la performance à long terme de tels recouvrements. Le matériau à granulométrie naturelle a mis en évidence un taux de relargage légèrement supérieur aux autres matériaux testés, sans traces de dessiccations à la surface. La figure 3-3 montre une photo des quatre cellules construites sur le terrain.

Bien que les résultats de Bossé (2014) montrent qu'un recouvrement SR avec une épaisseur comprise entre 50 et 100 cm de rejets calcaires phosphatés à granulométrie naturelle est efficace

pour contrôler le DMA, il est essentiel que l'évaluation de la performance du système de recouvrement soit faite pour des conditions inclinées. Rappelons qu'en conditions inclinées, l'eau pourrait s'accumuler le long de l'interface et générer une rupture des effets de barrière capillaire (Ross, 1990; Steenhuis et al. 1991). C'est pourquoi le présent projet vise à déterminer l'influence de la pente sur les recouvrements SR. Pour ce faire, une cellule expérimentale inclinée a été construite sur le site minier Kettara. La construction de la cellule inclinée est détaillée dans ce qui suit. Mais avant de présenter la cellule expérimentale, une caractérisation physique, chimique et hydrogéotechnique des matériaux a été réalisée.

a



b

Figure 3.5 : a) Schéma d'une cellule 1D de 100 cm de rejets calcaire (Bossé, 2014), b) Photo des 4 Cellules expérimentales 1D

3.2 Caractérisation des matériaux

3.2.1 Matériaux

Les matériaux utilisés dans ce projet sont les rejets calcaires phosphatés d'origine naturelle utilisés comme couche de rétention d'eau SR et les rejets grossiers de Kettara comme bris capillaire. Les rejets calcaires phosphatés à granulométrie naturelle ont été sélectionnés suite aux résultats de Bossé (2014) (voir section 3.1.3). Les rejets calcaires phosphatés sont issus du bassin sédimentaire Gantour (Fig 3.1 Recette VI). Ces rejets miniers sont disponibles en grande quantité, inertes, non valorisés et ont la particularité d'être situés à proximité du site minier de Kettara. Environ 1000 tonnes de rejets ont été transportées au site Kettara (figure 3-4 a et b). Les rejets grossiers, utilisés comme couche de bris capillaire, quant à eux sont éparpillés partout sur le site minier et forment la digue qui retient les résidus fins (figure 3-4.c et d).

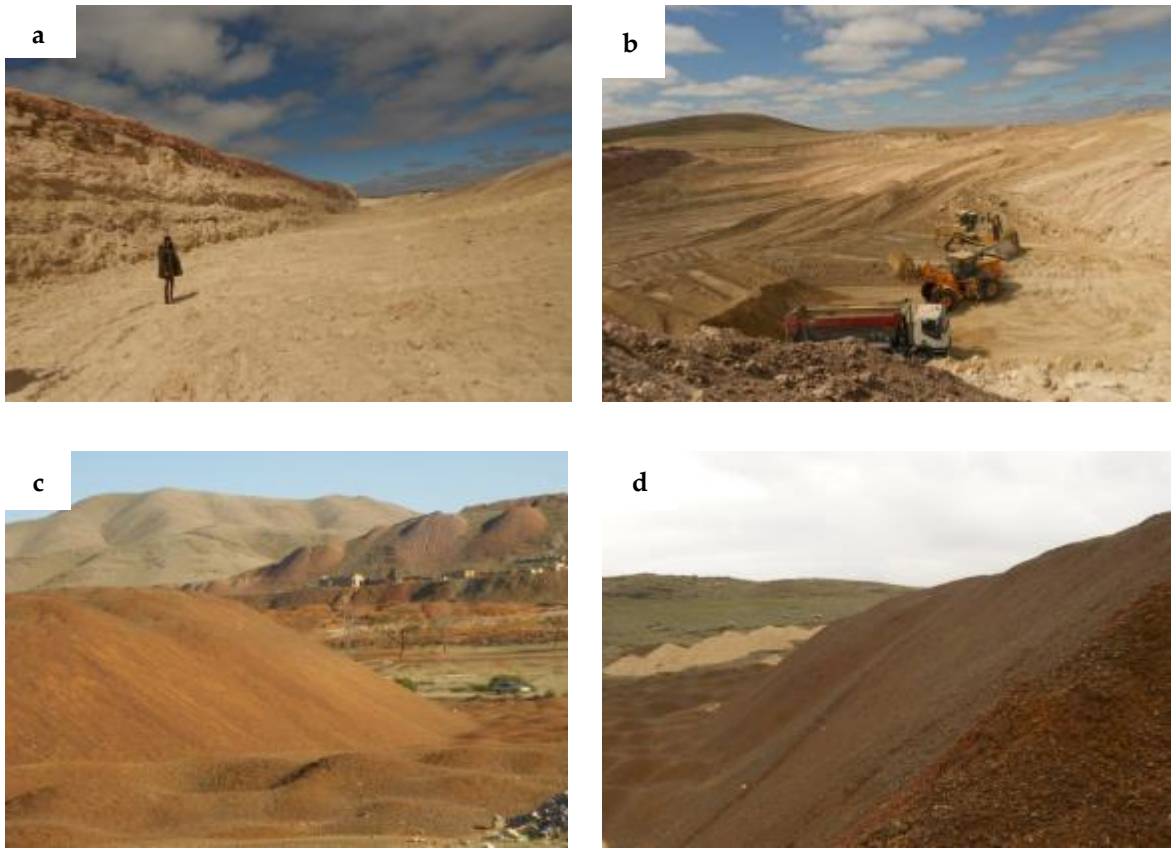


Figure 3.6 : Photos des rejets calcaires phosphatés (a et b) et des rejets grossiers de Kettara (c et d)

3.2.2 Méthodes et résultats de caractérisation

La section suivante décrit les différentes méthodes de caractérisations réalisées sur les échantillons des rejets calcaires phosphatés et les rejets grossiers de Kettara. Elle présente également les principaux résultats obtenus pour chacune d'elle. Alors que les échantillons des rejets grossiers ont été prélevés sur la digue, les rejets fins de calcaires phosphatés ont été échantillonnés lors de leur arrivée à la mine Kettara.

3.2.2.1 Granulométrie

L'analyse de la distribution granulométrique des rejets grossiers de Kettara a été faite par tamisage en voix sèche selon la norme (ASTM D 6913-04 2009). L'analyse granulométrique des rejets calcaires phosphatés a été faite par tamisage (>300μm) et l'analyse granulométrique des particules de diamètre inférieur à 100 μm a quant à elle été effectuée avec un granulomètre laser Mastersizer S de Malvern Instruments (Merkus 2009). Celui-ci ne peut être utilisé que pour une fraction granulométrique comprise entre 0,05 μm à 879 μm, avec une précision de ±2 %. Les résultats obtenus (tamisage et granulométrie laser) sont ensuite combinés et placés sur une courbe granulométrique cumulative. On peut déduire de la courbe granulométrique certains paramètres dont les plus importants sont :

D_{10} : diamètre des particules correspondant à 10% passant sur la courbe granulométrique;

D_{30} : diamètre des particules correspondant à 30% passant sur la courbe granulométrique;

D_{60} : diamètre des particules correspondant à 60% passant sur la courbe granulométrique;

À partir de ces paramètres, nous calculons le coefficient d'uniformité $C_U = D_{60}/D_{10}$ et le coefficient de courbure $C_C = (D_{30})^2/(D_{10} \times D_{60})$. Les résultats des analyses granulométriques des matériaux étudiés (les rejets grossiers de Kettara et les rejets de calcaires phosphatés) sont présentés à la figure 3.7.

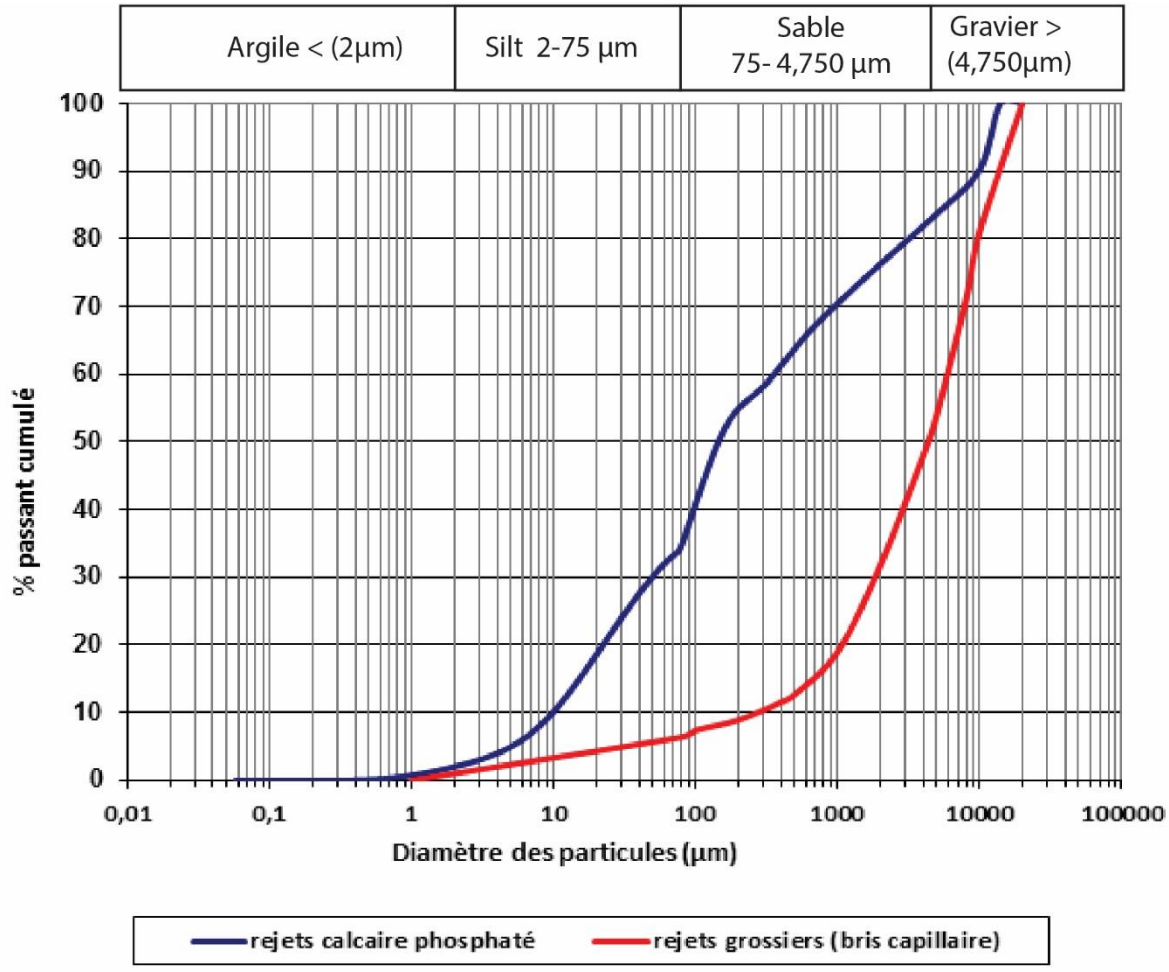


Figure 3.7 : Courbe granulométrique des deux composantes du recouvrement SR (rejets calcaires phosphatés et le bris capillaire)

Une analyse granulométrique a été réalisée sur plusieurs échantillons des matériaux. Il ressort des résultats de l'analyse granulométrique complète (tamisage + granulométrie laser) d'un échantillon représentatif de rejets calcaires phosphatés que les pourcentages passant au tamis de 0,002 mm (2 microns) et 0,08 mm (80 microns) sont d'environ 2 % et 35 % respectivement. Le tableau 3.1 présente les paramètres granulométriques des rejets grossiers de Kettara et les rejets de calcaire phosphaté.

Tableau 3.1 : Paramètres caractéristiques des distributions granulométriques.

Matériaux	**D_{10} (mm)**	**D_{30} (mm)**	**D_{60} (mm)**	**C_U**	**C_C**
Rejets calcaires phosphatés	0,01	0,05	0,38	38	0,68
Rejets grossiers de Kettara	0,2	2	6	30	3,33

La courbe granulométrique présentée à la figure 3-7 montre que le matériau de recouvrement utilisé dans cette étude est un peu plus grossier que celui utilisé par Bossé (2014). Les rejets calcaires phosphatés sont classifiés comme silt sableux (SM) peu plastique selon le système de classification des sols unifié (USCS; McCarthy (2007). On note que 80 % des particules de rejets grossiers analysés sont de taille entre 1mm et 20 mm. Ces résultats indiquent que ce matériel, selon la classification USCS, correspond à un gravier (GW).

3.2.2.2 Densité relative des grains (D_r)

Un pycnomètre à hélium Micromeritics Accupyc 1330 est utilisé pour déterminer la densité relative des grains selon la norme ASTM D5550-06 2006. Une masse connue de l'échantillon est introduite dans un cylindre de volume connu. Un volume d'hélium y est introduit et sa pression mesurée. Avec la loi des gaz parfaits, le volume de l'échantillon peut alors être calculé, connaissant précisément la masse et le volume, la densité relative est ensuite déduite. L'erreur absolue du résultat est évaluée à ± 0,01.

Les valeurs de la densité relative (D_r) des deux matériaux sont présentées au tableau 3-2. Les résultats de la densité relative des grains obtenus pour les rejets grossiers de Kettara et les rejets calcaires phosphatés concordent bien avec les résultats de Bossé et al. (2013).

Tableau 3.2 : Densités relatives des matériaux utilisés

Matériaux	**Densité relative (D_r)**
Rejets calcaires phosphatés	2,85
Rejets grossiers de Kettara	2,9

3.2.2.3 Essai de compactage

L'essai de compactage Proctor modifié a été réalisé en suivant la norme ASTM D1557-12. Une quantité de matériaux est d'abord placée dans le moule. À l'aide d'une masse normalisée de 2,49 kg et avec une hauteur de chute de 305 mm, on compacte le matériau en 3 couches (25 coups par couche). L'essai est réalisé sur plusieurs échantillons avec des teneurs en eau variables. On mesure le poids unitaire sec après compactage et la teneur en eau gravimétrique (après séchage à l'étuve). Au final, on détermine la variation du poids unitaire sec γ_d en fonction de la teneur en eau (W). Ces points permettent de tracer une courbe dont le sommet correspond à l'optimum (w_{opt}, γ_{dmax}). À noter que cet essai a été réalisé seulement pour le matériau jugé important qui est le matériau du recouvrement : les rejets calcaires phosphatés du recouvrement.

La figure 3-8 présente les résultats obtenus pour les essais Proctor modifiés. Les rejets calcaires phosphatés présentent une teneur en eau à l'optimum Proctor (w_{opt}) de 14,5 % pour une densité sèche optimale de 17,1 kN.m^{-3}.

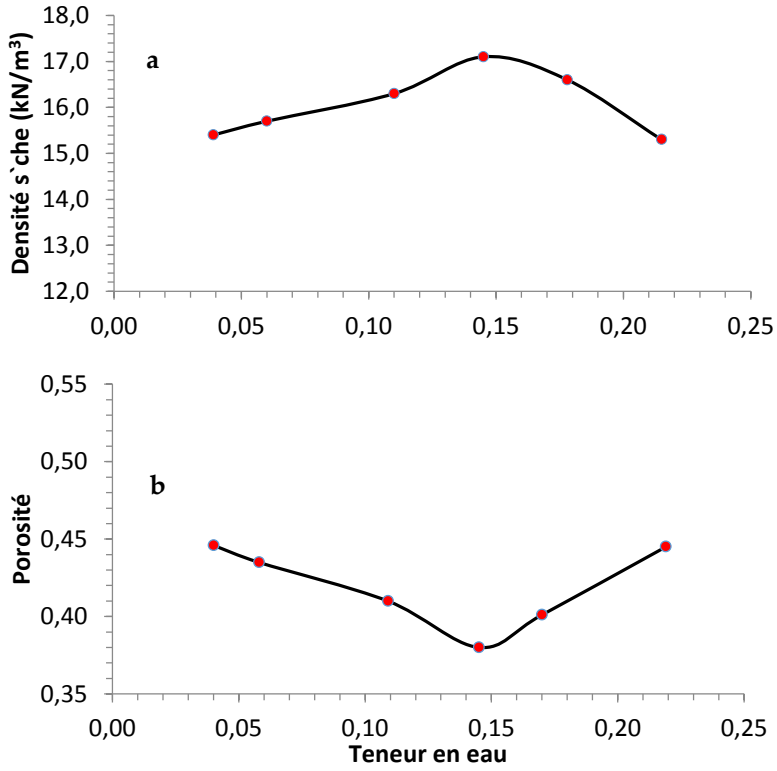


Figure 3.8 : Courbes densité sèche-teneur en eau (a) et porosité –teneur en eau (b) (Bossé, 2014)

3.2.2.4 Caractérisation minéralogique et chimique

Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) par spectrométrie d'émission atomique au plasma à couplage inductif (ICP-AES) et par la fournaise à induction ont été effectuées préalablement à cette étude afin de connaître la minéralogie et la composition chimique des échantillons. Les résultats de la caractérisation minéralogique et chimique sont tirés de Bossé (2014) et Hakkou et al. (2009) et sont présentés ici à titre indicatif.

Les principaux éléments chimiques présents dans les échantillons des rejets calcaires phosphatés sont les CaO (43,0% en masse), P_2O_5 (16,9% en masse), SiO_2 (11,6% en masse), MgO (3,23% en masse), C (5,20% en masse) et les contaminants potentiels tels que F (1,73% en poids), Cr (137 ppm), et Zn (195 ppm).

Cependant, les tests cinétiques effectués par Hakkou et al. (2009) ont montré qu'il n'y a pas de génération importante de contaminants dans les rejets calcaires phosphatés. L'analyse chimique effectuée par Bossé et al (2013) confirme la composition minérale présentée précédemment par Hakkou et al. (2009) avec quatre phases principales: la calcite (25-45%), la fluorapatite (25-45%), la dolomie (20-30%), le quartz (3-10%) et l'ankérite. Les rejets grossiers de Kettara contiennent entre 1,6 et 3,7% en masse de soufre total. Le fer, associé à la pyrrhotite, la pyrite et les oxydes de fer, se trouve en plus grandes quantités (de 17,4 à 22% en masse) comparés aux autres métaux. Des concentrations significatives de Cu (1,110-2,660 ppm) ont également été détectées, avec des quantités plus faibles de Zn (240-500 ppm), Cr (240-330 ppm), Pb (10-80 ppm), Co (30-70 ppm), As (0-70 ppm), Cd (30 ppm), et Ni (40-90 ppm). Les principales phases minérales sont : pyrite, pyrrhotite, chlorite-serpentine et quartz. Plus de détails sur les propriétés géochimiques et minéralogiques des rejets grossiers de la mine Kettara sont présentés dans Hakkou et al. (2008a, b), Khalil et al. (2013), (Ouakibi et al. 2013), Lghoul (2014) et Bossé et al. (2015).

3.2.2.5 Caractérisation hydrogéologique

3.2.2.5.1 Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée peut être définie comme étant la vitesse avec laquelle un fluide circule, sous un gradient donné, à travers les vides d'un sol. Elle ne constitue donc pas une propriété intrinsèque du sol, mais dépend plutôt de facteurs associés aux propriétés du fluide, du solide et de la structure de ce dernier (Fredlund et al. 2012).

La conductivité hydraulique saturée (k_{sat}) des rejets calcaires phosphatés a été mesurée avec un essai de perméabilité à charge variable, selon la norme ASTM D-5856. Cet essai consiste à mesurer le temps nécessaire pour observer une différence de charge (de h_1 à h_2); plus la charge varie rapidement, plus le sol est perméable. La conductivité hydraulique saturée des rejets grossiers de Kettra a été, quant elle, mesurée avec un essai de perméabilité à charge constante, mené selon la norme ASTM 2434. Cet essai, utilisé pour les sols à granulométrie grossière ($k_{sat} > 10^{-3}$ cm/s), consiste à mesurer le débit d'eau évacué de l'échantillon pour une différence de charge constante entre l'entrée et la sortie du perméamètre (Aubertin et al. 2003).

La conductivité hydraulique saturée a aussi été prédite à l'aide du modèle KCM pour les échantillons de rejets calcaires phosphatés. Ce modèle fait intervenir le coefficient d'uniformité du matériau (C_u), son D_{10}, son indice des vides (e), un paramètre C_G (fixé à 0.1 pour un matériau granulaire), un paramètre χ (fixé à 2 pour un matériau granulaire), la densité (ρ_w) ainsi que la viscosité dynamique (μ_w) de l'eau. Ainsi, la conductivité hydraulique saturée pour un matériau granulaire (k_G) se calcule comme suit (Mbonimpa et al. 2002):

$$k_G = C_G * \frac{\rho_W}{\mu_W} * \frac{e^{3+\chi}}{1+e} * C_u{}^{\frac{1}{3}} * D_{10}^2 \qquad 3.1$$

Quant aux rejets grossiers (couche de bris capillaire), le modèle de prédiction utilisé est celui de Chapuis (2004) pour les sols granulaires grossiers qui permet d'estimer la conductivité hydraulique saturée à partir de l'équation suivante :

$$\mathrm{k_{sat}} = 2.4622 \left[\frac{D_{10}^2 . e^3}{1+e}\right]^{0,7825} \qquad 3.2$$

Où D_{10} est en mm.

La conductivité hydraulique moyenne saturée mesurée des rejets calcaires phosphatés est de 3,7 x 10^{-4} cm/s (voir tableau 3-3). La k_{sat} calculée avec le modèle prédictif KCM de Mbonimpa et al. (2002) est de 2 x 10^{-4}cm/s. La masse volumique sèche (ρ_d) est de 1571 kg/m^3 et la porosité des rejets calcaires phosphatés lors de la mise en place dans le perméamètre est de 0,44. Les résultats de la conductivité hydraulique saturée des rejets grossiers de Kettara (5,9 cm/s) sont tirés de Bossé

(2014). Cependant il est à noter que les échantillons de la présente étude n'ont pas été prélevés au même endroit (la digue) ce qui explique la différence entre la k_{sat} prédite par le modèle de Chapuis (0,1 cm/s) et celle mesurée.

Tableau 3.3 : Valeurs de k_{sat} obtenues par approche expérimentale et méthodes prédictives

Matériaux	**k_{sat} (cm/s)**	**k_{sat} (cm/s) prédite**	**Masse volumique sèche ρ_d [kg/m^3]**
Rejets calcaires phosphatés	$3{,}7x10^{-4}$	$2x10^{-4}$ (KCM)	1571
Rejets grossiers de Kettara	5,9	0,1 (Chapuis 2004)	_

3.2.2.5.2 Courbe de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau des rejets calcaires phosphatés est mesurée en laboratoire avec la cellule de pression. C'est une méthode utilisée pour les matériaux fins (ASTM D6836-02) afin de tracer la courbe de rétention d'eau en drainage d'un matériau (voir Fredlund et Rahardjo, 1993, pour plus de détails). Cette méthode consiste à placer un échantillon initialement saturé dans une cellule hermétiquement close dont la base est constituée d'une pierre céramique saturée dont la pression d'entrée d'air est supérieure à la pression maximale appliquée. Une pression d'azote est ensuite appliquée dans la cellule. La pression appliquée dans la cellule entraîne l'écoulement de l'eau de l'échantillon à travers la pierre céramique. À la fin de l'essai, on obtient la variation de teneur en eau volumique θ en fonction de la succion ψ à partir de la différence de masse de la cellule entre chaque palier de pression. Il est important de noter que lors de la mise en place de l'échantillon, les particules supérieures à 2,5 mm ont été enlevées afin de ne garder que la partie fine.

La courbe de rétention d'eau en drainage des rejets calcaires phosphatés obtenue à partir de la cellule Tempe sur un échantillon ayant une porosité n=0,45 a été comparée à des mesures directes de teneur en eau volumique et de succion sur la cellule de terrain (les instruments utilisés sur le terrain pour mesurer θ et ψ seront présentés plus loin dans ce chapitre). La figure 3.9 ci-dessous représente les courbes de rétention d'eau obtenues à partir du modèle descriptif de van Genuchten par Bossé 2014) et les points (θ,ψ) obtenues par mesures expérimentales (cellule Tempe et mesures directes de terrain). Les résultats de la figure 3-9 montrent que les valeurs expérimentales obtenues par la cellule Tempe et les résultats expérimentaux de terrain sont à peu près similaires aux courbes

en drainage et en mouillage obtenue par Bossé (2014). Les résultats de la CRE des rejets grossiers (Figure 3-9) sont extraits de Bossé et al. (2015).

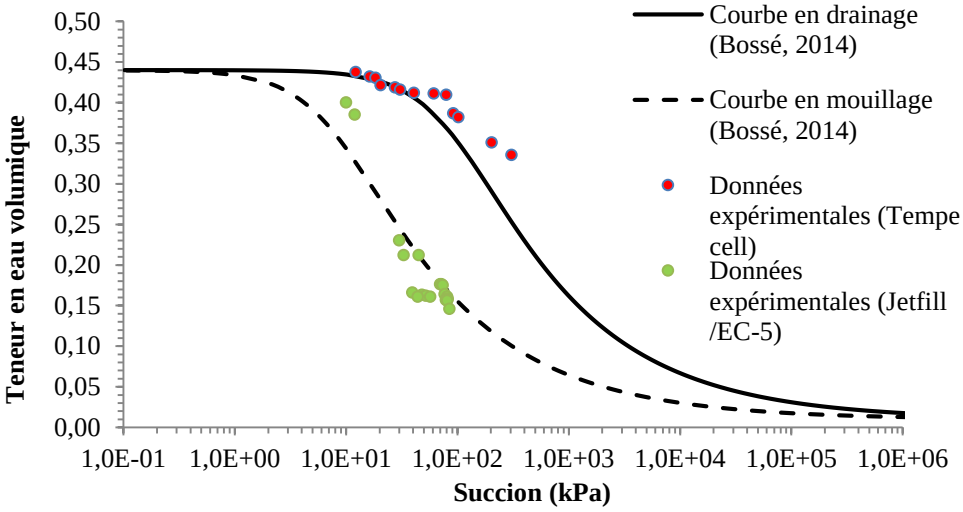


Figure 3.9 **:** CRE obtenues par mesures expérimentales en cellule de Tempe, par mesures directes de terrain et CRE obtenues par Bossé (2014)

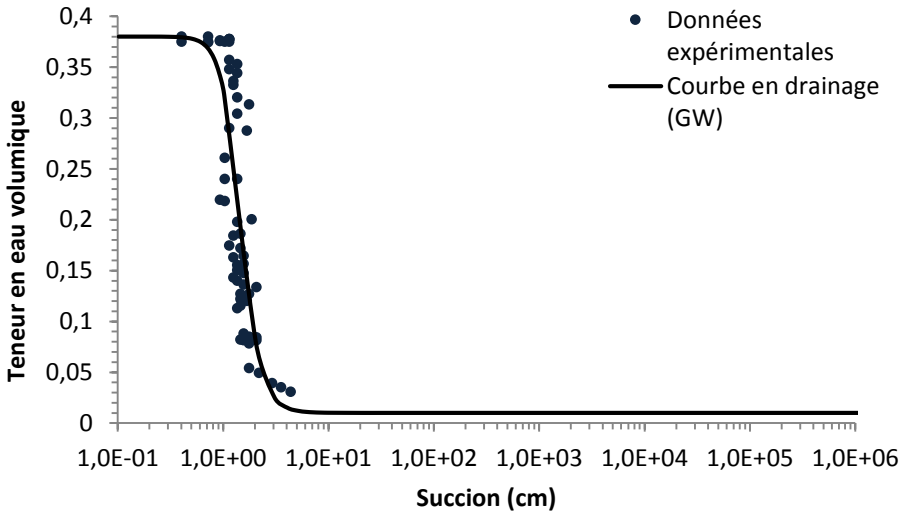


Figure 3.10 **:** Courbe de rétention d'eau (Bossé, 2014)

Le tableau 3-4 présente les principaux paramètres de van Genuchten (1980) déduits des courbes de rétention d'eau obtenues par Bossé, (2014) et qui sont représentatives pour les matériaux testés

dans notre étude. Les valeurs de ψ_a et ψ_r qui sont la valeur de pression d'entrée d'air et la pression résiduelle ont été obtenue avec la méthode des tangentes (voir chapitre 2, section 2.1).

Tableau 3.4 : Paramètres des courbes de rétention d'eau (Bossé, 2014)

Matériel	**ψ_a (kPa)**	**ψ_r(kpa)**	**θ_r**	**θ_s**	**α(kPa^{-1})**	**n**	**m**
Rejets calcaires phosphatés	40	2000	0,01	0,43	0,011	1,43	0,301
Rejets grossiers	1	4	0,01	0,37	0,73	4,94	0,797

À partir de ces résultats, on remarque un contraste important dans les propriétés hydrogéologiques des deux matériaux testés (Figure 3-9 et 3-10), ce qui est nécessaire pour créer les effets de barrière capillaire. Plus spécifiquement, la valeur d'entrée d'air (pression à laquelle le matériau commence à se drainer - ψ_a) des rejets calcaires phosphatés est d'environ 40 kPa (α = 0,011 kPa-1), tandis que la valeur d'entrée d'air des rejets grossiers de Kettara est de 1 kPa. Ainsi le matériau grossier atteint sa valeur d'entrée d'eau (2,8 kPa) avant que le matériau fin ne commence à se drainer ce qui garantit habituellement la présence d'effets de barrière capillaire. En plus, la conductivité hydraulique saturée du matériau grossier est supérieure de plus de trois ordres de grandeur à la conductivité hydraulique saturée des rejets calcaire phosphatés ce qui confirme le contraste hydrogéologique important entre les deux matériaux.

3.3 Localisation de la cellule expérimentale inclinée

La localisation de la zone d'étude expérimentale a été sélectionnée pour sa facilité d'accès. Un autre critère important est la hauteur de la digue qui est de 10 m à cet endroit, ce qui permet de tester une plus grande longueur de pente (figure 3-11).

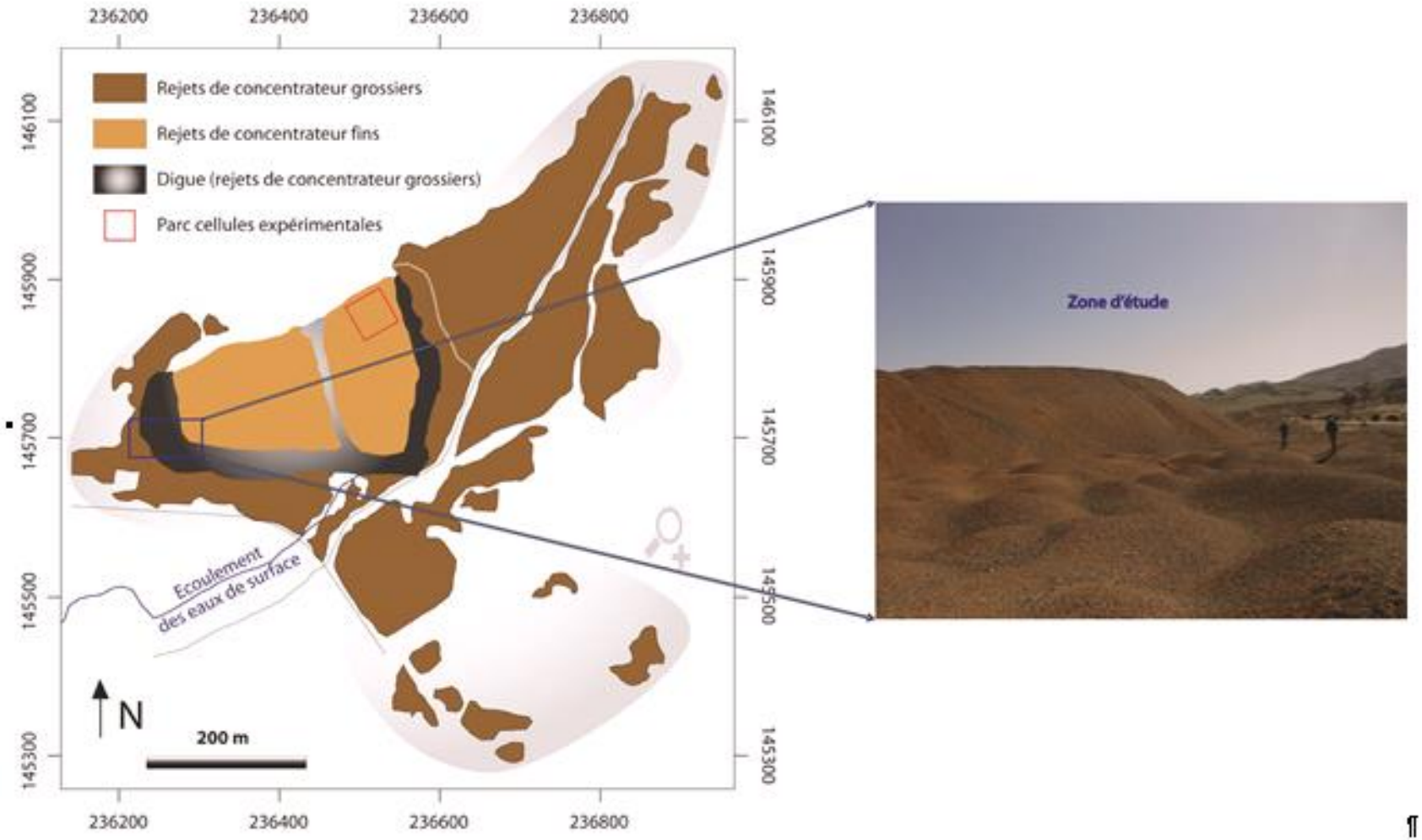


Figure 3.11 : Emplacement choisi pour la construction de la cellule expérimentale inclinée sur le site minier Kettara (Bossé, 2014)

3.4 Conception de la cellule

La couverture SR testée est composée de deux couches: la première est la couche de rétention d'eau constituée de 0,8 m de rejets calcaires phosphatés placée sur la deuxième couche constituée de rejets grossiers de Kettara (couche de bris capillaire). La pente est d'environ 14,5 degrés et la cellule est construite sur une zone de 10 m x 34 m. Une représentation schématique 3D de la cellule SR inclinée instrumentée est présentée à la figure 3-12.

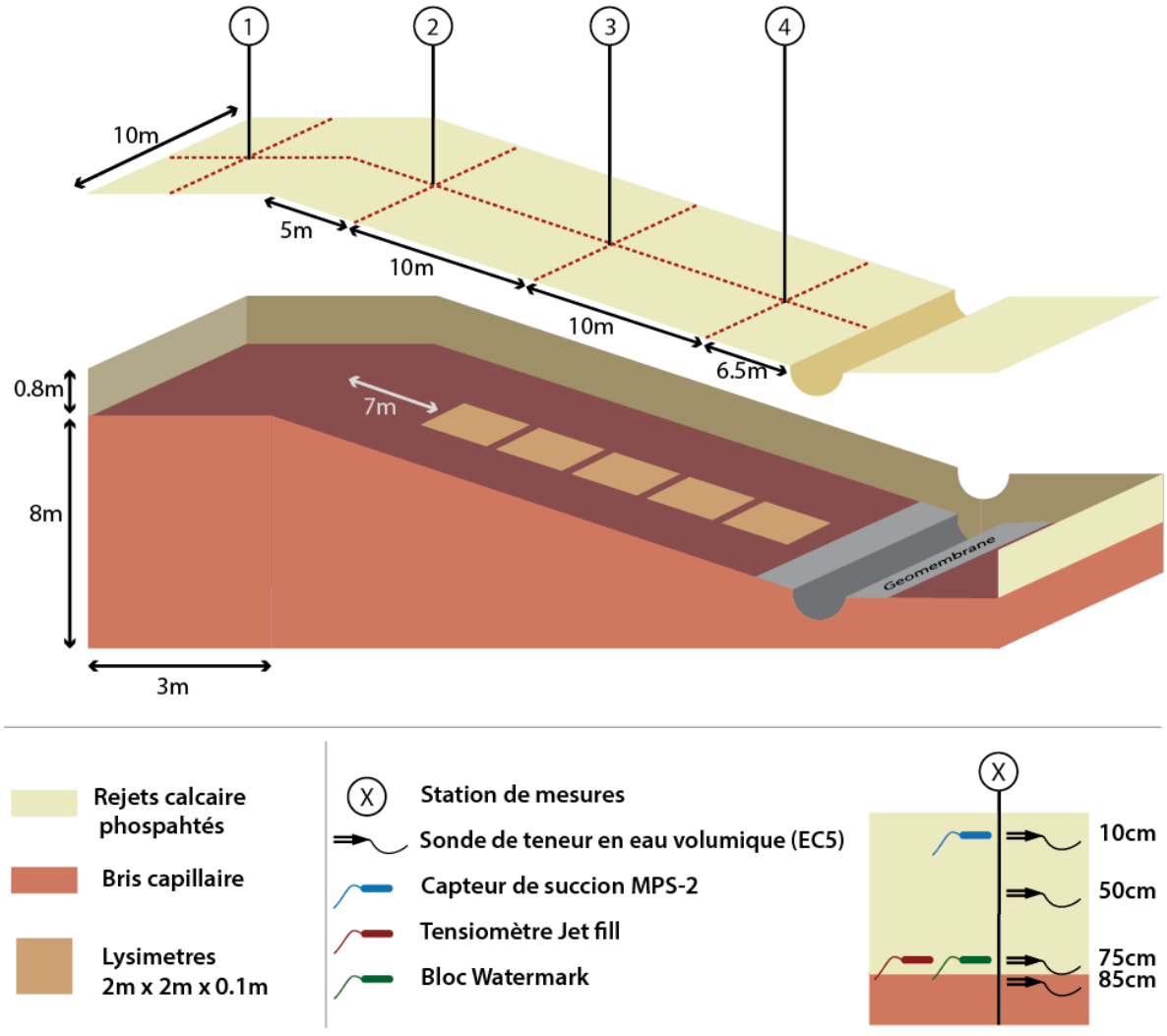


Figure 3.12 : Configuration schématique 3D de la cellule inclinée

Comme mentionné précédemment, la cellule expérimentale a été construite directement sur la digue. La digue a une hauteur de 8 m et est composée de rejets grossiers réactifs de la mine. Les travaux de construction ont débuté en mars 2014 et se sont terminés en mai 2014. On présente dans ce qui suit les étapes de la construction de la cellule. Des photographies sont utilisées pour illustrer les travaux de construction réalisés de la cellule.

3.4.1 Étape 1 : Nivellement de la pente

La conception de la cellule expérimentale inclinée, disposée directement sur la digue à rejets grossiers du site minier abandonné de Kettara, a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, la cellule a été délimitée dans l'espace, sur la digue des rejets grossiers, ensuite la pente a été aplanie d'une pente de départ d'environ 37-45° à 14,5° et compactée (figure 3-13) afin d'obtenir une porosité n d'environ 0,37 (densité sèche = 18,3 kN / m^3).

Figure 3.13 : Nivellement de la digue

3.4.2 Étape 2 : Installation des lysimètres

Pour évaluer le comportement hydrogéologique d'un recouvrement SR, déterminer son efficacité à dévier l'eau et identifier la position du point DDL, l'utilisation des lysimètres semble être une bonne méthode. Dans cette étude, cinq lysimètres (2 m x 2 m x 0,1 m) ont été installés dans les rejets grossiers (figure 3-14 a et b) pour mesurer la percolation de l'eau dans les rejets miniers grossiers de Kettara sous-jacents, en cas de rupture du bris capillaire, à une profondeur de 90 cm de la surface de la couverture (10 cm au-dessous des rejets grossiers). Chaque lysimètre est relié à

un tuyau où l'eau recueillie s'écoule par gravité. Cette eau est ensuite collectée dans un récipient (figure 3-14 c et d).

Figure 3.14 : Mise en place des lysimètres (a), collecte des eaux de percolation (b, c et d),

3.4.3 Étape 3 : Mise en place de la couche calcaire phosphatée

Environ 1000 tonnes de rejets calcaires phosphatés provenant du site recette VI ont été placées sur la digue aplanie des rejets grossiers (figure 3-15 a et b). Ces rejets ont été mis en place en des couches successives de 20 cm d'épaisseur pour assurer une densité uniforme. Chaque couche a été ensuite compactée à l'aide d'un compacteur manuel à leur teneur en eau gravimétrique naturelle (entre 4% et 9%), à une porosité d'environ 0,44. Le compactage a donc permis d'atteindre une densité sèche d'environ 15 kN/m^3 ce qui correspond à environ 90% de la densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié (figure 3-15 c). Les gros blocs enlevés ont servis pour faire le gabionnage sur les côtés (figure 3-15 d).

Figure 3.15 **:** Mise en place et compactage de la couche calcaire phosphatée (a et b) mise en place des rejets calcaires phosphatés (c) compactage manuel des rejets calcaires phosphatés (d) vue de la cellule inclinée après la mise en place de la couche de rejets phosphatés

Il est important de noter que les différents matériaux (rejets calcaires phosphatés et rejets grossiers de Kettara) ont été installés directement sans modifier leur teneur en eau initiale et ce, afin de limiter les changements des propriétés hydrogéologiques des matériaux après la construction (Benson et al. 2007). Cependant, au cours de la construction, plusieurs événements pluvieux ont eu lieu (figure 3-16), modifiant la teneur en eau des différentes couches du recouvrement.

Figure 3.16 : Événement de pluie lors de la mise en place de la couche SR

3.4.4 Étape 4 : Emplacement des drains

Un système de drainage a été installé en bas de pente afin de collecter les eaux de ruissèlement et faciliter le contrôle des eaux météoriques (figure 3-17 a). Ce système se présente sous forme d'un demi-tube en PVC relié à un récipient pour connaître la quantité d'eau récoltée.

Un autre drain a été installé dans les rejets grossiers pour collecter les eaux qui s'accumulent à l'interface entre les deux matériaux (figure 3-17 b). Il est fait d'une géomembrane et de gravier. La géomembrane a été reliée à un tuyau et ce dispositif a ensuite été fixé (tuyaux et géomembrane) à l'aide de ruban adhésif et de colle (voir annexe 3). La couche de gravier dans le drain est d'une épaisseur de 20 cm environ. Composée d'un matériau drainant neutre, elle sert à faciliter la percolation de l'eau jusqu'au drain. Cette couche de gravier est installée tout en conservant les pentes établies pour faciliter le drainage. Il est important de rappeler que les deux drains ont été placés de façon à ce que l'eau puisse s'écouler par gravité vers le côté de la cellule expérimentale.

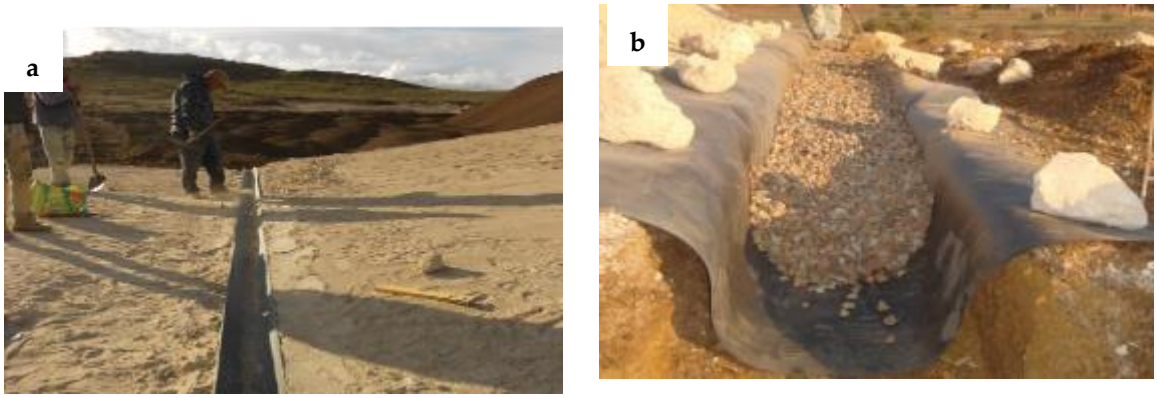


Figure 3.17 : Installation d'un drain de surface (a) et de la géomembrane pour récupérer les eaux s'écoulant à l'interface entre la couche de bris capillaire et la couche de rétention d'eau (b)

3.5 Instrumentation et suivi

Le comportement hydrogéologique de la cellule expérimentale inclinée a été évalué sous des conditions naturelles et extrêmes. Pour cela, celle-ci a été instrumentée dans le but de faire un suivi hydrogéologique et environnemental adéquat. Les principaux paramètres mesurés dans la cellule inclinée sont la teneur en eau volumique, la succion matricielle, les écoulements (ruissellement, percolation et écoulement à l'interface) ainsi que les conditions météorologiques du site minier.

Pour évaluer l'efficacité des différents recouvrements et voir si les effets de barrière capillaire escomptés sont présents, il est primordial de connaître le comportement hydrogéologique des teneurs en eau volumiques dans les différentes couches et à différentes profondeurs. Pour ce faire, quatre stations de mesures ont été installées près de l'axe central de la cellule (figure 3-18). Les stations de mesures sont espacées de 10 m et chacune des stations contient des sondes de teneur en eau volumique, des capteurs de succion matricielle (deux types : MPS-2 et Watermark), et des tensiomètres Jetfill à différentes profondeurs dans les rejets calcaires phosphatés (couche SR); des instruments de mesure (sondes de teneur en eau volumique : EC-5) ont également été installés dans le bris capillaire afin d'identifier s'il y a percolation et, par le fait même, disparition des effets de barrières capillaire (voir figure 3-11, section 3.4 et figure 3 -12).

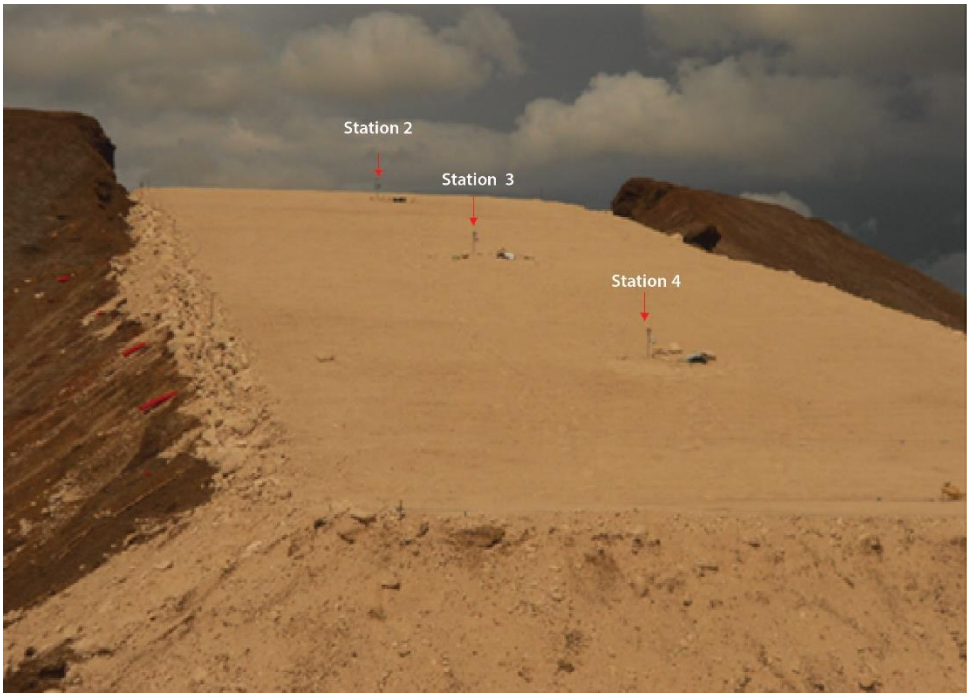


Figure 3.18 **:** Stations de mesures 2, 3 et 4 de la cellule inclinée (la station 1 est sur la partie plane en haut de la pente)

3.5.1 Teneur en eau volumique

Dans cette étude, les changements de teneurs en eau volumiques sont estimés en utilisant des capteurs d'eau volumétrique ECH2O, plus précisément des sondes EC5 (figure 3-19 d). Ces dernières ont été choisies pour mesurer la teneur en eau volumique dans la couche SR de calcaire phosphatée et dans les rejets grossiers de Kettara.

Les changements de la teneur en eau volumique peuvent être détectés à partir des variations de la fréquence du circuit. Cela est fait par les sondes EC5 qui mesurent la permittivité (ε) (ou constante diélectrique) d'un matériau poreux; cette propriété est fonction des permittivités de ses constituants; soient l'air (1), les particules minérales (entre 2 et 5) et l'eau (environ 80) (Maqsoud et al. 2007b). Cet équipement a été utilisé avec succès dans des études précédentes (ex. Bossé, 2014).

L'enregistrement des teneurs en eau se fait à l'aide d'un système d'acquisition de données Em50 (figure 19a). Les sondes EC5 génèrent des données en volts (Decagon 2014). Les sondes ont été calibrées (voir Annexe 4), permettant ainsi de corriger directement la mesure de la constante

diélectrique et de la convertir en teneur en eau volumique réelle. Les sondes EC-5 placées horizontalement (figure 3-19 d) ont été localisées à 10, 50, 75, 85 cm de profondeur dans les quatre stations de mesure (voir figure 3-12 section 3.3). Le tableau 3.5 présente les caractéristiques des sondes EC-5.

Tableau 3.5 : Caractéristiques des sondes EC-5 utilisées

Appareil	**Mesure**	**Technique**	**Gamme de mesures**	**Précision**	**Position par rapport à la surface**
EC-5	Teneur en eau volumique	Frequency domaine	0 à 100 %	± 0,03 m^3/m^3	10cm, 50 cm, 75 cm et 85 cm

3.5.2 Succion matricielle

Dans la cellule inclinée, trois types d'appareils ont été utilisés pour mesurer la succion matricielle : les tensiomètres Jetfill, les blocs Watermark et les senseurs MPS-2.

Le tensiomètre Jetfill (figure 3-19 a) est composé d'un embout poreux de céramique fixé à l'extrémité d'un tube. L'autre bout du tube se termine par un bouchon par où il est possible d'insérer de l'eau déionisée. Le tensiomètre s'utilise en plaçant le bout poreux à l'endroit où l'on veut mesurer la succion dans le sol et en remplissant l'appareil d'eau jusqu'au niveau de l'appareil de mesure. Après un certain temps, la pression entre l'embout poreux et le sol s'équilibre; (Stannard 1990, Singh and Kuriyan 2003, Maqsoud et al. 2007b, Fredlund et al. 2012, Rahardjo et al. 2012). La pression négative est alors transmise par l'eau jusqu'à l'appareil de mesure qui indique la succion dans le sol. Les tensiomètres donnent des mesures quasi-instantanées et peuvent mesurer des succions variant entre 0 et 85 kPa (Bussière, 1999; Soilmoisture, 2011).

Les blocs Watermark (figure 3-19 b) mesurent la variation de la résistance électrique d'une matrice de silice calibrée et déduisent, à partir de celle-ci, la succion (Shock et al. 1998, Shock et al. 2005). Plus la teneur en eau est élevée, plus la conductivité électrique de la matrice est élevée et, par conséquent, plus la résistance est faible. Un appareil de mesure convertit le signal électrique en une succion matricielle calibrée. Le capteur à matrice granulaire peut mesurer des succions proches de la saturation du sol avec des mesures comprises entre 0 et 200 kPa. Les mesures sont plus précises pour des valeurs de succion entre 5 et 80 kPa (Aubertin et al. 1999). Les avantages du bloc

Watermark par rapport à d'autres instruments sont qu'il ne se dissout pas dans le sol, que la relation entre la conductivité mesurée par l'appareil et la succion matricielle est linéaire et qu'il n'a pas besoin d'être calibré. Cependant, ce capteur est connu pour être influencé par la salinité de l'eau. Une réinstallation du capteur est nécessaire pour des sols devenant très secs. Dans la cellule inclinée expérimentale, les blocs Watermark et les Jetfill ont été placés à une profondeur de 75 cm. À cet endroit, on s'attend à ce que les succions soient plus faibles (<50 kPa) que près de la surface (Bossé, 2014).

Les capteurs MPS-2 de Decagon (figure 3-19c) ont été utilisés pour mesurer la succion dans la couche de rétention d'eau à une profondeur de 10 cm. Ce capteur mesure la permittivité diélectrique d'une matrice solide (généralement des disques poreux en céramique) pour déterminer la succion dans le sol. La permittivité diélectrique des disques céramiques étant fortement liée à la quantité d'eau présente, il est possible de déterminer la teneur en eau volumique des disques. Finalement, la quantité d'eau dans les disques céramiques et la succion sont reliées par une relation unique (CRE), qui permet d'avoir une courbe de calibrage standard pour tous les types de sol. L'enregistrement des données des capteurs MPS-2 se fait automatiquement au moyen d'un système d'acquisition de données Em50 (figure 3-19a). Il est à noter que pour l'installation des sondes MPS-2, des rejets humides ont été placés autour de la sonde, en s'assurant que toute la surface de la sonde soit recouverte de matériel humide. On retrouve l'emplacement des appareils servant à mesurer la succion (tensiomètres, blocs Watermark et capteurs MPS-2) à la figure 3-12 de la section 3.4. On remarque que vis-à-vis de chaque instrument de mesure de la succion, on retrouve une sonde EC-5. Cela permettra d'obtenir des points θ-ψ qui permettent d'estimer la CRE *in situ*.

Il a été décidé de placer les MPS-2 à 10 cm de la surface de mesure étant donné que cet appareil peut mesurer des valeurs élevées de succions (allant de 10-500 kPa) (Decagon 2009, Bossé 2014). Quant aux Jetfill et Watermarks, ils sont utilisés à l'interface des deux matériaux pour avoir plus de précision à succion faible. On rappelle que cette zone près de l'interface est importante puisque la mesure de la succion va nous renseigner sur la limite de bas de pente (DDL), autant en conditions naturelles que lorsque l'on simule un évènement de précipitation important à la surface.

La prise de mesures des tensiomètres et des Watermark est effectuée trois fois par semaine, alors que la surveillance pour les capteurs EC5 et MPS-2 se fait toutes les 30 minutes en conditions naturelles et toutes les 2 minutes durant la simulation des évènements de précipitation artificiels.

Ces évènements seront détaillés dans les parties suivantes. Un résumé des caractéristiques de l'instrumentation choisie pour le projet est présenté au tableau 3-6.

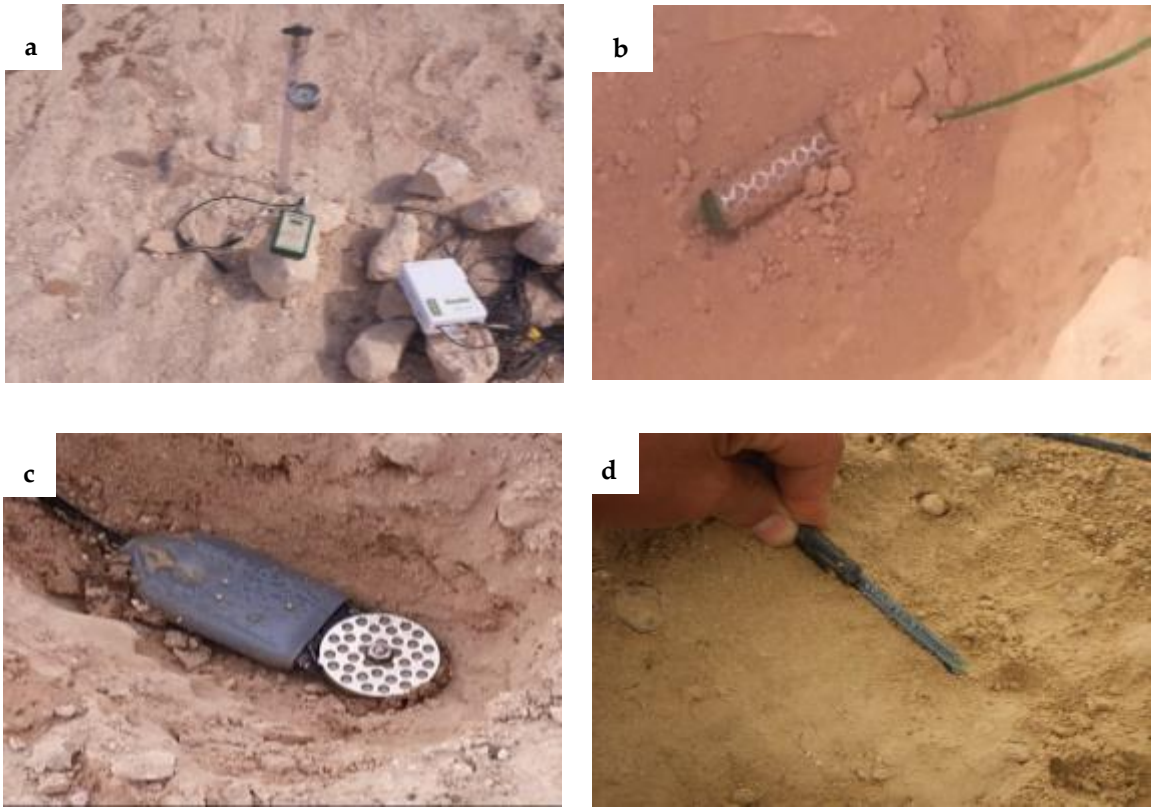


Figure 3.19 : Instrumentation utilisée dans la cellule inclinée; a) Tensiomètre Jetfill et système d’acquisition Em 50; b) bloc Watermark; c) sonde EC 5; d) capteur MPS-2

Tableau 3.6 : Caractéristiques des instruments de mesure de succion utilisés (MPS-2/ Jetfill/ bloc Watermark)

Appareil de mesure	Gamme de mesure	Résolution	Position par rapport à la surface	Précision	Utilisé sur le terrain dans des recouvrements
MPS-2	10 à 500 kPa	0,1 kPa pour 5 à 100 kPa	10 cm	±25 % de la lecture en kPa	Bossé (2014) Maqsoud et al. (2015)
Tensiomètre	0-80 kPa	_	75 cm	1 kPa	Rahardjo et al. (2012); Bussière et al. (2006)
Watermark	0-200 kPa	_	75 cm	1 kPa	Maqsoud et al. (2012); Bussière et al. (2006)

3.5.3 Suivi des conditions météorologiques

Une station météorologique complète (HOBO U30) a été installée au site minier Kettara afin d'effectuer le suivi des conditions météorologiques (figure 3-20). La station permet de mesurer plusieurs paramètres: la température, l'humidité relative de l'air, les précipitations, la vitesse et la direction des vents (voir Bossé, 2014, pour plus de détails). Dans le cadre de cette étude, on vise à estimer les paramètres clés que sont les précipitations et l'évaporation réelle. Ces paramètres permettront d'évaluer la capacité de stockage et de déviation de la couverture SR.

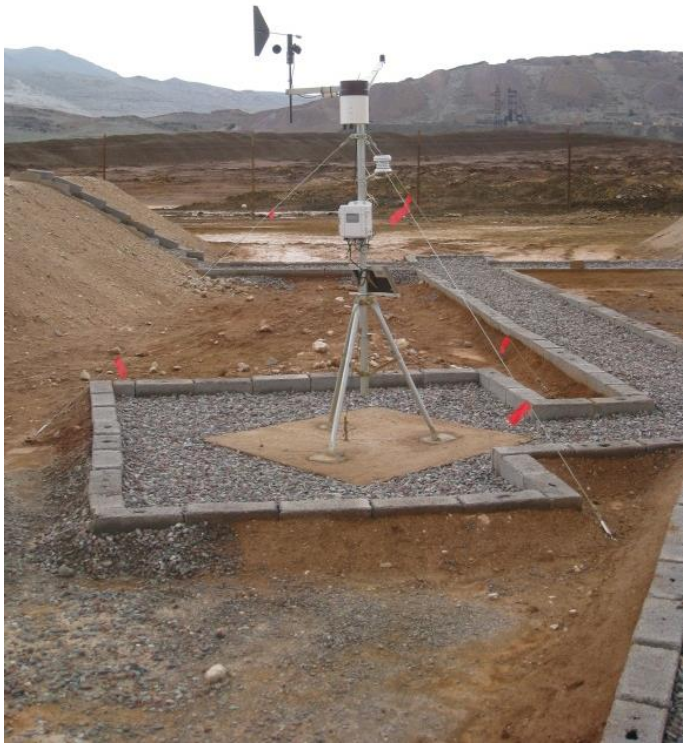


Figure 3.20 : Station météorologique installée au site Kettara

3.6 Contrôle qualité durant la construction

Lors de la construction, un programme de contrôle et d'assurance qualité a été élaboré pour les deux matériaux utilisés dans le recouvrement. Les essais de contrôle qualité ont été effectués tout au long de la construction (avant la mise en place, lors de la mise en place et après) afin de s'assurer de l'homogénéité des matériaux, de leur teneur en eau, du compactage, de la porosité ainsi que de la granulométrie des rejets calcaires phosphatés et du bris capillaire (rejets grossiers de Kettara).

L'objectif principal du programme de contrôle vise à s'assurer que le matériau présente les propriétés recherchées pour la fonction auquel il est destiné, notamment une conductivité hydraulique saturée, une granulométrie et une porosité qui répondent aux exigences requises. Étant donné que la mise en place s'effectue par compactage de couches horizontales successives de 20 cm, un contrôle qualité est effectué sur les différentes couches. Les parties suivantes décrivent les essais de contrôle qualité effectués pour le bris capillaire (rejets grossiers de Kettara) et les rejets calcaires phosphatés.

3.6.1 Rejets grossiers de Kettara

Avant la mise en place des rejets calcaires phosphatés, quatre échantillons des rejets grossiers ont été prélevés afin de s'assurer que leurs propriétés soient similaires au matériau utilisé dans les travaux antérieurs de Bossé (2014).

Le tableau 3-7 présente les paramètres granulométriques des rejets grossiers de Kettara. Les coefficients d'uniformité C_U (=D_{60}/D_{10}) et de courbure C_C (($D_{30}^2/(D_{60}*D_{10})$) varient respectivement entre 55 et 6,5 et entre 3 et 0,96. Les résultats montrent que ces rejets sont classifiés comme un gravier (GW), selon le système de classification des sols unifiés (USCS; McCarthy, 2007). La figure 3-21 montre les résultats des analyses granulométriques au tamis. Plus de détails sur les résultats de la granulométrie sont présentés à l'annexe 5.

La porosité *in situ* des rejets grossiers de Kettara varie de 0,3 à 0,37 et la teneur en eau lors de la mise en place a varié entre 9 et 11%.

Tableau 3.7 **:** Paramètres granulométriques des rejets grossiers de Kettara

Numéro d'échantillon	**D_{10} (mm)**	**D_{30} (mm)**	**D_{50} (mm)**	**D_{60} (mm)**	**C_U**	**C_C**
1	1	2,5	5	6,5	6,5	0,96
2	0,1	1,3	3,75	5,5	55	3
3	0,5	2,5	4,75	6,5	13	1,9
4	0,3	1,8	4,5	6	20	1,8

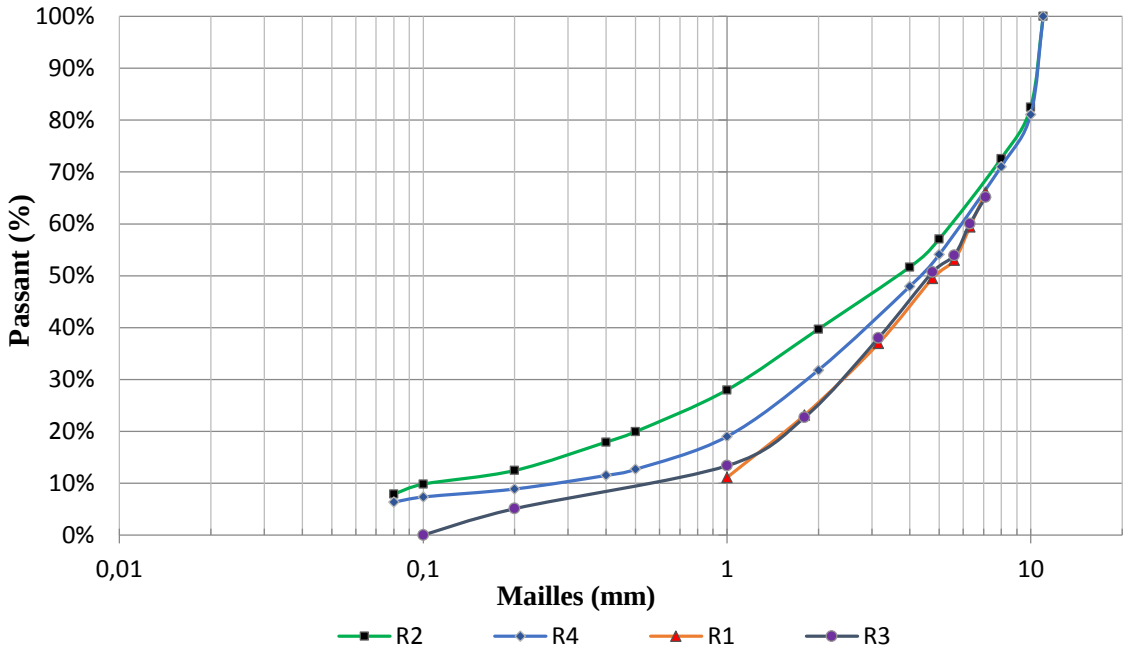


Figure 3.21 : Courbes granulométriques typiques des rejets grossiers de Kettara (bris capillaire)

3.6.2 Rejets calcaires phosphatés

Lors de la mise en place de la couche SR composée de rejets calcaires phosphatés, des analyses granulométriques ont été effectuées sur six échantillons. Suite à ces premières analyses et étant donné que les résultats granulométriques et l'aspect visuel des échantillons étaient très proches, le matériau a été considéré comme homogène. Pour des raisons de lisibilité du graphique, les courbes de quatre analyses granulométriques sont présentées à la figure 3-22.

Le tableau 3-8 présente certains paramètres granulométriques des quatre échantillons de rejets calcaires phosphatés. Ces résultats montrent que ce matériel est légèrement plus grossier que celui présenté par Bossé (2014). De plus, les courbes granulométriques sont très similaires, on peut donc s'attendre à ce que la couche de rétention d'eau ait des propriétés hydrogéologiques homogènes dans la pente.

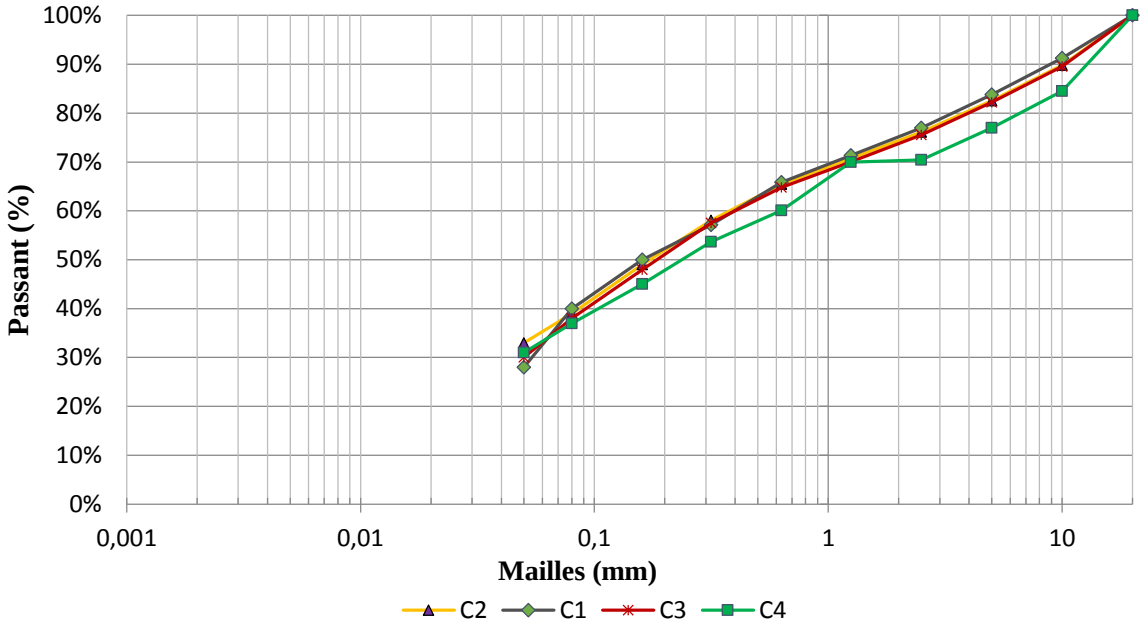


Figure 3.22 : Courbes granulométriques des rejets calcaires phosphatés

Tableau 3.8 : Paramètres granulométriques des rejets calcaires phosphatés

Numéro d'échantillon	**D_{10} (mm)**	**D_{30} (mm)**	**D_{50} (mm)**	**D_{60} (mm)**
1	_	0,05	0,16	0,4
2	_	0,04	0,16	0,4
3	_	0,05	0,19	0,4
4	_	0,05	0,25	0,65

En plus des analyses granulométriques, des analyses de teneur en eau, de densité sèche et de porosité ont aussi été réalisées. Des échantillons ayant un volume connu ont été utilisés pour calculer la porosité *in situ* (figure 3-23 a et b). Les résultats de ces essais sont présentés en détails à l'annexe 5. En résumé, pendant la mise en place des couches, la teneur en eau gravimétrique varie

entre 4% et 9%, la masse volumique sèche entre 1.5 et 1,6 g/cm^3, ce qui correspond à une porosité entre 0,4 et 0,44.

Enfin, après la construction, les dimensions et l'angle de la pente ont été mesurées à l'aide d'une station totale (figure 3-23 c).

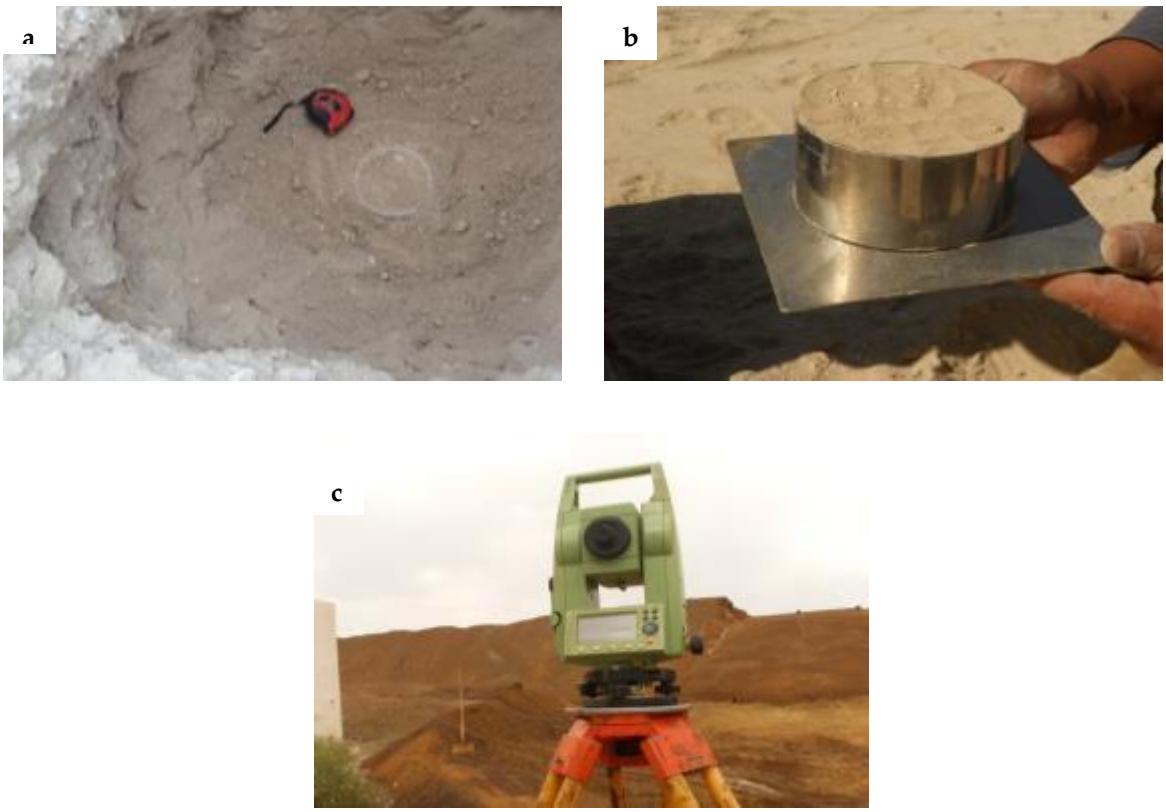


Figure 3.23 **:** Essais de contrôle qualité : a) et b) mesure de la porosité in situ; c) mesure de l'angle de la pente à l'aide d'une station totale

3.7 Application des conditions extrêmes

Le comportement hydrogéologique d'un recouvrement SR, suite à la simulation d'un événement de précipitation important représentant des conditions peu probables, est souhaitable lorsque l'on veut faire le design de ce type de recouvrement. En outre, cet essai permet d'approfondir la compréhension de phénomènes qui interviennent lors du design d'un système alternatif, tels que les interactions sol-atmosphère et la capacité de déviation d'eau (localisation du point DDL).

Le comportement hydrogéologique de la cellule inclinée a été évalué sous des conditions climatiques naturelles et sous des précipitations importantes pour la région pendant une année. Plus spécifiquement, deux simulations d'événements de précipitations importantes ont été appliquées durant la période de suivi. Le premier événement simule une précipitation de 100 mm en presque 48 heures. L'événement a été simulé le 28 avril 2014 après la construction (Figure 3-24). Ensuite, le système a été laissé en conditions naturelles afin d'évaluer son comportement hydrogéologique après simulation d'un événement extrême. Le deuxième événement simule une précipitation de 155 mm en 48 heures. L'événement a été simulé à la fin de la période de suivi le 18 novembre 2014 (Figure 3-24). Ces événements de précipitation importants ont été définis en se basant sur les travaux de Bossé (2014).

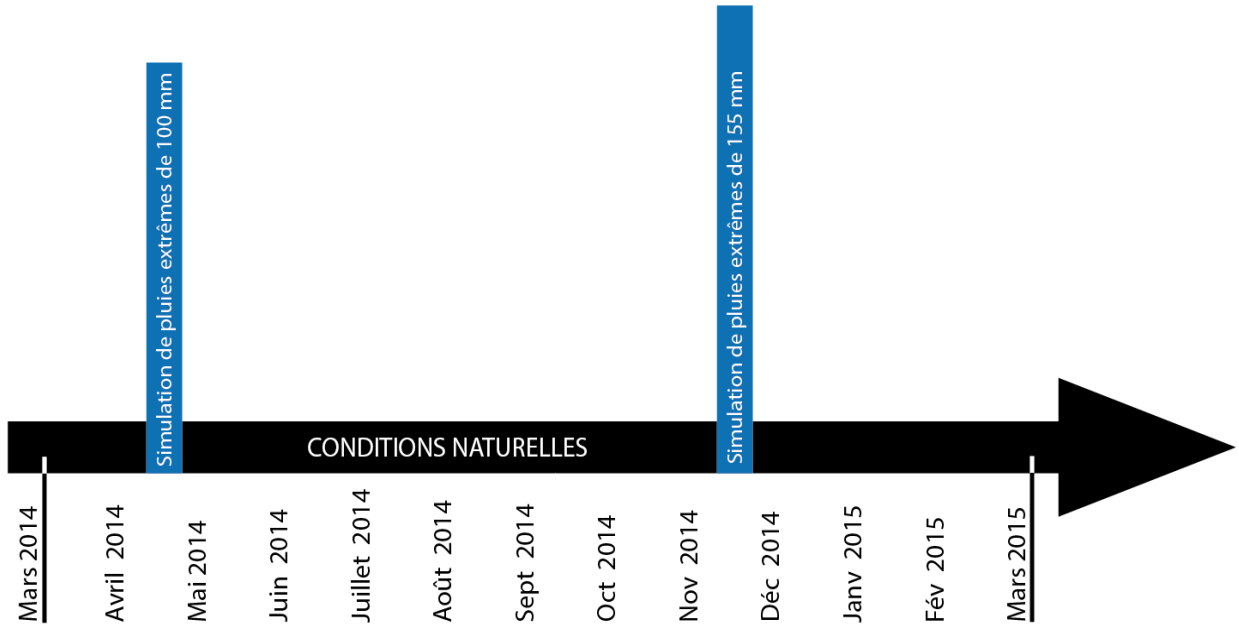


Figure 3.24 : Échelle de temps pour les simulations des conditions extrêmes

3.7.1 Premier événement de précipitation (100 mm)

Comme mentionné précédemment, le matériau de la couche de rétention d'eau (couche SR) a été mis en place avec des teneurs en eau différentes à cause des événements de pluie qui ont eu lieu lors de la construction. Le premier événement (100mm/48h) a été appliqué dans le but de rétablir les conditions initiales du matériau. Cet événement a été réalisé à partir d'une citerne d'eau d'une dimension de 5 m^3. L'acheminement de l'eau jusqu'à la cellule a été effectué à l'aide d'un système

d’irrigation relié à une pompe (figure 3-25). Le système d’irrigation est composé de tuyaux à gouteurs intégrés espacés d’un mètre.

3.7.2 Deuxième événement de précipitation (155 mm)

La simulation des 155 mm a également été faite à l’aide d’un système d’irrigation. L’espacement entre les tuyaux à gouteurs intégrés est réduit à 0,5m afin d’appliquer une plus grande quantité d’eau sur la cellule inclinée. L’eau a été acheminée en reliant le système d’irrigation a un bassin rempli d’eau, l’eau a été pompée du bassin à l’aide de deux pompes (figure 3-26). Plusieurs mesures de débit ont été effectuées sur le système d’irrigation afin de vérifier que le débit pompé en haut de la pente est similaire à celui pompé en bas de pente (voir annexe 6).

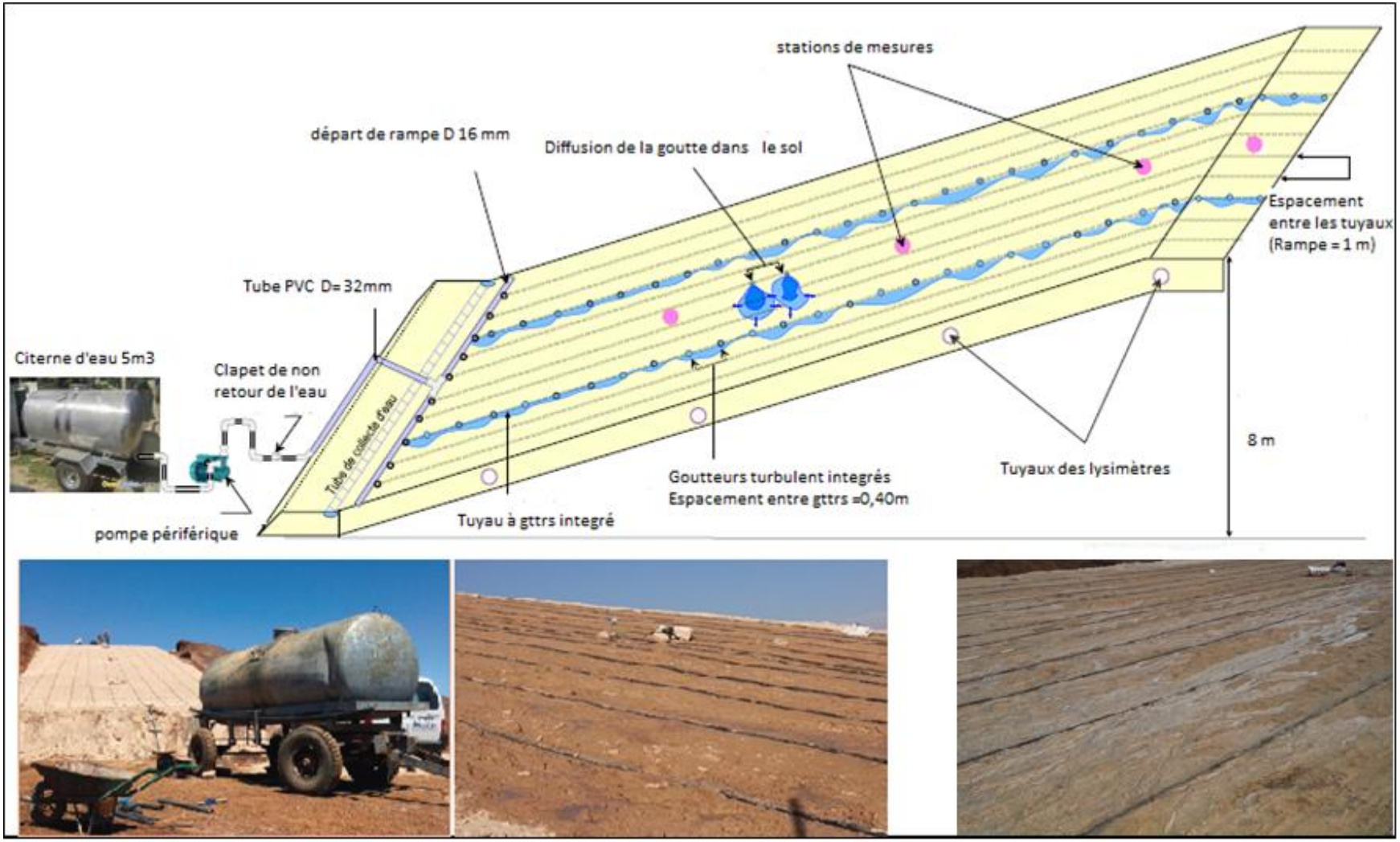


Figure 3.25 **:** Mise en place du système d'irrigation pour simuler 100 mm

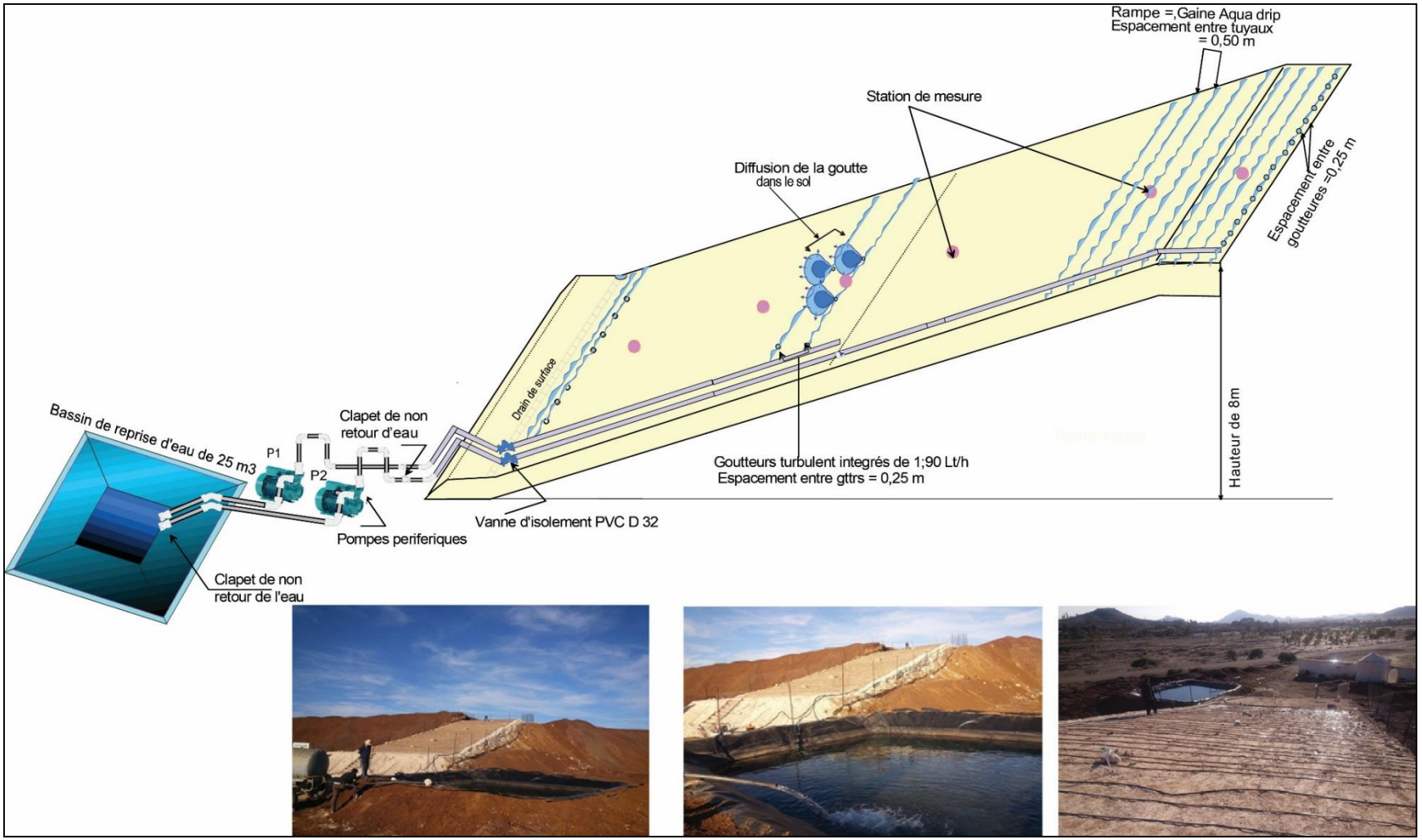


Figure 3.26 : Mise en place du système d'irrigation pour simuler 155 mm

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : HYDROGEOLOGICAL BEHAVIOUR OF AN INCLINED STORE-AND-RELEASE COVER EXPERIMENTAL CELL MADE WITH PHOSPHATE MINE WASTES[1]

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus dans la cellule expérimentale construite au site Kettara pour évaluer l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique du recouvrement SR constitué de 80 cm de rejets calcaires phosphatés. Il correspond à un manuscrit qui a été soumis à la Revue Canadienne de Géotechnique. En plus des résultats hydrogéologiques, l'article présente une brève description de la cellule expérimentale ainsi que des propriétés des matériaux qui sont un rappel de ce qui a été présenté au Chapitre 3 du présent mémoire.

4.1 Abstract

A field study was conducted at the Kettara mine site located in arid climatic conditions in Morocco. The goal was to assess the performance of an inclined store-and release (SR) cover made with phosphate mine wastes to reduce water infiltration and control acid mine drainage (AMD). The tested SR cover was made of phosphate mine wastes (0.8 m) placed over a capillary break layer (CBL) made of coarse-grained materials. The SR cover had an inclination slope of 14.5 degrees. The cover performance was monitored for a period of one year under natural and artificial conditions representing significant rainfall events for the Kettara Mine site climatic conditions. Performance was monitored using volumetric lysimeters, suction sensors, and volumetric water content sensors installed at four stations and at different strategic depths. Under natural climatic conditions, the inclined SR cover limited water percolation by diverting and releasing water to the atmosphere through the physical process of evaporation. However, at a precipitation rate >100 mm in 48 hours, the cover was unable to store and divert all the water, and percolation was observed in the lysimeters. Hence, the results confirmed the suitability of phosphate mine wastes as cover

[1] Knidiri, J., Bussière, B., Hakkou, R., Bossé, B., Maqsoud, A., Benzaazoua, M., 2016. Hydrogeological behaviour of an inclined store-and-release cover experimental cell made with phosphate mine waste. (article soumis à la Revue Canadienne de Geotechnique)

material for an inclined (≈14,5°) SR cover placed over the Kettara Mine wastes in natural climatic conditions and for precipitation events less than 100 mm in 48 hours.

Key words: store-and-release (SR) cover, acid mine drainage, mine site reclamation, experimental inclined cell, Kettara mine site, unsaturated flow

4.2 Résumé

Une étude *in situ* a été menée à la mine de Kettara, située en climat semi-aride au Maroc, afin d'évaluer la performance d'une couverture inclinée de type stockage-relargage (SR) pour limiter l'infiltration de l'eau et la formation du drainage minier acide (DMA). La cellule expérimentale inclinée (14,5°) testée est constituée de rejets calcaires phosphatés (0,8 m) placés directement au-dessus des rejets grossiers de Kettara qui va permettre de créer les effets de barrière capillaire. La performance de la couverture a été évaluée pour une période d'une année sous des conditions climatiques naturelles et artificielles simulant des précipitations importantes pour les conditions climatiques de Kettara. Le suivi du comportement hydrogéologique s'effectue en utilisant des lysimètres, des tensiomètres, des senseurs de succion matricielle ainsi que des senseurs de teneur en eau volumique installés à des profondeurs stratégiques dans quatre stations de monitoring. Sous les conditions climatiques naturelles, la couverture SR inclinée a limité la percolation d'eau et toutes les infiltrations ont été déviées et reprises par l'atmosphère à l'aide de l'évaporation. Cependant, lors de l'application de précipitations artificielles importantes (>100 mm en 48 heures), la couverture n'a pas été en mesure de stocker et de dévier toute l'eau et la percolation a été observée dans les lysimètres au pied de la pente. Les résultats de cette étude ont confirmé le potentiel de rejets miniers phosphatés en tant que composante principale d'une couverture SR inclinée (≈14,5°) placée sur les rejets grossiers de Kettara en conditions climatiques naturelles et pour des événements de précipitations inférieures à 100 mm en 48 heures.

Mots-clés : Couverture stockage-relargage (SR), drainage minier acide, restauration de site minier, cellule expérimentale inclinée, site minier de Kettara, écoulement non saturé.

4.3 Introduction

Engineered cover systems are commonly used to prevent and minimize water percolation through landfill or radioactive mine waste disposal areas in order to control contaminant release to the surrounding environment. In recent decades, alternative cover systems designed to store and release water and prevent water from percolating into the underlying wastes have been successfully applied in arid and semi-arid climates (Albright et al. 2004; Hauser 2008; Albright et al. 2010; Apiwantragoon, 2015). These store-and-release (SR) covers use the capacity of fine-textured materials to store infiltrated water and the physical process of evaporation (i.e., evapotranspiration) to control deep infiltration (Benson and Khire 1995; Albright et al. 2004, 2010; Bohnhoff et al. 2009; Bossé et al. 2013, 2015a; Kaushik et al. 2014; Apiwantragoon et al. 2015). These alternative covers are referred to in the literature as water balance, evapotranspirative, or store-and-release (SR) covers (Benson et al. 2004; 2012 Scanlon et al 2005; Shackelford et al. 2005; Fayer and Gee, 2006). In this article, we use the term store-and-release (SR) cover.

SR covers generally fall into two main categories: monolithic and capillary barrier covers. Monolithic covers consist of one layer of fine-grained material (Benson and Khire 1995, Nyhan. 2005; Rock et al. 2012). Capillary barrier covers, on the other hand, usually consist of two layers made of contrasting geotechnical materials (fine-grained and coarse-grained) (Khire et al. 1999, Bussière, 1999, Aubertin et al. 2002, 2009; Bossé et al. 2013). The addition of a capillary break layer (CBL) below the fine-grained SR layer improves the cover system performance. More specifically, when the hydrogeological contrast between the two materials (SRL and CBL) is sufficient, capillary barrier effects will control the water downflow at the interface of the two layers, thereby improving the water storage capacity of the SR layer (Morel-Seytoux, 1992; Bussière, 1999; Khire et al.1999; Bussière et al. 2003; Bossé et al. 2013).

Although SR covers for acid mine drainage (AMD) control have gained increasing attention in recent years, only a few have been built at mine waste disposal areas (Waugh et al. 2008; O'Kane et al. 2000, 2003; Wilson al. 2003; MEND 2004b; William et al. 2006; Milczarek et al.2003a, 2011a; Keller et al. 2011; Zhan et al. 2001, 2014; Bossé et al. 2015a). In addition, when designing an SR cover, the slope-induced effect on water flow through the SR cover is often neglected (except for Zhan et al. 2001a, b; 2014), although this effect can limit the cover system's capacity to control water percolation (Ross, 1990; Steenhuis et al. 1991; Stormont and Morris 1998; Aubertin et al

2006, 2009). When a cover with capillary barrier effects is built on an inclined surface, the water distribution in the cover system is not uniform along the slope. Due to slope inclination, water can accumulate above the tilt interface during precipitation events, thereby increasing the water pressure. When this pressure exceeds the water-entry value of the coarse-grained material, a breakthrough of the capillary break occurs, and the cover is no longer effective in controlling water percolation. This point (actually, a zone; Aubertin et al. 2009) is called the downdip limit, or DDL point (e.g., Ross, 1990; Steenhuis et al., 1991; Bussière, 1999). The amount of water flowing laterally down to the DDL point is the diversion capacity (Qmax) of the capillary barrier, the length between the top of the slope and the DDL point is the diversion length (L_D) of the capillary barrier (Aubertin et al. 2009), and the horizontal distance from the top of the slope to the DDL point is the effective length (L_{eff}) (Ross et al. 1990). Ideally, the parameter L_D is greater than the slope length for all possible climatic conditions, including extreme ones, to prevent water percolation into the mine wastes, and consequently AMD generation. The main parameters that can affect the water diversion capacity of an inclined SR cover are slope inclination and length, material properties, and precipitation rate (e.g., Ross 1990; Stormont 1996; Bussière et al. 1999; Tami et al. 2004; Parent and Cabral, 2006; Kelln et al. 2008; Aubertin et al. 2009; Abdolahzadeh et al. 2011; Rahardjo et al. 2012).

In recent years, most of the emphasis has been placed on the storage capacity and water budget of SR covers. However, the influence of sloping conditions on the capacity of SR covers to store, divert, and release rainfall events in arid and semi-arid climates remains poorly understood. In this study, an experimental cell with an inclined SR cover was constructed and instrumented at the abandoned Kettara mine site in Morocco to investigate the slope effect on an SR cover used to control AMD. Field performance of the inclined cover was monitored by 1) lysimeters to measure percolation into the underlying reactive waste rock, 2) instruments to measure suction and volumetric water content within the inclined SR field experimental cell, and 3) climatic condition data. The unsaturated hydrogeological behaviour of the cover was assessed under two different conditions: natural conditions and artificial significant rainfall events for the climatic conditions at Kettara. The first part of this article describes the mine site, the cover configuration, and the construction and instrumentation of the inclined SR field experimental cell. The main hydrogeological properties of the cover materials are then presented. The second part presents the hydrogeological behaviour of the tested inclined SR cover before and after application of

significant rainfall events. A summary discussion is then presented to highlight the diversion capacity of the cover and the effective length of the capillary barrier during the significant rainfall event as well as the release capacity of the tested inclined SR field experimental cell before and after significant rainfall events.

4.4 Description of the field tests

4.4.1 Site Description

The Kettara pyrrhotite mine site is one of several abandoned AMD-generating mine sites in Morocco. The site is located approximately 35 km north-northwest of Marrakech (31°52'15"N–8°10'31"W). The regional climate is characterized by a bimodal precipitation pattern, with wet (October–April) and dry (May–September) seasons. The annual cumulative rainfall and the potential evapotranspiration (PET) are estimated at 150 mm and 1980 mm (pan evaporation = 3,350 mm/year), respectively (Bossé et al. 2015a). The tailings pond area contains approximately 1,800,000 tons of mine wastes (Lghoul et al., 2012), with fine-grained tailings retained by dykes made of coarse-grained mine wastes. The mine wastes are highly acid-generating due to the presence of reactive pyrrhotite with negative net neutralization potential (NNP) values ranging from -453 to -22.5 kg CaCO3/t (Hakkou et al. 2008a). The pH at the mine site is low, with values ranging from 2.7 to 4. More details on the Kettara mine wastes are provided in Hakkou et al. (2008a, b), Khalil et al. (2013), Ouakibi et al. (2013), Lghoul et al. (2014), and Bossé et al. (2013, 2015a).

One of the most promising reclamation options for controlling AMD generation at the Kettara mine site is the use of an SR cover system that integrates capillary barrier effects. One factor that facilitates reclamation is the availability of alkaline mine wastes from nearby phosphate mines (Hakkou et al. 2009), which can be used for the SR layer (SRL). Although several field studies at various scales have been conducted to validate the use of phosphate mine wastes as cover materials to control water infiltration at the Kettara mine site, system inclination and surface runoff were neglected in all these studies. Firstly, preliminary tests were conducted in 60 cm diameter instrumented columns (Bossé et al. 2013). The preliminary results suggested that a layer of phosphate mine wastes (bare material) from 50 to 100 cm thick would prevent water percolation even in extreme conditions (155 mm over 24h) corresponding to the probable maximum

precipitation (PMP) for a return period of 60,000 years. It was decided to test cover effectiveness on a larger scale, and directly on site. Hence, four instrumented experimental cells (ID) made with different phosphate mine wastes (with different textures) were constructed on top of the Kettara mine site to assess the effectiveness of the SR cover materials. The cells were exposed to natural and extreme conditions (155 mm/24h) (Bossé 2014, Bossé et al. 2015a). Results confirmed that, for ID conditions, the coarser phosphate mine wastes have adequate properties for use in an effective SR cover to reduce rainfall percolation and control AMD in both natural and extreme rainfall conditions. However, significant portions of the Kettara mine site are situated on slopes. Therefore, the fine-grained mine tailings are retained by dykes as high as 10 m. To investigate the influence of slope on the performance of an SR cover made with phosphate mine wastes, an inclined experimental cell was built.

4.4.2 Design and construction of the inclined experimental cell

The inclined experimental cell was constructed at the Kettara mine site in March 2014. The tested SR configuration consisted of two layers: an SRL made of 0.8 m (thickness based on a previous study; see Bossé et al. 2013) of phosphate mine wastes placed directly over a retention dyke made of coarse-grained mine wastes from the Kettara mine to act as a capillary break layer (CBL). No vegetation was installed or allowed to grow during the testing period. The slope had a total height of 8 m, a width of 10 m, a cover inclination angle of approximately 14.5 degrees, and a slope length of about 31.5 m. A 3D schematic representation of the inclined SR field experimental cell is presented in Figure 4-1. The SR material was similar to the original phosphate mine wastes that were used in Cell 1 in the previous study (Bossé et al. 2015a).

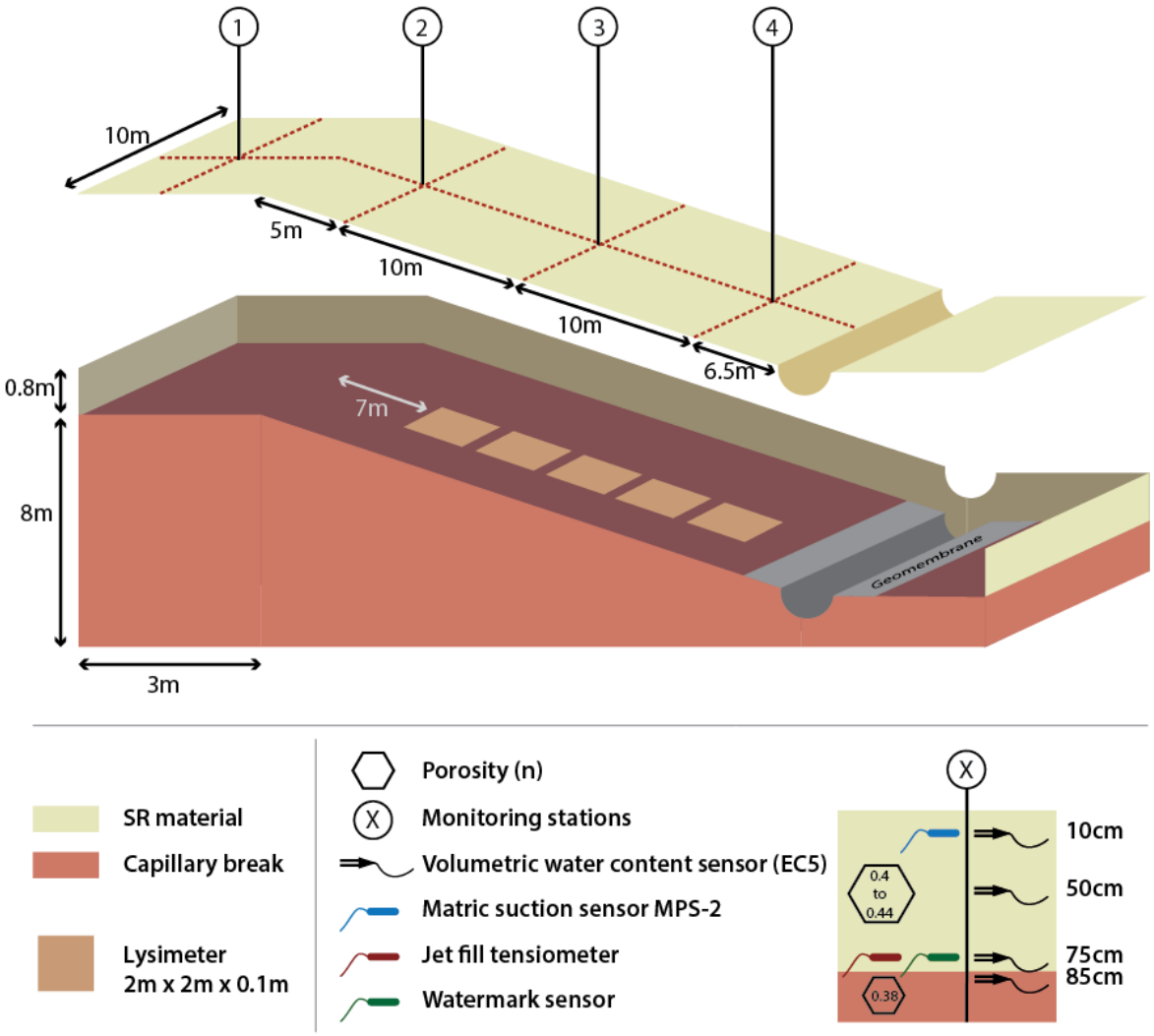


Figure 4.1 : 3D schematic representation of the inclined SR field experimental cell and corresponding instrumentation sensors

The experimental cell was constructed in three steps:

Step 1: The dyke slope was first flattened and compacted (Fig. 4-2, Step 1) to a target porosity (n) of approximately 0.37 (dry unit weight = 18 kN/m3).

Step 2: Five volumetric lysimeters were installed in the CBL to monitor water percolation at the base of the cover system (Fig 4-2, Step 2) and to estimate the DDL point location when significant rainfall events occurred. All lysimeters were connected to a pipe to allow gravity flow of the percolated water.

Step 3: The phosphate mine wastes were then placed and compacted at their initial gravimetric water content (w ≈ 6%) to a porosity ranging from 0.40 to 0.44 (corresponding to approximately 90% of the modified Proctor maximum dry density) (Fig 4-2, Step 3). The material was compacted in successive lifts of about 20 cm thick to ensure uniform density.

Samples were taken during the construction of each lift for quality control of the material properties. The main control parameters were grain-size distribution using sieves with different opening sizes, porosity, and in situ dry density using cylinders of known volume. Further details on the construction of the field experimental inclined SR cover can be found in Knidiri et al. (2015) and Knidiri (2015). The quality control results showed that porosity ranged from 0.4 to 0.44. The grain-size distribution results showed that the phosphate mine wastes used in this study were slightly coarser than those used in Bossé et al. (2015a). The quality control procedure is described in detail in Knidiri (2015).

4.4.3 Experimental cell instrumentation and monitoring

The field performance of the inclined SR experimental cell was monitored by estimating percolation to the underlying coarse mine wastes, changes in volumetric water content (or storage variations ΔS) and suction within the SR layers, internal lateral flow (lateral flow was minor and hence neglected in the water balance equation), run off, and climatic conditions. In other words, the components of the water balance equation (Eq. 4.1) were measured according to the following equation:

$$\boldsymbol{E = P + Irr - R_0 - P_r - \Delta S} \quad (4.1)$$

Where: E is the actual evaporation estimated indirectly by subtracting the runoff (R_0), percolation (P_r), change in water storage (ΔS), precipitation (P) and irrigation (Irr).

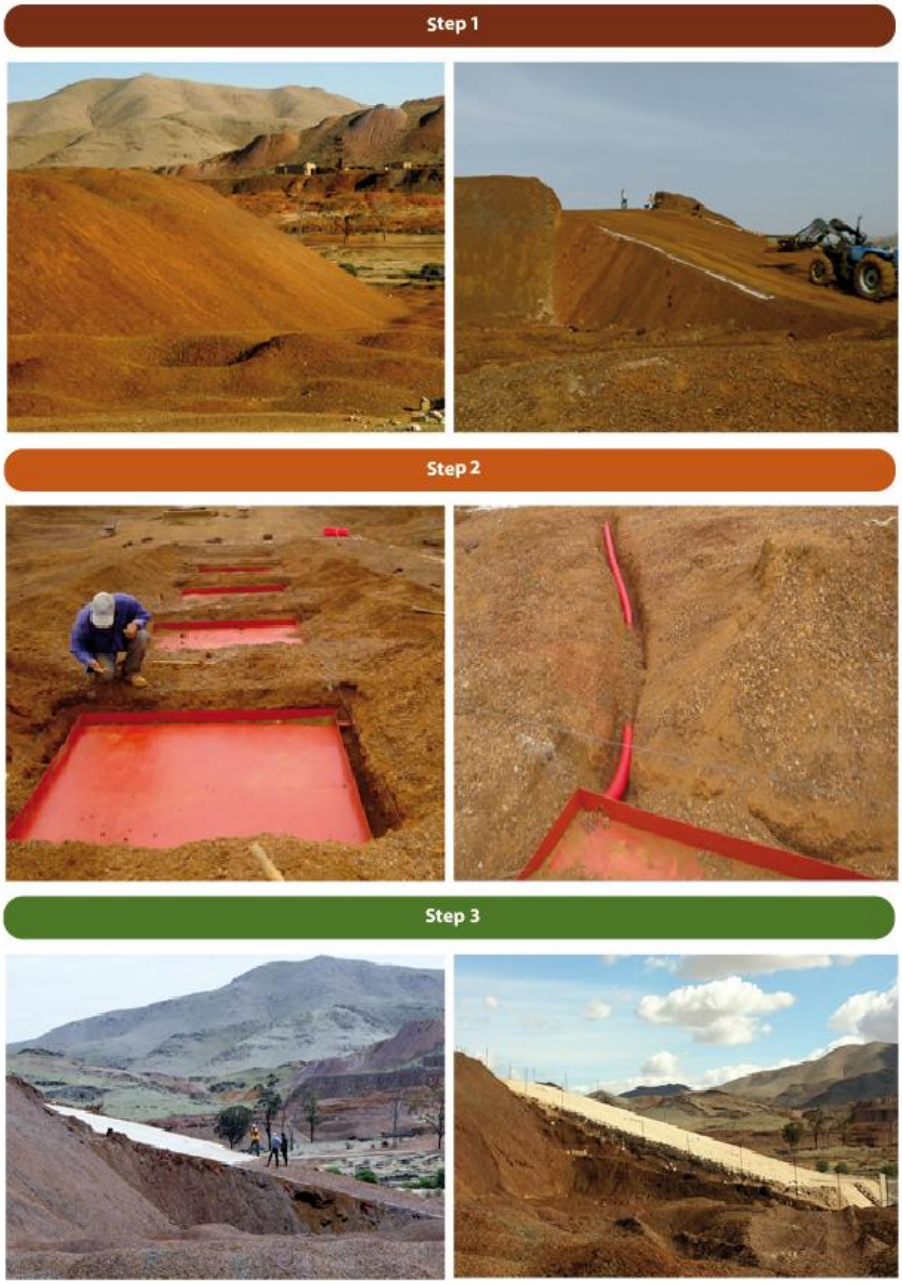


Figure 4.2 : Photos illustrating the inclined SR field experimental cell construction steps Step 1: flattening of the dyke slope; Step 2: installation of the lysimeters; Step 3: placement and compaction of the phosphate mine wastes.

Five volumetric lysimeters (2 m x 2 m x 0.1 m) spaced 2 m apart (with the first located at 7 m from the crest slope) and positioned at 90 cm depth were used to estimate the location of the DDL point and to monitor water percolation into the underlying mine wastes (Fig. 4-2, Step 2). The volumetric lysimeters were filled with the same material as the surrounding soil (Kettara coarse-grained mine

wastes), and placement density was the same inside and outside the lysimeters. Water accumulated in each lysimeter was drained by gravity towards a reservoir. The advantages and disadvantages of volumetric lysimeters have been well described in field studies of landfill covers used for recording the parameter Pr of the water balance (e.g., Benson et al. 1994, 2001; Wing and Gee 1994; Bews et al. 1997; Albright et al. 2004; Abdolahzadeh et al. 2008, 2011; Mijares and Khire, 2012; Benson et al. 2001). In the present study, where the volumetric lysimeters were placed in the coarse-grained materials below the SRL, the main parameters that could affect the precision of the percolation measurements were the area of the lysimeters compared to the overall surface, the artificial no-flow boundary at the bottom of the lysimeter, and potential leakage (Benson et al. 2001). However, despite potential percolation measurement inaccuracies, the installed volumetric lysimeters provided accurate estimates of the percolation rate and the diversion length of the inclined SR field experimental cell.

Four monitoring stations were also installed at different locations along the slope during construction to assess variations in volumetric water content and matric suction in the SR cover. Changes in volumetric water content were measured using ECH2O volumetric water sensors (EC5) (Decagon, 2015) (Fig 4-3a) and changes in matric suction were measured using sensors (MPS-2) (Fig. 4-3b). All water content sensors (EC-5) were calibrated for both materials (SRL and CBL), for a measurement accuracy of ± 0.03 m3/m3 with a range of 0 to 100%. The effect of temperature on the measurements was neglected due to its minor influence in the tested conditions (Bossé et al. 2015). Soil moisture storage ΔS was determined by integrating the volumetric water content measurements (Benson et al. 2001). The MPS-2 sensors measured the dielectric permittivity of porous ceramic disks, which was then related to the negative pore water pressure (matric suction – ψ) in the surrounding material. The manufacturer's specified measurement range without user maintenance or material-specific calibration curves was from 5 to 500 kPa (Decagon 2011). The measurement accuracy was approximately ± 25% for ψ values ranging from 5 to 100 kPa and from 35 to 50% for the 300 to 500 kPa range. Volumetric water content sensors and matric suction sensors were connected to an EM-50 datalogger. Tensiometers and Watermark sensors were also used to measure matric suction in the inclined SR layers (Fig. 4-3d, 3c). Tensiometers can measure suctions ranging from 0 to 80 kPa at 1 kPa accuracy, whereas the Watermark sensors can measure suctions ranging from 2 to 200 kPa (Bussière, 1999; Maqsoud et al. 2007). All these instruments have been successfully used in the laboratory and the field to assess the hydrogeological behaviour

of covers (e.g., Bussière, 1999, Zhan et al. 2007, Barnswell and Dwyer, 2011; Keller et al. 2011; Maqsoud et al. 2011; Rahardjo et al. 2012; Bossé 2014).

Volumetric water content sensors (EC5), matric suction sensors (MPS-2 and Watermark), and tensiometers were installed at strategic depths in the cover. JetFill tensiometers and Watermark sensors were placed beside each other at 75 cm depth in each monitoring station (5 cm into the interface between the SRL and CBL) to more precisely measure suction close to the interface. Each monitoring station was equipped with four EC5 sensors: three in the SRL at 10, 50, and 75 cm depths and one in the CBL at 85 cm depth to detect percolation. MPS-2 matric suction sensors were placed at 10 cm depth in the four stations because higher suctions were expected close to the cover surface. The JetFill tensiometers and Watermark sensors were monitored manually three times per week in natural conditions, and the EC5 and MPS-2 sensors were monitored every 30 minutes, except during the application of the second artificial rainfall event (155mm/48h), when data were recorded at intervals as short as 2 minutes. Note that all suction sensors were soaked in water before installation, as recommended by the manufacturers, and that all monitoring stations were placed near the central axis of the cell to prevent side effects (Fig. 4-1).

Surface and lateral drainage systems were installed at the foot of the slope (Fig. 4-1) to collect individual surface water runoffs and lateral water flows at the SRL–CBL interface. Percolations and runoffs were conveyed through pipes to a collector in order to quantify the water volume and to facilitate the calculation of the water balance (Fig. 4-3e). A gravel (<1 mm) layer was placed on top of the geomembrane to act as a drain for collecting the lateral water flow. More details on the construction and instrumentation are provided in Knidiri (2015) and Knidiri et al. (2015).

The in situ measured meteorological parameters included rainfall, air temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed, and wind direction. These parameters were measured using an automated weather station (HOBO U30-NRC) installed at the Kettara mine site (see Bossé, 2014, for a detailed description). The hydrogeological behaviour of the inclined SR cover was monitored from April 2014 to April 2015.

Figure 4.3: Photos illustrating the instrumentation used to monitor the inclined SR experimental cell (a) matric suction sensor (MPS-2) (b) volumetric water content sensors (EC5) (c) Matric suction sensor (Watermark) (d) JetFill tensiometer (e) surface runoff collector (f) later drainage collectors

4.5 Materials Properties

A summary of the main properties of the cover materials (phosphate mine wastes and Kettara coarse-grained mine wastes) is presented in Table 4-1. Material particle size distribution was determined using a Malvern Mastersizer laser particle size analyzer for the fine fraction (Merkus 2009) and by sieving for the coarser fraction (ASTM D 6913-04 2009). The specific gravity (Gs) was estimated with a Micromeritics Accupyc 1330 helium gas pycnometer (ASTM D5550-06). Optimum moisture content and maximum dry density of each SR material were also determined

by Bossé et al. (2015a) on similar materials using the modified Proctor compaction test in accordance with ASTM D 1557-12 (2012). According to USCS classification, the grain-size distributions of the phosphate mine wastes were typical of silty sand with gravel (SM). The Kettara coarse-grained mine wastes were classified as well graded gravel with sand (GW) (Table 4-1).

Tableau 4.1 : Hydrogeotechnical properties of the two SR cover materials

Classification (USCS)			Particle size distribution					Compaction parameters		
Material	Symbol	Type	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	G_s	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)	k_{sat} (cm/s)
Phosphate mine waste	SM	Silty sand with gravel	17	50	31	2	2.85	17.1	14.5	$3.7x10^{-4}$
Kettara's coarse mine waste	GW	well graded gravel with sand	51	45	4	0	2.9	ND	ND	0.1

Note : USCS, Unified Soil Classification System (ASTM 2011); Gravel (>4.75 mm), Sand (4.75-0.075 mm), Silt (0.075-0.002 mm), Clay (<0.002 mm), G_S specific gravity, $\gamma_{d\ max}$ Proctor maximum dry unit weight, w_{opt} Proctor optimum water content, k_{sat} saturated hydraulic conductivity and ND not determined.

Detailed results of the hydrogeological characterization of the phosphate mine wastes and the Kettara coarse wastes were presented in Bossé (2014) and Knidiri (2015). The saturated hydraulic conductivity (k_{sat}) of phosphate mine wastes was measured using a rigid-wall permeameter and the falling head test (ASTM D5856-10 2010), whereas the k_{sat} of the coarse-grained material was estimated with Chapuis's (2004) equation. The measurements showed a ksat for the phosphate mine wastes of $3.7x10^{-4}$ cm/s, whereas the predicted k_{sat} for the coarse-grained Kettara mine wastes was 0.1 cm/s. These hydraulic conductivities were in the same range as those measured previously by Bossé (2014), and the variations were expected, considering the natural heterogeneity of the mining materials tested (Bossé et al. 2015a).

Water retention curves (the main wetting curve MWC and main drying curve MDC) of the phosphate mine wastes and coarse-grained Kettara mine wastes were determined by Bossé (2014). To validate these WRCs, the main drying curve (MDC, Fig. 4-4) of the SR material was obtained (red dots in Fig. 4-4) and placed in a controlled pressure chamber (Tempe Cell; ASTM D6836-02

2008). Figure 4.4 shows the hysteresis loop (MWC and MDC) obtained by Bossé et al. (2015a, b), the in situ suction (ψ, with the Jetfill tensiometers) and volumetric water content (θ) (green dots) measured in the present study, and the results from the Tempe Cell tests. These results were close to those obtained by Bossé et al. (2015a, b), confirming that these curves can be used to characterize the water retention properties of the phosphate mine wastes.

The air-entry values (pressure at which the material starts to drain – ψa) of the phosphate and coarse-grained mine wastes were respectively 40 kPa and 0.9 kPa (Bossé et al. 2015a), and the water-entry values (pressure at which the water starts to infiltrate the material) of the cover materials were estimated at 2000 and 2.8 kPa for the SRL and CBL materials, respectively. This considerable contrast in hydrogeological properties between two materials with different textures creates the desired capillary barrier effects that restrict water flow at the interface and improve the water storage capacity of the fine-grained layer (e.g., Khire et al., 1999). The properties of the phosphate wastes and coarse-grained Kettara mine wastes are presented in detail in Bossé (2014).

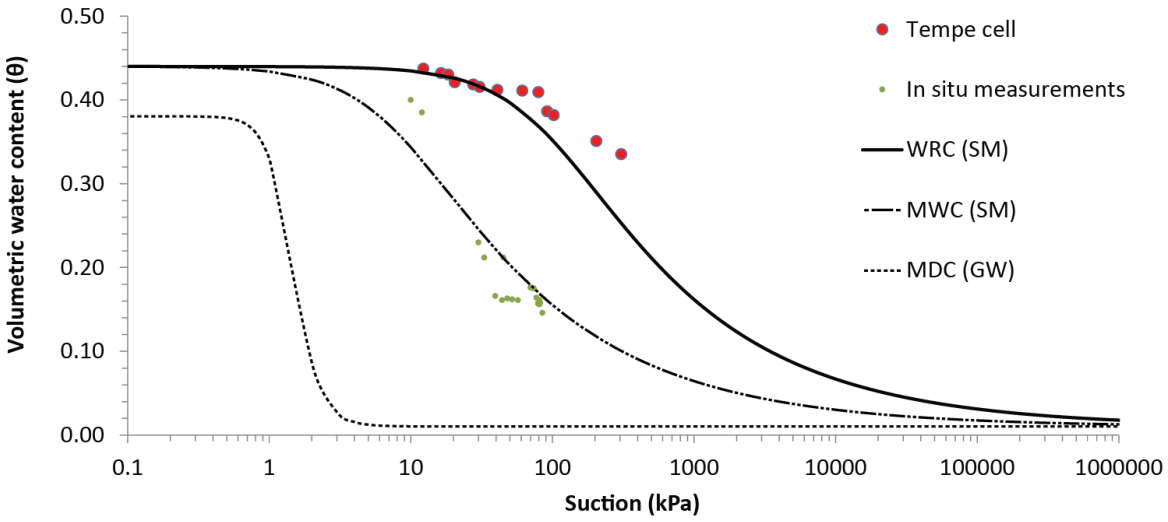


Figure 4.4: Measured and fitted water retention curves (WRCs) of fine- and coarse-grained material placed in the experimental cell; MDC is the main drying curve and MWC is the main wetting curve

4.6 Results

4.6.1 Climatic conditions

The average daily air temperatures measured during the monitoring period (April 2014 to April 2015) are shown in Figure 4-5a. The highest and lowest average daily air temperatures are 36 °C (July) and 7 °C (February), respectively, with an average annual temperature of about 20 °C.

Evapotranspiration is one of the major components of the estimation of SR cover performance. There are several methods to estimate the PET, of which the FAO Penman-Monteith method is probably the most commonly used. However, this method requires several parameters (solar radiation, air temperature, humidity, and wind speed). Hargreaves and Samani (1985) developed an alternative approach to estimate PET that requires only the mean maximum and mean minimum air temperature and extraterrestrial radiation. In the present study, the Hargreaves and Samani (1985) equation was calibrated from Bossé et al.'s (2015a) results, which were estimated using the FAO Penman-Monteith method. Hargreaves and Samani's (1985) empirical equation (Eq. 1) was calibrated for the typical climate conditions at the abandoned Kettara mine site, with an empirical parameter = 0.0027.

$$\boldsymbol{ETP = 0.0027 \frac{R_a}{\lambda} (T_a + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}}} \quad (4.2)$$

Where: R_a extraterrestrial radiation (MJ/m²/d), T_a average air temperature (°C), T maximum or minimum air temperature (°C), λ latent heat of vaporization (MJ/kg).

The results of the daily PET calculated using the Hargreaves and Samani's (1985) equation are presented in Figure 4-5b. April, May, June, July, and August were the driest months in the studied region, characterized by low rainfall, warm temperatures, and high PET. During the monitoring period, the cumulative rainfall and the PET were estimated at 218.2 mm and 1771 mm, respectively. Note that a significant rainfall event occurred at the end of November, when about 63 mm fell during a 24h period, which is considered a significant rainfall event for this region (Bossé, 2014) (Fig. 4-5c).

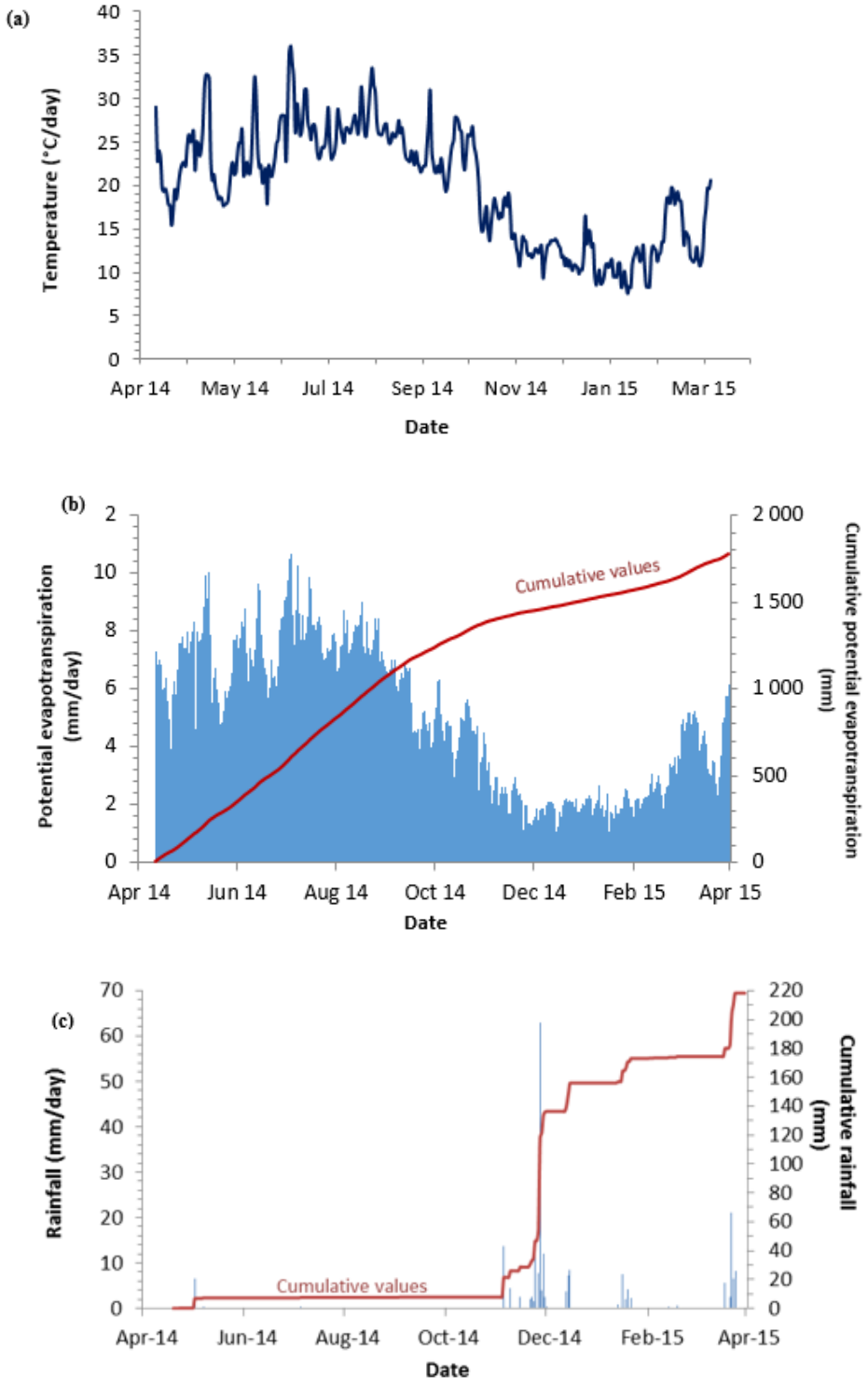


Figure 4.5 : Average daily air temperatures (a), potential evapotranspiration (b), and rainfall (c) from April 2014 to April 2015 in the study area

4.6.2 Hydrogeological behaviour under natural climatic conditions

After the construction of the inclined SR field experimental cell, a significant artificial wetting event—for semi-arid climatic conditions such as those at the Kettara mine site was used to stabilize and homogenize the water content in the SRL material—was applied using drip irrigation tubes connected to a pump and installed on the inclined SR cover surface. Approximately 100 mm of water was applied to the tested area over a 48-hour period. The cover was then exposed to natural conditions for a period of 7 months from May to November 2014. This section presents the hydrogeological behaviour of the inclined experimental cell during this period. More specifically, figures 4-6 and 4-7 show the volumetric water content (θ) time trends, matric suction measurements within the SR covers for the different stations from April 2014 to November 2014, and average daily rainfall.

4.6.2.1 Volumetric water content measurements

Figure 4-6 shows that the initial volumetric water content (θ) for the sensors differed across stations (see Fig. 4-1 for station locations). This is due to natural rainfall events during experimental cell construction. For most stations, initial θ for the SR material ranged from 0.10 to 0.18. The sensor at Station 1 located at 75 cm depth was installed during a rainy day, and showed an initial θ of 0.26. After the first artificial wetting event, increased volumetric water contents were noted at stations 2, 3, and 4 after about 2 days, with water reaching Station 2 first followed by stations 3 and 4. The wetting event had no significant impact on θ at Station 1 (located upslope on a flat surface) for sensors located at 50 and 75 cm depth. The fluctuation magnitudes of θ were generally more pronounced at 10 cm depth than those at 50 and 75 cm. At 10 cm depth, θ increased from less than 0.10 to higher than 0.35 for stations 1, 3, and 4, whereas θ in Station 2 increased to approach 0.22. The magnitude of the θ increase at 50 and 75 cm depth is a function of the location along the slope. At 50 cm depth, θ increased from approximately 0.10 to higher than 0.35 for stations 3 and 4, to almost 0.30 for Station 2, and to approximately 0.13 for Station 1. The sensors located at 75 cm depth were not affected by the rainfall event at Station 1, only slightly affected at Station 2 (θ increased from 0.17 to 0.23), and significantly affected at stations 3 and 4, with increases from 0.18 to approximately 0.30 for both. However, the SRL material did not reach saturation (0.40–0.44, = porosity) anywhere in the slope. This explains why no percolation was observed in the volumetric

lysimeters: theoretically, percolation occurs in a capillary barrier when the fine-grained SRL material reaches saturation (Morel-Seytoux, 1992).

Three days after the first wetting event, θ decreased gradually for all stations to approach initial values. At 10 cm depth for all stations, θ decreased significantly from approximately 0.35 to 0.10 (in November). The same behaviour was observed for sensors located at 50 and 75 cm depth at stations affected by the wetting event (stations 2, 3, and 4), but θ decreased at a slower rate: in November, θ values typically ranged from 0.15 to 0.20 for all three stations.

These results indicate that a significant portion of the water added during the initial wetting event was released to the atmosphere by evaporation during the dry period. Note that the fluctuations in θ were more pronounced at 10 cm depth compared to 50 cm and 75 cm depth, mainly due to evaporation, which more rapidly affected the exposed surface of the inclined SR cover. However, the evaporation effect was also present at 50 and 75 cm depth, where a progressive decrease in θ was observed. It is also worth mentioning that no significant fluctuation in θ was observed in the bottom capillary barrier layer (CBL), confirming that no significant percolation occurred during the first wetting test.

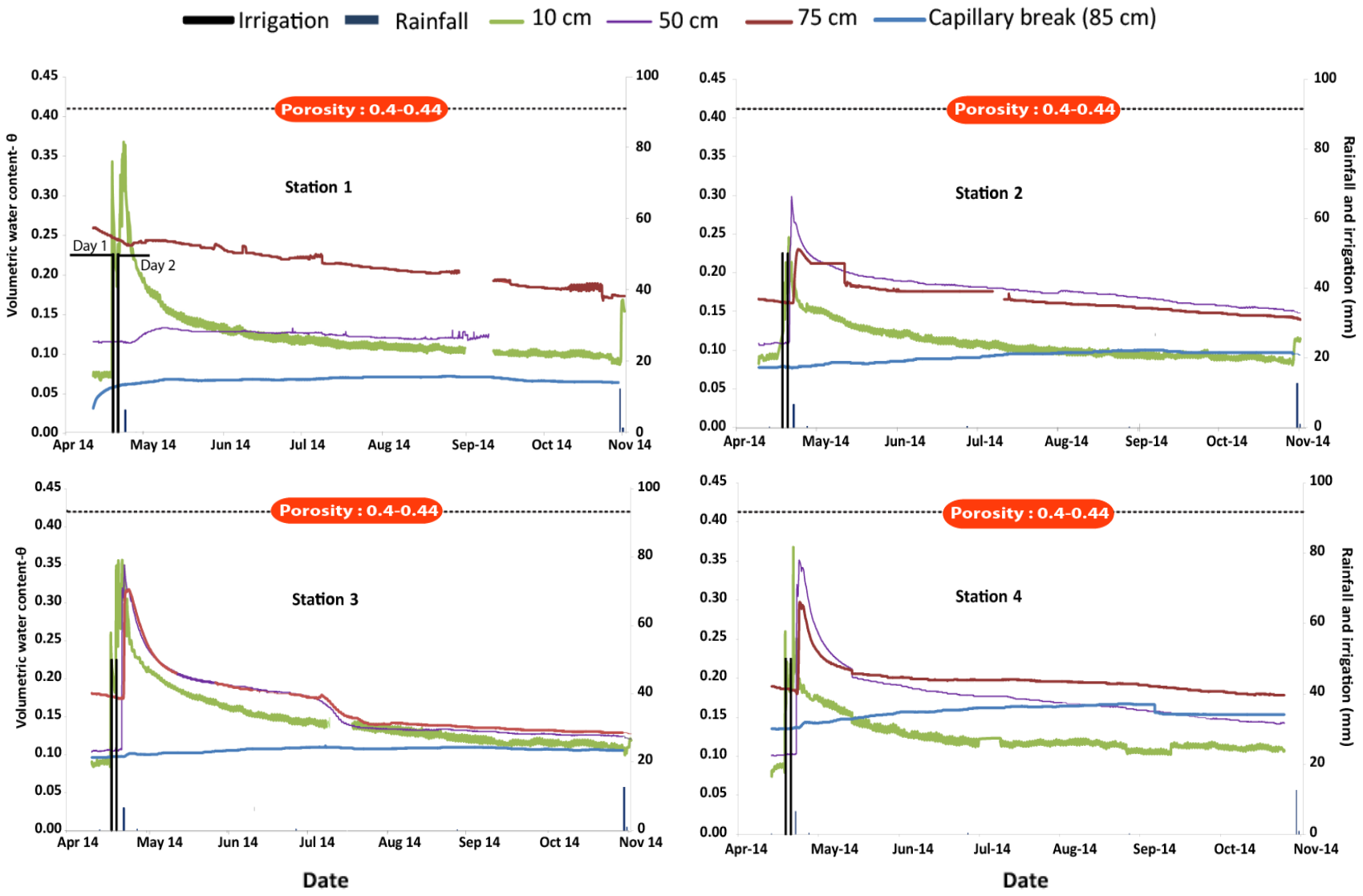


Figure 4.6 : Time trends for volumetric water content at depths of 10, 50, 75 and 85 cm for the 4 stations in the inclined experimental SR cover from April 2014 to November 2014

4.6.2.2 Matric suction measurements

Figure 4-7 shows the fluctuation in matric suction measured with MPS-2 sensors in the inclined SR cover at 10 cm depth (Fig.4-7a), measured with Jetfill tensiometers at 75 cm (Fig. 4-7b), and measured with Watermarks sensors (Fig. 4-7c) for the four monitoring stations (see Fig. 4-1 for station locations).

Figure 4-7a indicates a decrease in suction (ψ) at 10 cm for the four stations during the wetting event, with ψ values below 10 kPa, or the lowest measurable value with the MPS-2 sensor. However, ψ measurements at 10 cm depth increased rapidly after the wetting event to reach values that exceeded the manufacturer's specified sensor capacity (500 kPa; Decagon 2011; Bossé 2014) after less than a month. These high ψ values at 10 cm were due to evaporation during the dry season.

The trend of changes in ψ measured with the Jetfill tensiometer close to the CBL–SRL interface at 75 cm depth (except for Station 1, where the tensiometer was defective) and measured with Watermark sensors during the wetting event was similar for the four stations. After the beginning of the wetting event, ψ values started to decrease from a 40 to 85 kPa range to below 20 kPa due to water accumulation. The lowest ψ were observed near the bottom of the slope, where θ increased the most (stations 3 and 4). This decrease in suction was followed by an increase during the dry seasons for the four stations, where ψ reached values ranging from 60 to 85 kPa. Note that the two tested devices (Watermark sensors and Jetfill tensiometers) provided similar trends, despite the slight differences in absolute values.

In summary, during the first wetting event and for natural climatic conditions, ψ at 75 cm depth was lower at stations 3 and 4, which were located downslope of the experimental cell. Station 2, located in the upper portion of the slope, generated higher suction at 75 cm depth due to the slope effect (Bussière et al. 2003). Suction results close to the CBL–SRL interface also indicated that the breakthrough of the capillary barrier (or the DDL point, Ross 1990) was not reached at the bottom of the inclined SR cover ($L_D \geq 31$m), with higher ψ values (WEV = 2.8 kPa) than for the coarse-grained material at Station 4. This finding is discussed further in Section 5.2. Note also that no lateral flow or percolation was measured during the wetting event or after.

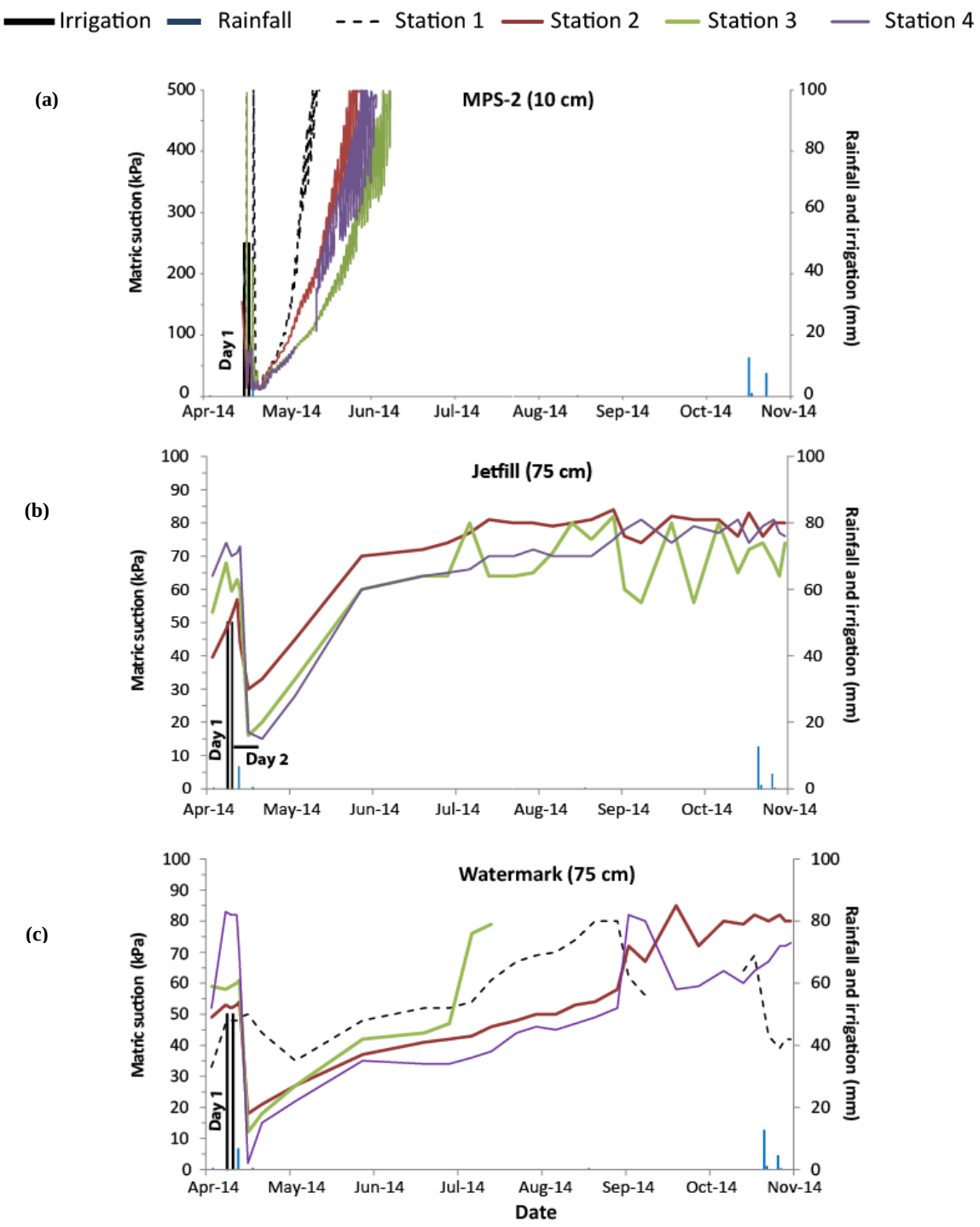


Figure 4.7 : Measured matric suction at depths (a) 10 cm with MPS-2 (only values < 500 kPa are presented due to sensors precision), (b) 75 cm with Jetfill tensiometers and (c) 75 cm with Watermark sensors after the first wetting event

4.6.3 Hydrological behaviour after the second artificial rainfall event

This section presents the hydrogeological behaviour of the inclined SR field experimental cell surrounding the second artificial rainfall event consisting of 155 mm of water in 48 hours. It is important to mention that this artificial rainfall event was followed in the same week (6 days later) by a natural rainfall event, with 63 mm in 24 hours. Volumetric water content (θ) and suction (ψ) measured from November 2014 to March 2015 for the four stations are presented in figures 4-9 and 4-10, along with the average daily rainfalls and the artificial rainfall event. The artificial rainfall event was applied using drip irrigation tubes connected to a pump and by adding a known volume of water (equivalent to 155 mm of precipitation over a 48h period).

4.6.3.1 Volumetric water content measurements

After the artificial 155 mm rainfall event (and the real 63 mm precipitation event) at the end of November, all the soil moisture probes located at 10, 50, and 75 cm depth were affected: θ increased from a 0.10 to 0.17 range to close to 0.4 (approaching saturation) for all sensors, except for the sensor located at 75 cm depth in the upslope station (Station 1, on a flat surface), where θ reached 0.35 (Fig. 4-8). Sensors installed in the CBL were also affected by the artificial rainfall event, particularly at Station 4, where θ reached 0.25. Furthermore, percolation was observed in the five lysimeters, indicating a breakthrough, such that the capillary barrier effects at the interface were unable to divert water. In other words, the amount of added water was greater than the cover's retention capacity, resulting in water percolation. Furthermore, it is noteworthy that the collected leachate at the lysimeters had a pH ranging from 2 to 3.

Two months after the second artificial rainfall event, θ begun to decrease gradually, with more rapid decreases for sensors located at 10 cm depth for stations 1 and 2 (upslope) compared to those located at the same depth in stations 3 and 4 (downslope). Moreover, θ values at 75 cm depth at station 1 and 2 were significantly higher than those at 10 cm. This discrepancy was not observed for stations 3 and 4, where all sensors showed similar behaviour. In addition, θ values measured at the end of the monitoring period at 50 and 75 cm depth were similar to those measured before the second artificial rainfall event. These findings will be addressed further in the Discussion section.

4.6.3.2 Matric suction measurements

The ψ measurement results are presented in Figure 4-9. First, the suction measurements are in accordance with the volumetric water contents (θ). Thus, for the sensors located at 10 cm depth, ψ decreased significantly after the second artificial rainfall event: from greater than 500 kPa to less than 10 kPa (the lowest value measured by the MPS-2 sensor) for the four stations (Fig. 4-9a). The same general behaviour was also measured by the sensors located at 75 cm depth, where ψ decreased from the 45 to 80 kPa range to 20, 8, and 5 kPa for stations 2, 3, and 4, respectively, with the Jetfill tensiometers (the Jetfill at Station 1 was defective; Fig. 4-9b) and to 10, 8, and 1 kPa for stations 1, 2, and 4, respectively (the Watermark sensor at Station 3 was defective; Fig. 4-9c). This indicates a significant influence of slope on suction distribution: ψ was higher close to the interface in the upslope portion, thereby reducing the risk of water breakthrough through the capillary barrier. Similarly to the first wetting event, the decrease in suction was followed a few days after the second artificial rainfall event by a progressive increase in ψ due to evaporation at all four stations.

These results are in accordance with the observed volumetric water content behaviour. The θ increased at the interface to approach saturation at stations 2, 3, and 4, indicating that the capillary barrier effects were no longer present. At the same time, suction (ψ) close to the interface approached the water-entry value of the coarse-grained Kettara mine wastes (2.8 kPa) and dropped even lower (at Station 4 Fig. 4-10c), confirming that the observed experimental conditions were favourable for water percolation.

.

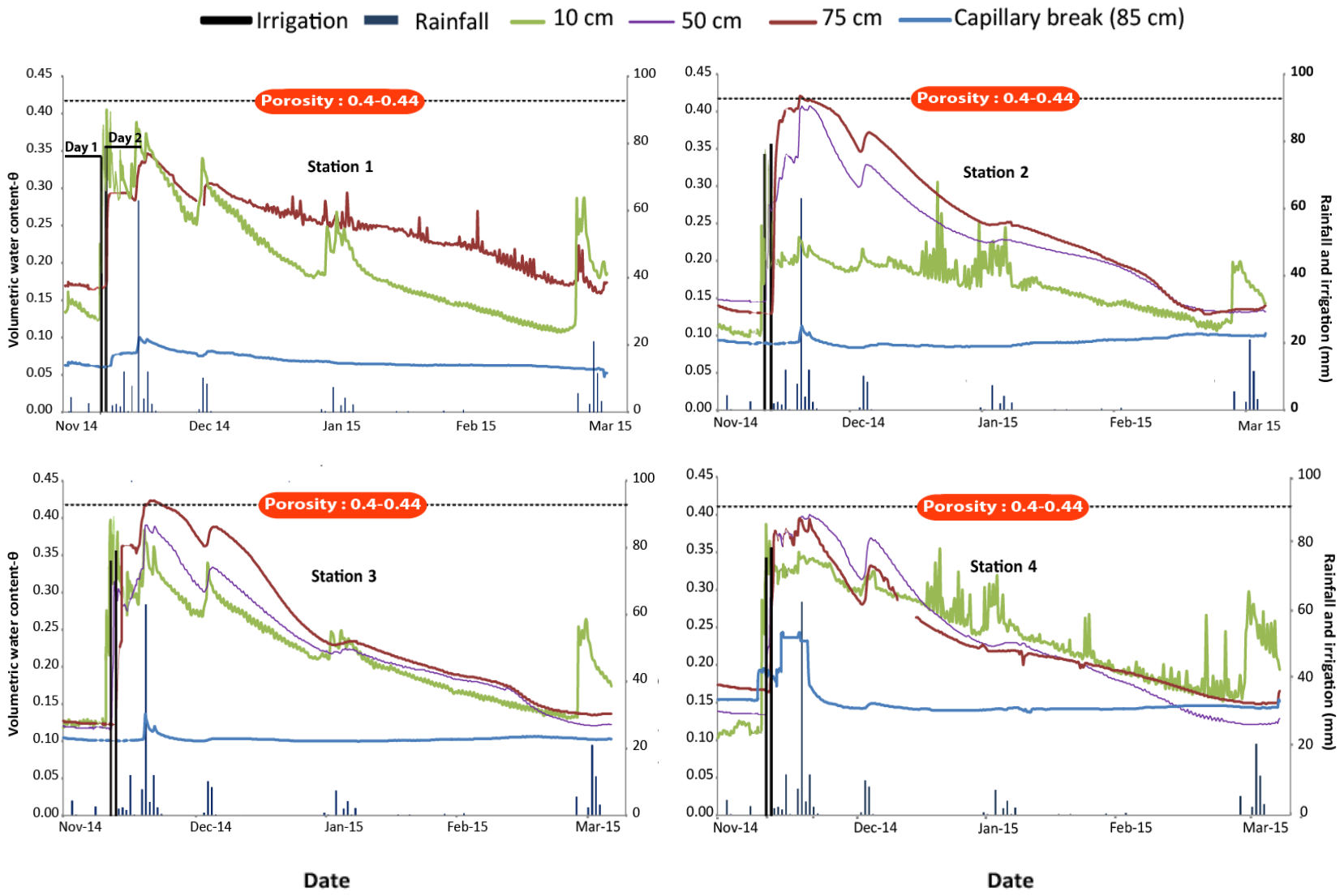


Figure 4.8 : Time trends for volumetric water content at depths of 10 cm, 50 cm, 75 cm and 85 cm for the inclined experimental SR during the second artificial rainfall event reinforced by another natural rainfall event, from November 2014 to the end of March 2015

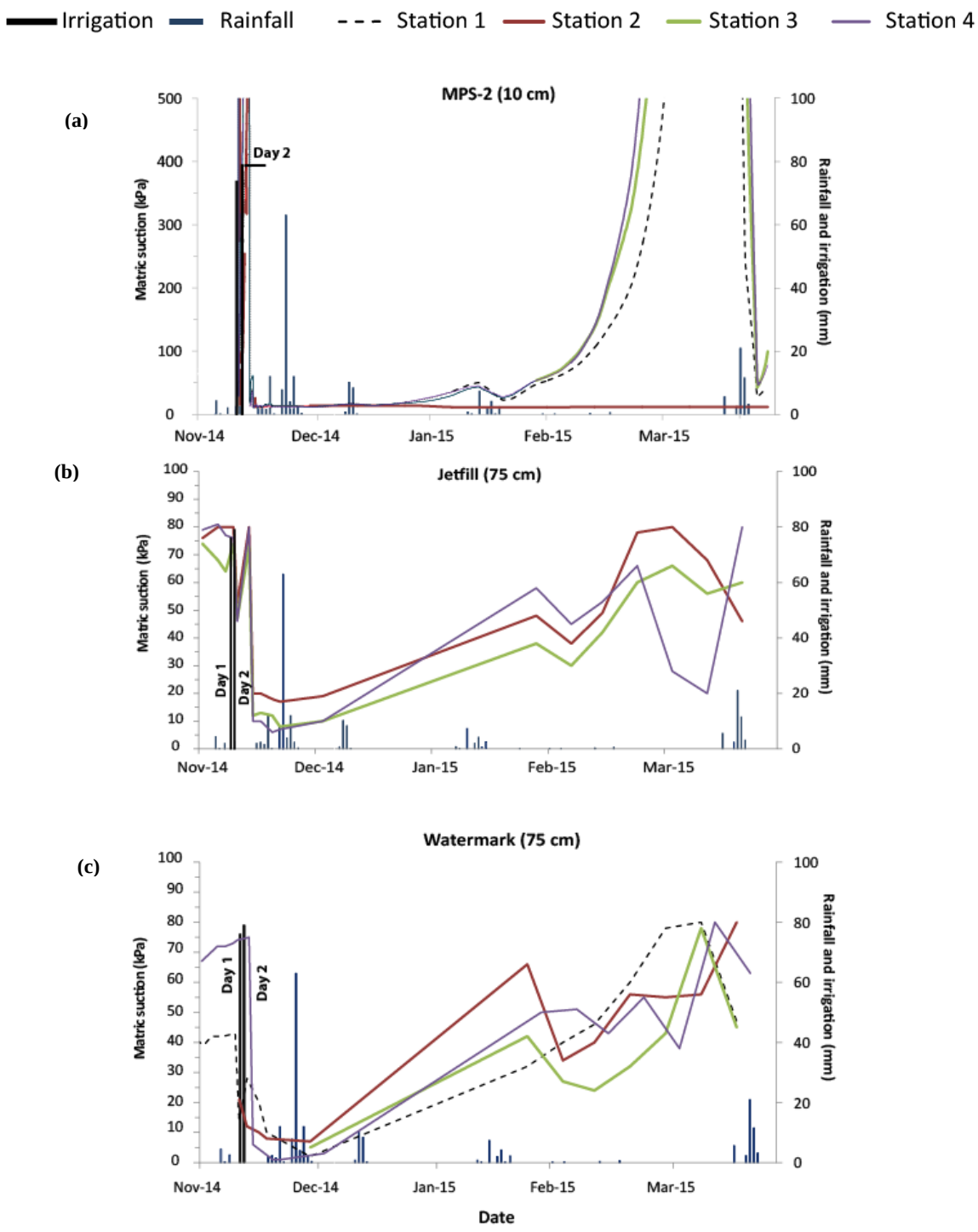


Figure 4.9 : Measured matric suction at depths of (a) 10 cm with MPS-2 ((only values < 500 kPa are presented due to sensors precision), (b) 75 cm with Jetfill tensiometers and (c) 75 cm with Watermark sensors after the second artificial rainfall event reinforced by another natural rainfall event

4.7 Discussion

The results of this study described the hydrogeological behaviour of an inclined SR field experimental cell built at the abandoned Kettara mine site. This section presents a further discussion of the water balance, the store-and-release capacity, and the diversion length of the inclined SR cover system.

4.7.1 Influence of the slope on the store-and-release capacity

The effectiveness of the inclined cover to store and release water was assessed using the main components of the water balance equation (Eq. 2). Figure 4-10 illustrates an example of the daily water storage, cumulative rainfall, and cumulative actual evaporation time series for Station 3(see annex 7 for more details), and Table 4-2 presents the monthly water balance for the four stations. One can see that percolation (4 mm, estimated using the volume recovered in the lysimeter and at its the surface) occurred only when the significant rainfall event (155 mm) was applied to the SR cover system (November 2014), and runoff was observed for both artificial rainfall events (3 and 10.8 mm for events 1 and 2, respectively). In addition, lateral flow at the interface of the SRL and CBL, which constitutes another component of the water balance in an inclined SR cover, was not measured, but instead observed in the field during the significant rainfall event (155 mm), confirming that some of the water had flowed along the interface. Nevertheless, lateral flow was considered minor, and therefore neglected in the water balance equation.

Figure 4-10 shows that the time series correlate well with the average daily rainfall: water storage decreased during the dry season from April to October and showed several fluctuations during the wet season from November to March. After the first artificial wetting event of 100 mm (end of April, 2014), evaporation increased to reach approximately 100 mm in November. The water storage in Station 3 closely approaches its initial value (112 mm) in November 2014 (before the second artificial rainfall event) and in April 2015 due to evaporation and the good release capacity of the SR material (Table 4-2 and Fig. 4-10). This means that the water stored in the SR material was promptly transferred to the atmosphere. The release capacity is discussed in greater detail below.

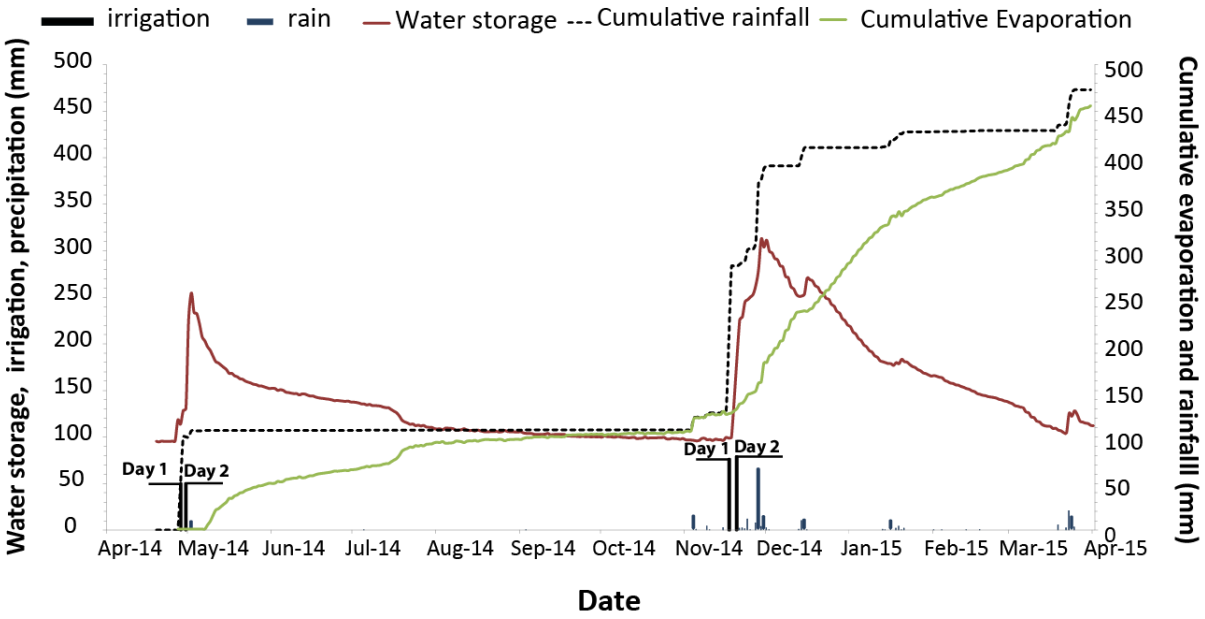


Figure 4.10 : Daily water balance for Station 3

For all four stations, Table 4-2 indicates that physical evaporation occurred mainly during spring and at the beginning of summer, which are characterized by high PET. However, the most highest evaporation rate was recorded immediately after the two rainfall simulations (May and December), when water was more easily available for transfer to the atmosphere and matric suction at the surface was low (< 3000 kPa; detailed descriptions are provided in Bossé et al. 2015a and Wilson et al. 1997). At the end of the monitoring period, the cumulative actual evaporations for stations 1 (448 mm) and 2 (444 mm) were lower than those for stations 3 (472 mm) and 4 (474 mm), indicating that the evaporation rate was higher in the lower portion of the slope (stations 3 and 4).Total net infiltration was about 455 mm. In addition, although the highest water storage values were measured in April and November (corresponding to the two artificial wetting events), five months after the second event, the water storage values calculated by integrating the volumetric water content profiles for stations 1, 2, 3, and 4 were 145, 109, 113, and 120 mm, respectively. The difference in water storage between the conditions before the second artificial rainfall event (October 2014) and at the end of the experiment (March 2015) is 38.7 mm for Station 1 (located upslope on a flat surface), 2.5 mm for Station 2, 14.3 mm for Station 3, and 6.4 mm for Station 4. These results indicate differing hydrogeological behaviour across the stations in terms of water storage, particularly for Station 1, suggesting that the inclination angle affects this water balance component. The highest estimated actual evaporations (higher than total net infiltration) at stations

3 and 4 (located downslope) validate the capacity of the system to divert water that accumulates downslope before being transferred to the atmosphere by evaporation. Indeed, as noted in Bussière et al. (1998, 2003) and Maqsoud et al. (2010), desaturation generally occurs near the top of the slope (Station 2), with water accumulation near the foot (Station 4), which affects the actual evaporation rate along a sloping cover system.

Tableau 4.2 : Monthly water balance for the inclined experimental SR cover at Kettara mine site

Month	P	ETP	R_o	P_r	Net I	Station 1			Station 2			Station3			Station4		
						ΔS(mm)	E(mm)	S(mm)	ΔS(mm)	E(mm)	S(mm)	ΔS(mm)	E(mm)	S(mm)	ΔS(mm)	E(mm)	S(mm)
April 2014 (end)	100.2	128.1	3	0	97.2	_	_	234.9	_	_	195.5	_	_	226.1	_	_	236.2
May	7.0	219.2	0	0	7	-85.4	92.4	149.4	-44.5	56.6	138.9	-74.1	81.1	152	-90.7	97.7	145.4
June	0.0	212.7	0	0	0	-13.8	13.8	135.7	-8.2	8.2	130.7	-14.4	14.4	137.6	-11.7	11.7	133.8
July	0.4	259.7	0	0	0.4	-7.4	8.1	128	-7.7	8.1	123.1	-28.6	29.1	109	-2.9	3.3	130.9
August	0.0	231.9	0	0	0.0	-5.4	5.4	122.6	-4.5	4.5	118.6	-3.7	3.7	105.3	-5.3	5.3	125.6
September	0.2	168.6	0	0	0.2	-8.9	9.2	113.6	-6.4	6.6	112.2	-5.12	5.3	100.2	-6.6	6.8	119.1
October	0.0	143.5	0	0	0.2	-7.7	7.9	105.9	-5.3	5.5	106.9	-1.9	2.1	98.2	-5.1	5.3	113.9
November	283.2	69.6	10.8	4.4	268	178.9	89.8	284.8	179	89	285.9	205.8	62.3	304	186.6	81.5	300.5
December	20.0	58.27	0	0	20	-85.4	105.4	199.7	-83.7	103.7	202.2	-83.8	103.8	220.2	-85.8	105.8	214.7
January 2015	17.0	60.8	0	0	17	-28.2	45.2	171.2	-33	50	169.3	-54.7	71.7	165.4	-42.4	59.4	172.3
February	1.4	73.8	0	0	1.4	-31.4	32.8	139.8	-37.9	39.3	131.4	-27.4	28.8	138.1	-36.3	37.7	136
March	43.8	134.8	0	0	43.8	4.8	39	144.6	-21.9	65.7	109.4	-25.6	69.4	112.5	-15.7	59.5	120.3
Total	**218.2**	**1761**	**13.8**	**4.4**	**455.3**	**-90.2**	**448.2**	**_**	**-73.9**	**444.1**	**_**	**-113.6**	**471.7**	**_**	**-115.8**	**473.9**	**_**

P precipitations or Rainfall, *PET* potential-evapotranspiration (Equation 1), *Irr* irrigation, *ΔS* water storage change (at month end), *E* actual evaporation, *Ro* runoff, *Pr* percolation

Although it is important to assess storage capacity in order to assess cover effectiveness, the water release capacity of the SR layer (SRL) is also a critical aspect to consider when designing an SR cover system (Bossé et al. 2015a, c). Figure 4-11 presents the change in the cumulative release rate for net infiltration, which corresponds to the time to release the water that infiltrated the SR cover after the second artificial rainfall event (a value of 1 means that all the infiltration water was transferred to the atmosphere).

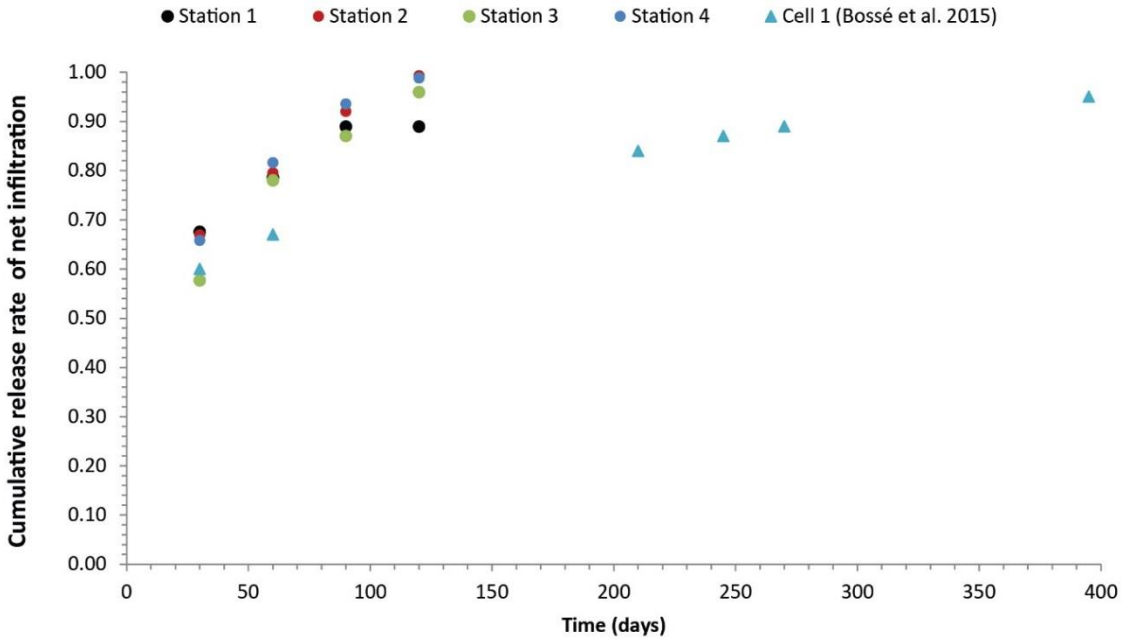


Figure 4.11 : Cumulative release rate of net infiltration evolution after the significant artificial rainfall event simulation (155mm/48)

Five months (120 days) after the application of the second artificial rainfall event, results showed that over 95% of the net infiltration was released to the atmosphere at stations 2, 3, and 4, with 88% for Station 1 (located upslope on a flat surface). The inclined SR cover regained almost full storage capacity, confirming the good release capacity of the SR cover. As shown in Figure 11, these results are in a good agreement with those of Bossé et al. (2015a), who demonstrated that an experimental cell made of a similar SR material and built on a flat surface (i.e., for a one-dimensional condition – 1D) had good release capacity when an extreme rainfall event was applied as the surface boundary condition (155 mm/24h). Bossé et al. (2015a) also showed that over 95% of the net infiltration was released to the atmosphere, but 14 months (420 days) after the extreme event. Although the conditions were slightly different: lower rainfall intensity, SR material slightly

coarser, and 0.8 m instead of 1 m thickness), the slope could also explain in part the better performance of the inclined SR cover system. In fact, previous studies by Jackson (1967), Nyhan (1997), Blight (2002), and Weeks and Wilson (2006) have shown that slope direction (north/south) and angle (0–20°) can have a significant effect on the net solar radiation, and consequently on the potential and actual evaporation (i.e., the water release capacity). Figure 11 shows that the system inclination increases the release capacity of the SRL, with higher values downslope (Station 4) than upslope (Station 1, located on a flat surface). Note that the dykes where the experimental cell was built at the Kettara mine site (northern hemisphere) were oriented mainly to the south, which could improve the release capacity of the tested SR cover (Weeks and Wilson 2006).

4.7.2 Determination of diversion length and the Downdip limit (DDL)

In addition to store-and-release (SR) water infiltration, one of the objectives of inclined SR cover systems in arid climates is to generate lateral subsurface water flow within the cover in order to minimize vertical flow through the cover into the underlying mine waste material. The water diversion associated with SR capacity can increase the effectiveness of the cover system to control water infiltration (Ross 1990; Stormont 1996; Zhan et al. 2001, 2014; Rahardjo et al. 2012; Aubertin et al. 2009, Ng et al. 2015). To assess the water diversion capacity of inclined covers, it is crucial to determine the effective length of the capillary barrier (L_{eff}). Among others, Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morel-Seytoux (1994) proposed analytical solutions to estimate L_{eff} (see Bussière et al. 2007 for a detailed description). These solutions are valid under idealized steady-state conditions, and assuming that the suction is identical at a given distance from the interface between the coarse- and fine-grained materials all along the slope. These conditions are not always met, which can limit the application of these solutions (Bussière et al. 2007b; Cifuentes et al. 2006; Aubertin et al. 2009).

In this study, instruments and volumetric lysimeters were installed to identify the location of the DDL point. The observed L_{eff} values were compared with the analytical solutions developed by Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morrel-Seytoux (1994). L_{eff} values were calculated using the main drying curve (MDC) and the main wetting curve (MWC) to determine the influence of using one WRC versus the other when a material has significant hysteretic behaviour (e.g., the phosphate mine wastes used in the present study). Most studies have used the main drying curve and have ignored hysteresis effects to determine L_{eff}.

The mathematical expressions of these analytical solutions are presented in Table 4-3. Because the analytical solutions estimate the diversion capacity (Qmax), the following equation was used to calculate L_{eff} :

$$\boldsymbol{Q_{max} = L_{eff} \times P = L_D \times \cos \alpha \times P} \quad (4.3)$$

Table 4-4 shows the estimated L_{eff} of the inclined SR cover for the rainfall rates corresponding to the artificial rainfall events (100, 155, and 215 mm in 48 hours). As can be seen, the measured L_{eff} values (>31.5, 18, and 9 m for the 100, 155, and 215 mm, respectively) are closer to those estimated with MDCs than with MWCs. Thus, the calculated L_{eff} values for a 14.5° slope angle for the equivalent rainfall rates are respectively 24 m, 15m, and 11m with Ross's (1990) solution; 27 m, 17 m, and 12 m with Steenhuis et al.'s (1991) solution; and 16 m, 10 m, and 8 m with Morel-Seytoux's (1994) solution (Table 4-4). L_{eff} values estimated with the MWCs are respectively 17 m, 11 m, and 8 m with Ross's (1990) solution; 15 m, 9 m, and 6 m with Steenhuis et al.'s (1991) solution; and 2 m, 1.2 m, and 1 m with Morel-Seytoux's (1994) solution. Unexpectedly, the measured L_{eff} values are closer to those estimated with MDC analytical solutions than with the MWC analytical solutions, considering that most ψ-θ measurements in the field are close to the MWC (see Fig. 4-4). This is mainly due to the fact that steady state was not reached after 48 hours, which overestimates the measured L_{eff} values. This hypothesis has been confirmed by preliminary numerical modelling, indicating that it takes more than two days to reach steady-state conditions with a stable DDL point (see Knidiri 2015 for details). Results also show that the precipitation rate has a significant influence on the location of the DDL point, and that for the tested inclined SR field experimental cell, a breakthrough would occur with a rainfall event from 100 to 155 mm in 48 hours.

Tableau 4.3 **:** Mathematical expressions of Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morel-Seytoux (1994) analytical solutions

Ross (1990)

$$L_{eff} = \frac{k_{sat_2} tan\alpha}{a_{s_2}} \text{x } P \quad (4)$$

$\mathbf{L_{eff}}$: Effective length (m)
α: Slope angle
k_{sat}: Saturated hydraulic conductivity (m/s)
a_s: Sorptive number related to the pore size distribution (Philip 1969)
P: Vertical water flux (m/s)

(indices 1 and 2 in the equations refer to the coarse- and the fine-grained material respectively)

Stennhuis et al. (1991)

$$L_{eff} = k_{sat_2} \tan\alpha \left[a_{s_2}^{-1} \left(1 - \frac{P}{k_{sat_2}} \right) + \psi_{a_2} - \psi_{w1} \right] \text{x } P \ (\psi_{a_2} \geq \psi_{w1}) \quad (5)$$

ψ_a: Air entry value (m of water)
ψ_w: Water entry value (m of water)
α: Slope angle
k_{sat}: Saturated hydraulic conductivity (m/s)
a_s: Sorptive number related to the pore size distribution
P: Vertical water flux (m/s)

(indices 1 and 2 in the equations refer to the coarse- and the fine-grained material respectively)

Morel-Seytoux, 1994

$$L_{eff} = k_{sat_2} \tan\alpha \left[\psi_{c_2} - \psi_{aM_1} \left(\frac{q^* P}{k_{sat_1}} \right)^{\frac{-M_1}{p_1}} \right] \text{x } P \quad (6)$$

ψ_c: Effective capillary drive (Morel-Seytoux and Khanji 1974) (m of water)
ψ_{Ma}: Air entry value (m of water)
q*: Transmitted fraction (1 at the DDL point)
M: Brooks and Corey (1964) parameter used to describe the water retention curve (Morel-Seytoux et al. 1996)
p: Brooks and Corey (1964) parameter used to describe the permeability function. p was calculated using the following relationship: p = 3 + 2M (Morel-Seytoux et al. 1996)

Tableau 4.4 **:** Main hydraulic properties of the simulated inclined SR cover: measured and calculated effective length (L_{eff}) with the Ross (1990), Steenhuis et al. (1991), and Morel-Seytoux analytical solutions

		Brooks and Corey (1964)		Rijtema (1965)		
		M	p	a_s (m^{-1})	ψ_r	ψ_a
	Phosphate mine wastes (MDC)	2.3	7.6	0.07	2000	4
	Phosphate mine waste (MWC)	2.3	7.6	0.1	300	0.4

		L_{eff}					
Precipitation (m/s)	Experimental	Ross (1990)		Morel-Seytoux (1994)		Steenhuis et al. (1991)	
		MDC	MWC	MDC	MWC	MDC	MWC
$5.8x10^{-7}$	L_{eff}>31 m	24 m	17 m	16 m	2 m	27 m	15 m
$9.0x10^{-7}$	18 m	15 m	11 m	10 m	1.2 m	16 m	9 m
$1.3x10^{-6}$	9 m	11 m	8 m	8 m	1 m	10 m	6 m

4.8 Conclusions and recommendations

In arid and semi-arid climates, where the annual precipitation is much lower than the annual potential evapotranspiration, one option to minimize net vertical percolation is to design covers that can store, divert, and release infiltrating water. This paper assessed the ability of an inclined SR cover made with phosphate mine wastes to reduce AMD at the abandoned Kettara mine site located near Marrakech, Morocco. To do so, an experimental inclined (14.5°) SR cover was constructed (32 m x 10 m) directly over the reactive coarse-grained wastes at the Kettara mine to act as a capillary break layer (CBL). The inclined cover was instrumented and monitored for one year under natural climatic conditions and after two significant artificial rainfall events. The main conclusions drawn from this in situ study are as follows:

- Results showed that after the first wetting event (100 mm in 48 hours), sensors installed at 10 and 50 cm depth in the four stations were affected, whereas sensors at 75 cm depth were affected only in stations located at the bottom of the slope (stations 3 and 4).
- No deep percolation within the coarse-grained material was measured in the volumetric lysimeters after the first wetting event, due to the presence of capillary barrier effects at the

interface of the coarse-grained Kettara mine wastes and the SRL, indicating that most of the infiltrated water was diverted laterally. This confirms that the tested inclined SR cover was able to store and divert the water during this wetting event.

- When the cover was exposed to a more extreme rainfall event for Kettara climatic conditions (artificial precipitation of 155 mm in 48 hours), followed 6 days later by a significant natural rainfall event (63 mm), all volumetric water content sensors were affected and approached full saturation. Percolation was detected in all volumetric lysimeters. In other words, the water storage capacity of the inclined SR cover was exceeded.
- The measured diversion length of the tested SR cover was greater than the actual length for the 100 mm rainfall in 48 hours event. However, when 155 mm of water was applied, the DDL point was located at approximately 19 m from the top of the slope (L_{eff} = 18m). The natural precipitation event (60 mm in 24 hours) occurred in the same week as the 155 mm artificial event, which moved the DDL point upward to approximately 9 m from the top. These values are in the same range as those predicted with analytical solutions.
- The observed hydrogeological behaviour of the inclined SR field experimental cell indicated that the cover was able to rapidly (in approximately 5 months) release stored water during the dry season and subsequently regain its capacity to store the rainfall events of the next wet season.

The results of this study therefore confirm the suitability of phosphate mine wastes as SR cover material to control water infiltration into the AMD-generating Kettara mine wastes. They also demonstrate that cover behaviour (diversion and release capacity) is significantly influenced by the slope effect, and that there is a critical precipitation rate that should not be exceeded (≈100 mm in 48 hours) for the tested scenario (slope and cover thickness) in order to control water infiltration into reactive mine wastes. In order to better understand the experimental inclined cell's hydrogeological behaviour during the wetting events unsaturated numerical modelling is recommended. Because the on-site location could have influenced the evaporation potential, the effect of slope on the release capacity should be investigated further. Further research should also be conducted to assess the effect of vegetation on the inclined SR cover water balance and its impact on runoff and erosion control.

4.9 Acknowledgements

This study was funded by the Canada Research Chair on the rehabilitation of abandoned mine sites (2003-2013),the International Research Chairs Initiative, a program funded by the International Development Research Center (IDRC) and the Canada Research Chair program and the Canadian foundation of innovation CFI. Phosphate mine wastes were provided by the OCP group (Office Cherifien des phosphates).

4.10 References

Abdolahzadeh, A.M., Lacroix Vachon, B., and Cabral, A.R. 2008. Hydraulic barrier and its impact on the performance of cover with double capillary barrier effect. Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, 21–24 September. [CD-ROM].

Abdolahzadeh AM, Vachon BL, Cabral AR. 2011b. Assessment of the design of an experimental cover with capillary barrier effect using 4 years of field data. Geotechnical and Geological Engineering 29(5): 783-802

Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Roesler, A.C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B.F., Rock, S.A. 2004. Field water balance of landfill final covers. J. Environ. Qual., 33: 2317-2332.

Albright, W.H., Benson, C.H., Waugh, W.J. 2010. Water balance covers for waste containment. Principles and Practice, ASCE Press, Reston, VA, USA.

Apiwantragoon, P., Benson, C.H., and Albright, W.H. 2015. Field hydrology of water balance covers for waste containment. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(2): 04014101.

ASTM. 2006a. D2434-68: Standard test method for permeability of granular soils, constant head. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2006b. D5550-06 Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2008. D 6836-02: Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and\or centrifuge. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2009. D 6913-04: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09.

ASTM. 2010. D 4318-10: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index soils. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2010. D5084-10: Standard test methods for measurements of hydraulic conductivity of saturated porous material using a flexible wall permeameter. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2012. D 1557-12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L. 2002. Environnement et gestion des résidus miniers [CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechnique de Montréal, Québec.

Aubertin, M., Cifuentes, E., Martin, V., Apithy, S., Bussiere, B., Molson, J., Chapuis, R.P., and Maqsoud, A. 2006. An investigation of factors that influence the water diversion capacity of inclined covers with capillary barrier effects. Geotechnical Special Publication 147. American Society of Civil Engineers, Reston, Va. pp. 613–624.

Aubertin M, Cifuentes E, Apithy SA, Bussière B, Molson J, Chapuis RP. 2009. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. Canadian Geotechnical Journal 46(10): 1146-1164.

Barnswell, K.D., Dwyer, D.F. 2011. Assessing the performance of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in Northwestern Ohio. Journal of Environmental engineering. ASCE, 137(4): 301-305.

Benson, C., Bosscher, P., Lane, D., and Pliska, R. (1994), Monitoring System for Hydrologic Evaluation of Landfill Final Covers, Geotech. Testing J., 17(2), 138-

149.

Benson, C. H., and Khire, M. V. (1995). Earthen covers for semi-arid and arid climates. Proc., Landfill Closures: Environmental Protection and Land Recovery, Geotechnical special publication 53, J. Dunn and U. Singh, eds., ASCE, New York, 201–217.

Benson, C.H., Bohnhoff, G., Apiwantragoon, P., Ogorzalek, A., Shackelford, C., Albright, W., 2004. Comparison of model predictions and field data for ET covers. In Tailings and Mine Wastes. Taylor and Francis, 137-142.

Benson, C.H., Abichou, T., Albright, W.H., Gee, G.W., Roesler, A.C. 2001. Field evaluation of alternative earthen final covers. International Journal of Phytoremediation, 3:105-127.

Benson, C.H., Bareither, C.A. 2012. Designing water balance covers for sustainable waste containment transitioning state of the art to state of the practice. Geotechnical Engineering State of the Art and Practice, 1-33.

Bews, B. E., Barbour, S. L., Wilson, G. W. and O'Kane, M. 1997. The design of lysimeters for a low flux cover system over acid generating waste. Canadian Geotechnical Golden Jubilee Conference, Pre-print Vol 1, pp 26-33. The Canadian Geotechnical Society: Alliston.

Blight, G.E. 2002. Solar radiation on surfaces of tailings dams-effects of slope and orientation. Tailings and Mine Waste 2002, 333-337.

Bohnhoff, G.L., Ogorzalek, A.S., Benson, C.H., Shackelford, C.D., and Apiwantragoon, P. 2009. Field data and water-balance predictions for a monolithic cover in a semiarid climate. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(3): 333–348. (2009)135:3(333).

Bossé, B. 2014. Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride. Ph.D. Diss., UQAT, Rouyn-Noranda, Canada.

Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A., and Benzaazoua, M. 2015a. Field experimental cells to assess the hydrogeological behaviour of store-and-release covers made with phosphate mine waste. Canadian Geotechnical Journal, 52(9): 1255-1269.

Bossé, B., Bussière, B., Maqsoud, A., Hakkou, R., and Benzaazoua, M. 2015b. Hydrogeological behavior of a store-and-release cover: a comparison between field column tests and numerical predictions with or without hysteresis effects. Mine Water Environment.

Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A., and Benzaazoua, M. 2015c. Influence of extreme events and hydrogeological properties on the release capacity of store-and-release covers in a semiarid climate. In: GéoQuébec 2015, the 68th Canadian Geotechnical Conference

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 Environement., 32(2): 152-167.

Bussière, B. 1999. Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrières capillaires inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Ph.D. Diss., École Polytechnique de Montréal, Canada.

Bussière, B., Aubertin, M., Morel-Seytoux, H.J., and Chapuis, R.P. 1998. A laboratory investigation of the slope influence on the behaviour of capillary barriers. In Proceedings of the 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alta., 4–7 October. Canadian Geotechnical Society, Alliston, Ont. pp. 831–836.

Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R. 2003. The behaviour of inclined covers used as oxygen barriers. Canadian Geotechnical Journal, 40(3): 512-535.

Bussière, B., Wilson, G.W., Maqsoud, A. 2007b. Store-and-release and store-divert-and-release covers. Rapport PERCAN, chapitre 3. UQAT, Rouyn-Noranda, Que.

Bussière, B., Aubertin, M., and Zhan, G. 2007b. Design of inclined covers with capillary barrier effect by S.-E. Parent and A. Cabral – Discussion. Geotechnical and Geological Engineering, 25:673-678.

Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Canadian Geotechnical Journal, 41(5), 787-795.

Cifuentes, E., Aubertin, M., Chapuis, R.P., Molson, J., and Bussière, B. (2006). Analyses of the water diversion length 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, B.C, 1–4 October 2006. Canadian Geotechnical Society, Richmond, B.C. pp. 1744–1749.

Decagon. 2015. EC5 Water content sensors. Operator's Manual, Pullman WA, Decagon Devices Inc., ver. 0, pp. 30.

Decagon. 2011. Dielectric Water Potential Sensor. Operator's Manuel, Pullman WA, Decagon Devices Inc., ver. 1, pp. 31.

Fayer, M.J., Gee, G.W., 1997. Hydrologic model tests for landfill covers using field data. 'Landfill capping in the semi-arid west: problems, perspectives, and solutions'. Environmental Science and Pollution Research. Foundation 53-68.

Hakkou, R., Benzaazoua, M., Bussière, B. 2008a. Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 1 Environmental characterization. Mine Water and Environment, 27: 145-159.

Hakkou, R., Benzaazoua, M., and Bussiere, B. 2008b. Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 2. Mine waste geochemical behavior. Mine Water and the Environment, 27: 160–170.

Hakkou, R., Benzaazoua, M., and Bussiere, B. 2009. Laboratory evaluation of the use of alkaline phosphate wastes for the control of acidic mine drainage. Mine Water and the Environment, 28(3): 206–218.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied engineering in agriculture Journal 1(2): 96-99.

Hauser, V.L. 2008. Evapotranspiration Covers for Landfills and Waste Sites. CRC Press, Boca Raton, FL, USA

Jackson, R.J., 1967. The effect of slope, aspect and albedo on potential evaporation from hillslopes and catchments. Journal of Hydrology, 6(2): 60-69.

Kaushik, T., Khire, M. V., Johnson, T., & Caldwell, M. 2014. Surface Runoff at an Instrumented Catchment Scale Water Balance Final Cover. In Geo-Congress Technical Papers Geo-characterization and Modeling for Sustainability (pp. 4125-4135).

Kelln, Ch., Barbour, S.L., and Qualizza, C. 2008. Controls on the spatial distribution of soil moisture and solute transport in a sloping reclamation cover. Canadian Geotechnical Journal, 45(3): 351–366.

Keller, J.M., Busker, L.T., Milczarek, M.A., Rice, R.C. 2011. Monitoring of the geochemical evolution of waste rock facilities at Newmont's Phoenix Mine. VI Intern. Seminar on Mine Closure, Lake Louise, Canada.

Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O., Hakkou, R. 2013. Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models. J. of Geochemical Exploration, 125: 117-129.

Khire, M.V., Benson, C.H., Bosscher, P.J. 1999. Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H. Journal of Geotechnical. and Geoenvironemental Engineering., 125(6): 518-527.

Knidiri, J., Bussière, B., Hakkou, R., Benzaazoua, M., Parent, É., Maqsoud, A., 2015. (2015): Design, Construction and Preliminary Results for an Inclined Store-and-Release Cover Experimental Cell Built on an Abandoned Mine Site in Morocco. – Proc. the 10th International Conference on Acid Rock Drainage, IMWA 2015. Santiago, Chile (GECAMIN).

Knidiri, J., 2015. Évaluation de l'effet de la pente sur le comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif de type stockage-relargage constitué de rejets calcaires phosphatés en climat. M.Sc. thesis, Department of Mineral Engineering, École Polytechnique de Montréal, QC (with an extension with UQAT).

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. Canadian Geotechnical Journal, 52(999), 1-8.

Lghoul, M., Maqsoud, A., Hakkou, R., Kchikach, A. 2014. Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco. Journal of Geochemica Exploration. doi:10.1016/j.gexplo.2013.12.003.

Lu, N., and Likos, W.J. 2004. Unsaturated Soil Mechanics. John Wiley and Sons.

Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Aubertin, M., and Wilson, W.G., 2007. Instrumentation and monitoring techniques for oxygen barrier covers used to control acid mine drainage. Paper presented at the Mining Industry Conference, CIM, Montréal CD-rom.

Maqsoud, A., Bussiere, B., Aubertin, M., Chouteau, M., and Mbonimpa, M. 2010. Field investigation of a suction break designed to control slope-induced desaturation in an oxygen barrier. Canadian Geotechnical Journal, 48(1): 53-71.

McCarthy, D.F. 2007. Essentials of soil mechanics and foundations: basic geotechnics, 7th Ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

MEND, 2004b. Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings. Volume 5 – Case Studies. Report 2.21.4e. Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada.

Merkus, H.G. 2009. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. Springer Particle Technology Series 17, ISBN: 978-1-4020-9015-8.

Mijares, R. and Khire, M. (2012). Field Data and Numerical Modeling of Water Balance of Lysimeter vs. Actual Earthen Cap. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, 138(8): 889-897.

Milczarek, M., Yao, T., Vinson, J., Word, J., Kiessling, S., Musser, B., Mohr, R., 2003. Performance of mono-layer evapotranspiration covers in response to high precipitation and extended drought periods in the southwestern United States. Proceedings of the 6th Inter. International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Cairns, QLD, 14-17.

Milczarek, M., Steward, F.M., Word, W.B., Buchanan, M.M, Keller, J.M. 2011. Final results for the Morenci tailings experimental reclamation plots. VI Intern. Seminar on Mine Closure, Lake Louise, Canada.

Morel-Seytoux, H.J. 1992. The capillary barrier effect at the interface of two soil layers with some contrast in properties. HYDROWAR Report 92.4, Hydrology Days Publications, 57 Selby Lane, Atherton, CA 94027-3926.

Morel-Seytoux, H.J. 1994. Steady-state effectiveness of a capillary barrier on a sloping interface. In Proceedings of the 14th Hydrology Days. Edited by H.J. Morel-Seytoux. Hydrology Days Publications, 57 Selby Lane, Atherton, CA 94027-3926, pp. 335-346.

Morel-Seytoux, H.J., Meyer, P.D., Nachabe, M, Touma, J., van Genuchten, M.T., Lenhard, R.J. (1996) Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: preserving the effective capillary drive. Water Resour Res 32:1251–1258

Morel-Seytoux HJ, Khanji J (1974) Derivation of an equation of infiltration. Water Resources Research 10(4):795–800

Morris, C.E., Stormont, J.C. 1997. Capillary barriers and subtitle D covers: estimating equivalency. Journal of Environmental Engineering: 3-10.

Ng, C.W.W., Liu, J. Chen R. and Coo, J. L. (2015). Numerical parametric study of an alternative three-layer capillary barrier cover system. Environmental Earth Science. (online May, 2015, 11 pages)

Nyhan, J.W. 2005. Seven-year water balance study of an evapotranspiration landfill cover varying in slope for semiarid regions. Vadose Zone Journal, 4: 466-480.

Nyhan, J.W., Schofield, T.G., and Starmer, R.H. 1997. A water balance study of four landfill cover designs varying in slope for semiarid regions. Journal of Environmental Quality. 26(5): 1385-1392.

O'Kane, M., Porterfield, D., Weir, A., Watkins, A.L., 2000. Cover system performance in a semi-arid climate on horizontal and sloped waste rock surfaces. Proceedings of the 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Denver. 2, 1309-1318.

O'Kane, M., Waters, P., 2003. Dry cover trials at Mt Whaleback. A summary of overburden storage area cover system performance. Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), 147-154.

Ouakibi, O., Loqman, S., Hakkou, R., Benzaazoua, M. 2013. The potential use of phosphatic limestone wastes in the passive treatment of AMD: a laboratory study. Mine Water Environment, 32(4): 266-277.

Parent, S.E., Cabral, A. 2006. Design of inclined covers with capillary barrier effect. Geotechnical and Geological. Engineering, 24(3): 689-710.

Philip, J.R. (1969) Theory of infiltration. Advances in Hydrosciences 5: 215–296.

Rahardjo, H., Santoso, V.A., Leong, E.C., Ng, Y.S., Hua, C.J. 2012. Performance of an instrumented slope covered by a capillary barrier system. Journal of Geotechnical and Geoenvironemental Engineering. 138: 481-490.

Rijtema PE (1965) An analysis of actual evapotranspiration. Rep. 659, Cent. for Agri. Publ. and Doc., Wageningen, Netherlands, 107 p

Rock, S., Myers, B., Fiedler, L. 2012. Evapotranspiration (ET) Covers. International Journal of Phytoremediation, 14(S1): 1-25.

Ross, B. 1990. The diversion capacity of capillary barriers. Water Resources Research, 26, 2625-2629.

Scanlon, B.R., Reedy, R.C., Keese, K.E., Dwyer, S.F. 2005. Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern. USA Vadose Zone J., 4: 55–71.

Shackelford, C.D., and Benson, C.H. 2006. Selected factors affecting water-balance predictions for alternative covers using unsaturated flow models. In Proceedings of GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, 2006.

Steenhuis, T.S., Parlange, J-Y. and Kung, K-J.S. 1991. Comment on “The diversion capacity of capillary barriers” by Benjamin Ross. Water Resources Research, 27(8): 2155-2156.

Stormont, J.C., Morris, C.E., 1998. Method to estimate water storage capacity of capillary barriers. Journal of Geotechnical. and Geoenvironmental. Eng. 124(4), 297-302.

Stormont, J.C. 1996. The effectiveness of two capillary barrier on a 10% slope. Geotechnical and Geological Engineering, 14: 243-267.

Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E.C., and Fredlund, D.G. 2004. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier. Canadian Geotechnical Journal, 41(5): 814-830.

Warrick, A.W., Wierenga, P.J., and Pan, L. 1997. Downward water flow through sloping layers in the vadose zone: analytical solutions for diversions. Journal of Hydrology, 192: 321-337.

Waugh, W.J., Kastens, M.K., Sheader; L.R.L., Benson, C.H., Albright, W.H., Mushovic, P.S. 2008. Monitoring the performance of an alternative landfill cover at the Monticello, Utah, uranium mill tailings disposal site. Waste Management Conférence, Phoenix, AZ, USA, p 24-28.

Weeks, B., and Wilson, G.W. 2006. Prediction of evaporation from soil slopes. Canadian Geotechnical Journal, 43(8), 815-829.

Williams, D.J., Stolberg, D.J., Currey, N.A. 2006. Long-term monitoring of Kidston's "Store/Release" cover system over potentially acid forming waste rock piles. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock drainage (ICARD), St Louis, MO, USA, p 26-30.

Wilson, G.W., Williams, D.J., Rykaart, E.M., 2003. The integrity of cover systems – an update. Proceedings of the 6th International Conference on Acid Rock drainage (ICARD), Cairns, Australia, 3, 14-17.

Wing R, Gee G. 1994. Quest for the perfect cap. Civil Engineering. ASCE 64((10)): 38-41 ISI.

Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, H., McMullen, J. 2001. Capillary cover design for leach pad closure. SME Annual Meeting, Denver, Colorado, 1-9.

Zhan, G., Baumann, W., Milczarek, M.A., Yao, T.M., Rice, R.C. 2007. Cover system design and testing for Pierina mine, Ancash, Peru. International Seminar on Mine Closure, Santiago, Chile.

Zhan, G., Keller, J., Milczarek, M., and Giraudo, J. 2014. 11 years of evapotranspiration cover performance at the AA leach pad at Barrick Goldstrike Mines. Mine Water and the Environment, 33(3): 195–205.

Zornberg, J.G., LaFoutain, L., Caldwall, J.A. 2003. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. J. of Geotechnical and Geoenvironemental. Engineering. 129(6): 427-438.

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Les résultats présentés dans le chapitre 4, autant ceux mesurés que ceux prédits par les solutions analytiques, montrent effectivement que l'inclinaison a une influence significative sur le comportement hydrogéologique des recouvrements SR avec effet de barrière capillaire. Pour pousser plus loin la compréhension du comportement hydrogéologique du recouvrement SR incliné étudié, des modélisations numériques ont été réalisées dans ce chapitre. On rappelle que dans le passé, les outils numériques ont montré leur capacité à prédire de façon réaliste le mouvement de l'eau à travers les couvertures à effet de barrière capillaire (Akindunni et al. 1991, Aubertin et al. 1996, Bussière 1999, Choo and Yanful 2000, Bussière et al. 2003b, Parent and Cabral 2006, Li et al. 2013, Lacroix Vachon et al. 2015).

Par conséquent, les objectifs de ce chapitre sont de compléter l'information obtenue aux autres chapitres et d'aborder certains aspects qui n'ont pas ou peu été traités. On vise plus spécifiquement à reproduire à l'aide d'un modèle numérique simplifié le comportement hydrogéologique du recouvrement SR testé au site Kettara lors de l'application d'événements de précipitations importants, de comparer les prédictions de longueur effective de la barrière capillaire des solutions analytiques avec les résultats numériques et d'évaluer l'influence de prendre la courbe en drainage plutôt que la courbe en mouillage dans la prédiction du comportement hydrogéologique du recouvrement SR testé.

5.1 Méthodes numériques pour simuler l'écoulement de l'eau non saturé en milieu poreux

Avant de présenter les résultats des simulations numériques, il est important de revenir brièvement sur le fonctionnement des méthodes numériques visant à simuler l'écoulement de l'eau non saturé dans les milieux poreux. On présente donc dans cette section les équations résolues dans les modèles numériques pour simuler l'écoulement de l'eau, ainsi qu'une description sommaire du fonctionnement des méthodes numériques. Plus d'informations sur ces équations se trouvent dans Bussière (1999).

L'équation de Richards (1931) permet de résoudre les problèmes d'écoulement de l'eau en milieu saturé et non saturé, autant dans les sols homogènes qu'hétérogènes. Cependant, cette équation se

caractérise par sa forte non-linéarité (c'est-à-dire que les relations entre k, θ et ψ sont fortement non linéaires). Par conséquent, il n'existe pas de solutions analytiques exactes pour la résolution de ces équations ce qui explique le recours aux méthodes numériques pour résoudre les modèles ayant une géométrie complexe proche des situations réelles (au laboratoire et *in situ*). La résolution de problèmes à l'aide de modèles numériques nécessite une discrétisation dans l'espace et dans le temps (dans le cas de modélisations en mode transitoire). Dans la littérature, on retrouve différents codes numériques qui permettent de modéliser l'écoulement de l'eau dans des milieux non saturés en conditions transitoires ou permanentes dont certains ont permis de modéliser l'écoulement de l'eau dans des recouvrements avec effets de barrière capillaire en 1D et 2D. (ex. VSAFT2, Hydrus, Vadose/W, UNSAT-H, SEEP/W, etc.)

Le programme utilisé dans cette étude pour les simulations numériques est le logiciel SEEP/W (version 2007, GEO-SLOPE International). Il emploie la méthode des éléments finis (MEF) pour modéliser les écoulements en milieux saturés et non saturés dans des matériaux poreux comme les sols et les rejets miniers, tant en régime permanent qu'en régime transitoire ainsi que pour diverses conditions frontières (Geo-Slope International 2007). SEEP/W a été choisi parce qu'il a été utilisé avec succès dans des problèmes similaires à ceux de cette étude en conditions non saturées (Chapuis et al. 1993, Yanful and Aubé 1993, Yanful et al. 1993, Chapuis et al. 2001, Apithy 2003, Martin 2003, Bussière et al. 2003a, 2003b, Aubertin et al. 2009, Li et al. 2013) et qu'il permet de modéliser l'écoulement de l'eau en milieu non saturé dans des recouvrements inclinés multicouches avec effets de barrière capillaire.

Chaque matériau est défini dans ce logiciel en lui attribuant une courbe de rétention d'eau (CRE) et une fonction de perméabilité (k_u). SEEP/W intègre trois méthodes afin de prédire et estimer les fonctions de perméabilité non saturées en fonction de la courbe de rétention d'eau et d'une conductivité hydraulique saturée (Green and Corey 1971, Van Genuchten 1980, Fredlund et al. 1994). De façon générale, ces méthodes d'estimation sont plus appropriées pour les sols granulaires que pour les sols argileux. Le logiciel permet aussi d'utiliser des éléments triangulaires et quadrilatères définis à l'aide de nœuds. Plus les éléments sont petits, plus la méthode atteindra une précision élevée, mais plus les calculs peuvent être longs. Les simulations peuvent se faire pour des cas unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) ou bidimensionnel (2D) axisymétrique, en présence d'un sol isotrope ou anisotrope. Le logiciel ne considère pas les phénomènes d'hystérésis et il n'est pas possible d'introduire la présence de la végétation sur le site. Les échanges avec

l'atmosphère, tels que l'évaporation et l'évapotranspiration, ne sont pas pris en compte directement par le logiciel (contrairement aux codes Hydrus et VADOSE/W).

Avec SEEP/W, il est possible d'étudier un écoulement sur un site formé de différentes strates présentant des propriétés hydro-géotechniques différentes. Il est aussi possible de représenter un recouvrement monocouche ou multicouche. SEEP/W a été utilisé pour étudier l'écoulement au sein de colonnes, de cellules expérimentales *in situ* et des cas réels (Bussière et al. 2003b, Cosset 2009). En revanche, SEEP/W n'a pas été très utilisé pour les modélisations des recouvrements situés en climats semi-aride à aride, notamment pour les systèmes de recouvrements alternatifs type SR. Plus de détails concernant le logiciel peuvent être trouvés dans Bussière (1999) et GEOSLOPE International (2012).

5.2 Fonctions hydriques des matériaux simulés

Les matériaux utilisés dans ces simulations numériques sont les deux matériaux constituant le recouvrement SR, soit les rejets calcaires phosphatés et les rejets grossiers réactifs de Kettara dont les propriétés hydriques ont été présentées aux chapitres précédents. Le tableau 5-1 résume les principales propriétés des matériaux utilisés dans ces simulations. Comme énoncé précédemment, pour les présentes modélisations réalisées avec SEEP/W, deux courbes ont été utilisées pour la rétention d'eau de la couche constituée de rejets calcaires phosphatés : la courbe de rétention d'eau en drainage (MDC) et en mouillage (MWC) obtenue à partir de données in situ et de laboratoire et lissées à l'aide du modèle de van Genuchten (1980) (figure 5-1). Pour les rejets grossiers, seule la courbe en drainage a été utilisée. Les fonctions de conductivité hydraulique (k_u) estimées avec le modèle de Fredlund et al. (1994) à partir de la conductivité hydraulique saturée k_{sat} et des courbes de rétention d'eau sont présentées à la figure 5-2.

Tableau 5.1 : Principaux paramètres hydrogéologiques des matériaux utilisés dans la modélisation numérique

Matériel	**AEV (kPa)**	**k_{sat} (cm/s)**	**WEV (kPa)**	**θ_r**	**θ_s**	**Porosité**
Rejets calcaires phosphatés	40	$3{,}7x10^{-4}$	2000	0,01	0,43	0,44
Rejets grossiers de Kettara	1	0,1	2,8	0,01	0,37	0,37

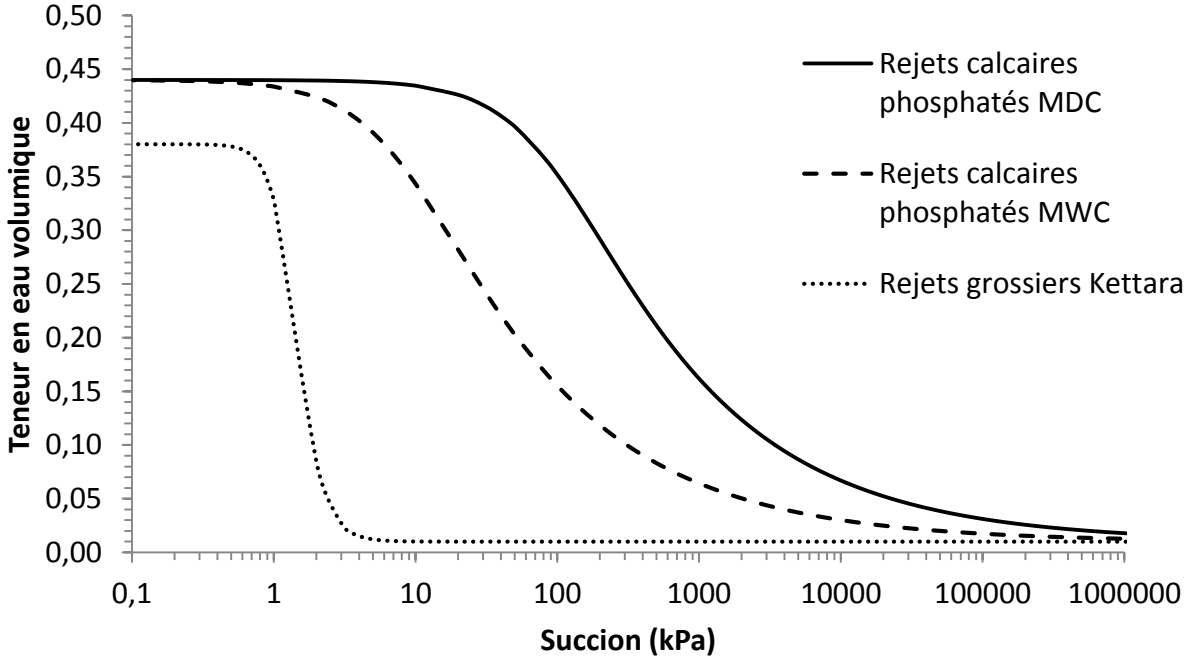


Figure 5.1 **:** Courbes de rétention d'eau des matériaux utilisés dans les modélisations numériques

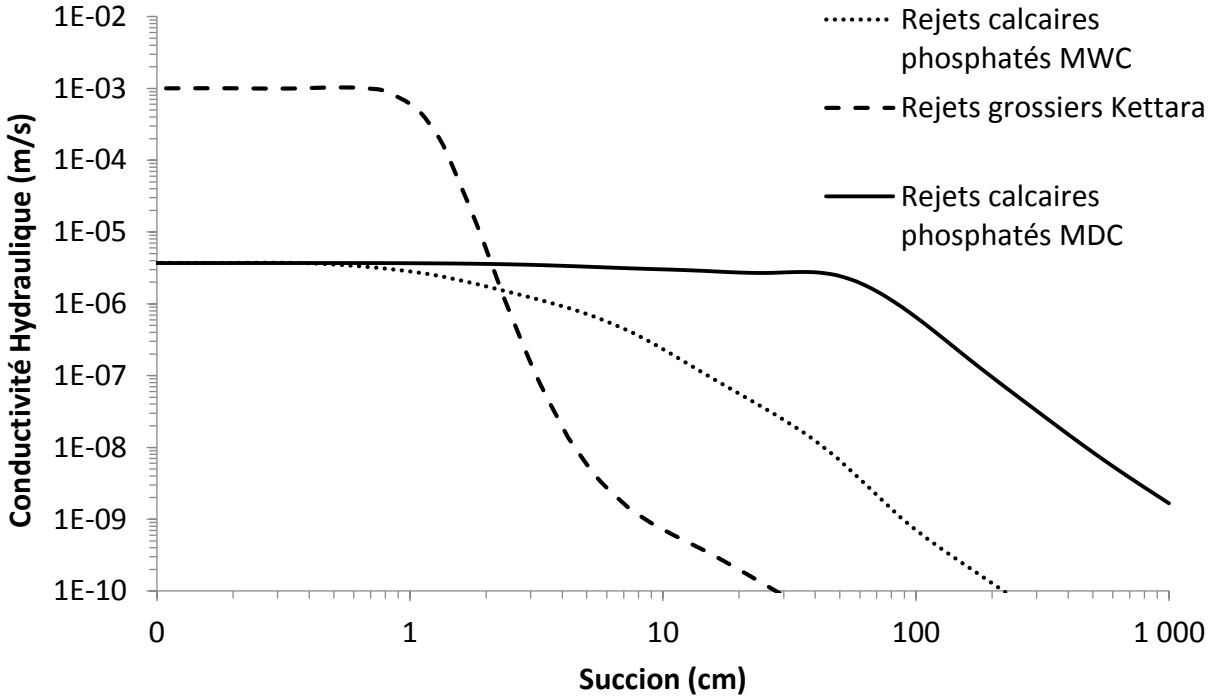


Figure 5.2 : Fonctions de perméabilité des matériaux utilisés dans les modélisations numériques

5.3 Modèle numérique et conditions frontières

Pour effectuer des modélisations numériques, il est primordial de construire un modèle où l'on établit des conditions frontières. La configuration du modèle simplifié définie pour les simulations numériques représente la cellule inclinée de terrain dont la hauteur est de 8 m et l'angle de la pente est de 14.5°; on néglige dans ce modèle la portion horizontale supérieure afin de réduire les temps de calcul. Cette approche a également été prise par Lacroix et al. (2015) pour évaluer l'influence de la pente sur le comportement hydrogéologique des recouvrements inclinés avec effets de barrières capillaires. On retrouve à la figure 5-3 un schéma du modèle simulé numériquement qui présente la géométrie, les matériaux, certaines conditions aux frontières, ainsi que le maillage utilisé.

Le modèle contient deux couches : les rejets calcaires phosphatés (SR) dont l'épaisseur est de 0,8 m et les rejets grossiers de Kettara (bris capillaire) dont l'épaisseur est de 0,5 m. Il est constitué d'éléments finis quadratiques et triangulaires dans la couche de rejets calcaires phosphatés et rectangulaires dans la couche faite de rejets grossiers de Kettara. La densité du maillage choisie dans le recouvrement SR est de 0.09 m qui est plus grande dans la couverture que dans les rejets grossiers où un maillage de 0.05 m a été construit afin d'améliorer la précision du calcul numérique. L'interface entre les deux matériaux est une zone importante. Le maillage est donc plus serré à cet endroit, soit de 0.01 m, comme on peut le voir sur la figure 5-3. Il est important de mentionner que l'effet de l'évaporation n'a pas été pris en compte, que le taux de ruissellement a été négligé dans le premier cas de l'épisode de mouillage de 100 mm vu qu'il est faible - 3,3 mm - et soustrait des précipitations dans le deuxième essai de mouillage de 155 mm (étant donné qu'il est plus important 11 mm). La nappe a été supposée initialement très loin (-8 m).

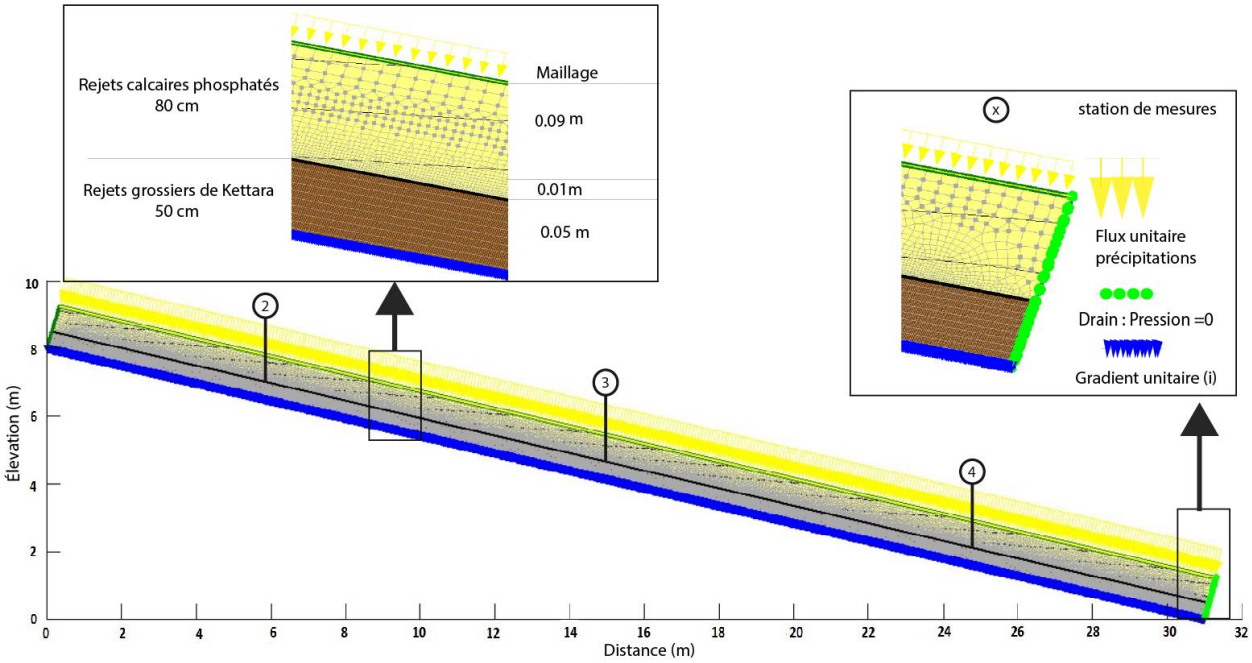


Figure 5.3 : Maillages et conditions frontières utilisés pour la modélisation numérique et emplacements des stations de mesures

Les conditions initiales nécessaires aux simulations en régime transitoire ont été définies suite à une analyse en régime permanent, où la condition frontière du haut correspondait à une pression égale à -8 m d'eau alors que la condition frontière du bas était de -7.9 m d'eau. Ces conditions frontières ont permis d'obtenir les conditions initiales pour la modélisation en régime transitoire qui ressemblent en termes de succion aux valeurs mesurées sur le terrain (environ 80 kPa).

Pour les modélisations en régime transitoire, un drain installé en bas de pente est simulé en appliquant une condition frontière où la pression atmosphérique est égale à 0. La figure 5-3 montre également une autre condition frontière adoptée à la base de la couche du matériau grossier : gradient hydraulique unitaire (i) ou drainage libre (Conditions frontières semblables à ce qui a été utilisés dans Vachon et al. (2015) et Tami et al. 2004). Quant aux conditions appliquées, sur le dessus du modèle, elles consistent en des précipitations qui correspondent aux deux essais de mouillages. Étant donné que le contraste entre les deux matériaux du recouvrement est marqué, le pas de temps choisi est très serré, c'est-à-dire d'environ 40 secondes. Les détails de la modélisation numérique sont résumés au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Détails des paramètres du modèle numérique

Matériaux utilisés	Rejets calcaires phosphatés (0.8 m) Rejets grossiers de Kettara (0.5 m)
Inclinaison des couches	14,5 degrés
Éléments utilisés	Rectangulaire/quadratique/triangulaire
Nombre d'éléments	70 400
Nombres de nœuds	70 715
Conditions frontières initiales en régime permanent	Pression de -8 m à la surface Pression de -7,9 m à la base de la couverture
Conditions frontières initiales en régime transitoire	Drains à la base des rejets grossiers Drains en bas de la couverture Flux de précipitation en haut de la couche SR
Paramètres de convergences	
Nombre maximum d'itérations	50
Nombre d'étapes	1000
Mode incrément des étapes	Exponentiel
Durée de la simulation	5 jours (1er cas de 100 mm/48h) 7 jours (2ème cas de 155mm/48h)

5.3 Résultats de la modélisation numérique

5.3.1 Évènement de mouillage de 100 mm

Cette partie vise à reproduire et comparer les résultats de terrain obtenus lors du premier évènement de mouillage (100mm/48h) et les résultats du modèle numérique. Pour ce faire, la succion initiale à chaque nœud requise pour le calcul du régime transitoire a été obtenue à partir du régime permanent (voir tableau 5.2). En ce qui concerne le régime transitoire, un flux unitaire sur les nœuds du dessus visant à simuler le taux de précipitation P (flux unitaire (q)= 5,8 x 10^{-7} m/s) a été appliqué (les autres conditions frontières sont présentées au tableau 5.2). Les figures 5-4, 5-5 et 5-6 présentent les valeurs mesurées durant les deux jours de la simulation de l'essai de mouillage en

parallèle avec les valeurs prédites par le modèle. Les figures présentent plus spécifiquement l'évolution des profils de teneur en eau volumique et de succion durant l'essai. Afin de pousser plus loin notre compréhension de la capacité de déviation du recouvrement SR incliné, la modélisation a été poursuivie pour une période de 5 jours. Rappelons que la courbe de rétention d'eau des rejets calcaires phosphatés utilisée est la courbe de mouillage.

Les valeurs prédites avec SEEP / W sont plutôt en bon accord avec celles mesurées sur le terrain. Les teneurs en eau volumiques augmentent graduellement d'environ 0,17 à entre 0,20 et 0,30 après deux jours et ce, à toutes les stations. Quant aux succions, celles-ci diminuent d'environ 80 kPa à environ 50 kPa à l'élévation 0,5 m et à environ 10 à 20 kPa à l'élévation 1 m. On remarque également que la succion à l'élévation 0,5m est inférieure d'environ 10 kPa à la station 4 par rapport à la station 2, démontrant ainsi l'effet de la pente. Les principales différences entre les valeurs prédites et mesurées sont observées à la station 2 où les valeurs de θ mesurées à 10 cm sont autour de 0,26 au deuxième jour alors que les valeurs prédites sont autour de 0,33. Les écarts entre les mesures de terrain et les résultats des modélisations peuvent être attribués principalement aux écarts d'ajustement des courbes de rétention d'eau des matériaux utilisés, aux erreurs liées à la précision des instruments ainsi qu'aux hétérogénéités locales du matériau (Bussière, 1999).

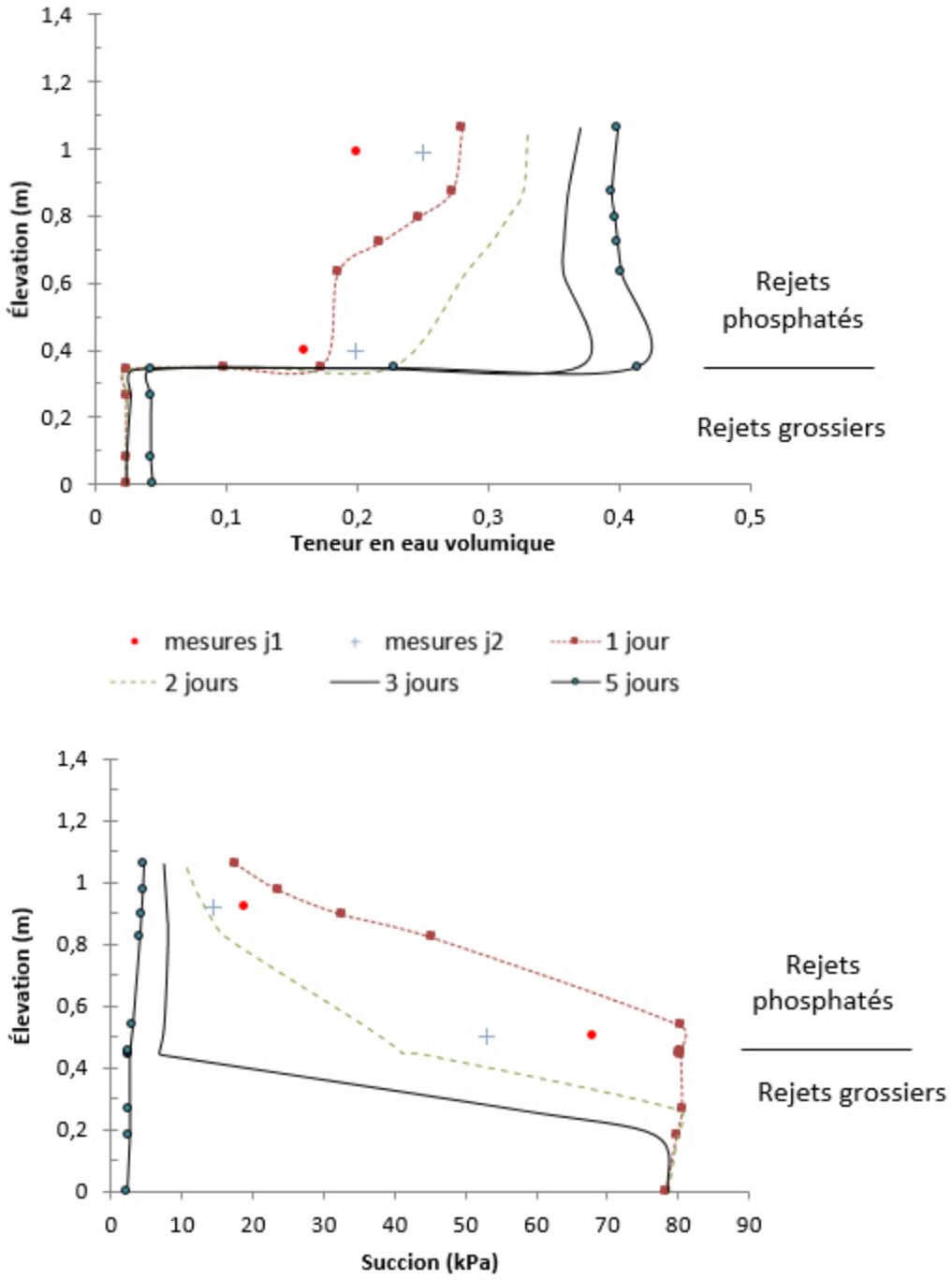


Figure 5.4 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 2

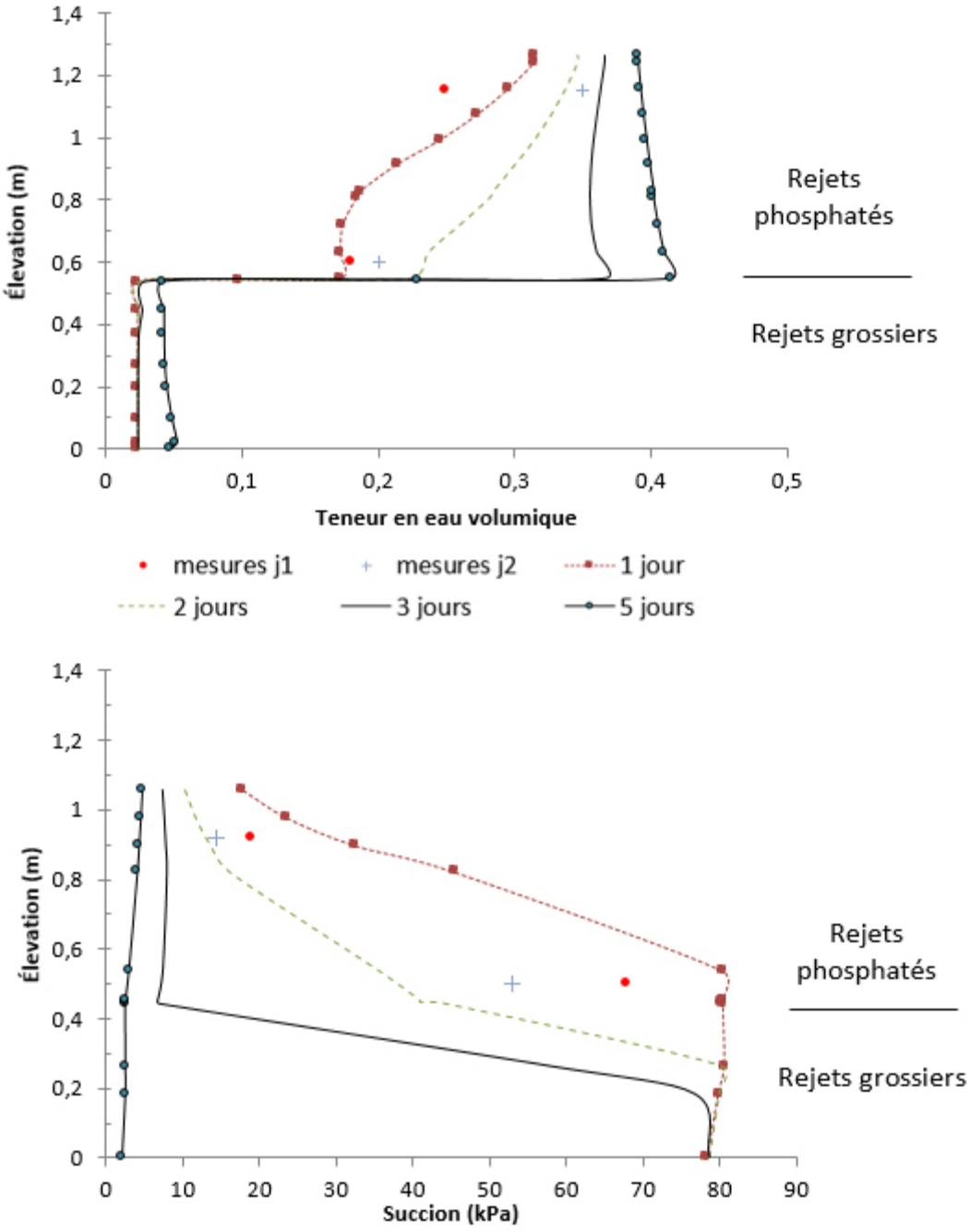


Figure 5.5 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 3

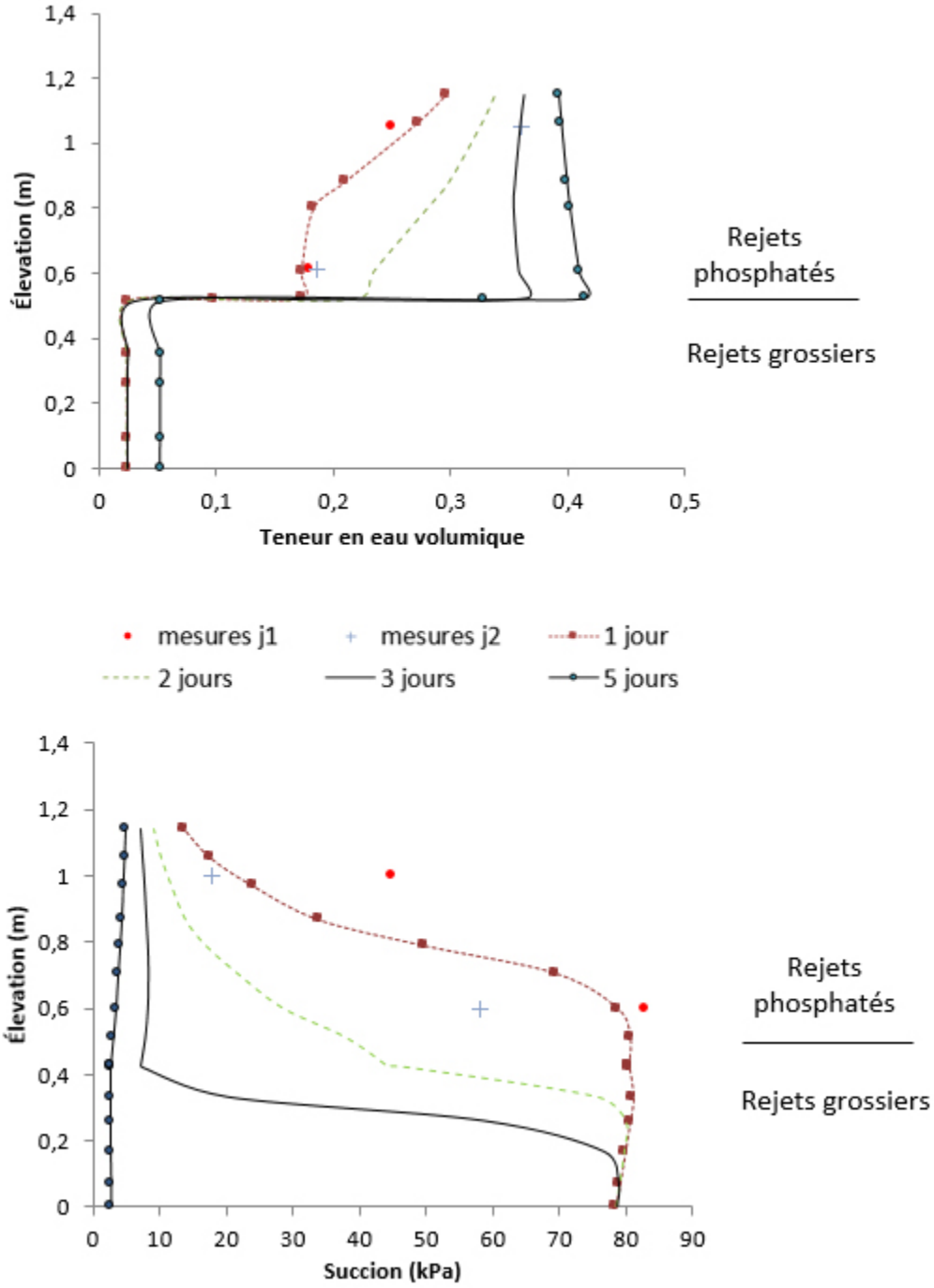


Figure 5.6 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 4

Tel que mentionné précédemment, il a été décidé de poursuivre la modélisation numérique plus longtemps pour évaluer la localisation à l'équilibre du point DDL et pour voir à partir de quel

moment la saturation totale de la couche de rétention d'eau se produirait (si elle se produit) et, par le fait même, les effets de barrière capillaire se dissiperaient. Les résultats montrent que le temps nécessaire pour que la saturation soit complète et que la succion soit près de 0 kPa est d'environ 5 jours. Ainsi, le test réalisé, bien que représentant une condition de précipitation importante, ne permet pas d'atteindre la capacité maximale du recouvrement SR et celui-ci est en mesure de dévier l'eau sur une période encore plus longue que celle testée.

Un des paramètres clés des barrières capillaires inclinées est la localisation du point DDL et l'estimation de la longueur effective de la barrière capillaire (L_{eff}). La figure 5-7 présente la succion à l'interface simulée numériquement à différents temps (1 jour, 2 jours, 3 jours et 5 jours) pour la couverture SR soumise à un taux de précipitation de 5,8 x 10^{-7} m/s. Le point DDL se situe en théorie à l'endroit où la succion atteint la pression d'entrée d'eau du matériau grossier (Steenhuis et al. 1991). Les analyses numériques montrent que les succions diminuent à partir du deuxième jour en bas de pente (autour de 28 m), ce qui concorde très bien avec nos mesures de terrain où il a été montré que durant cet évènement, les succions sont devenues faibles après la station 4 située à 25 m. En ce qui concerne le régime permanent, les modélisations montrent qu'il est atteint au cinquième jour. À ce moment, la valeur de L_{eff} est de l'ordre de 2 m. Cet aspect sera discuté plus loin dans le présent chapitre.

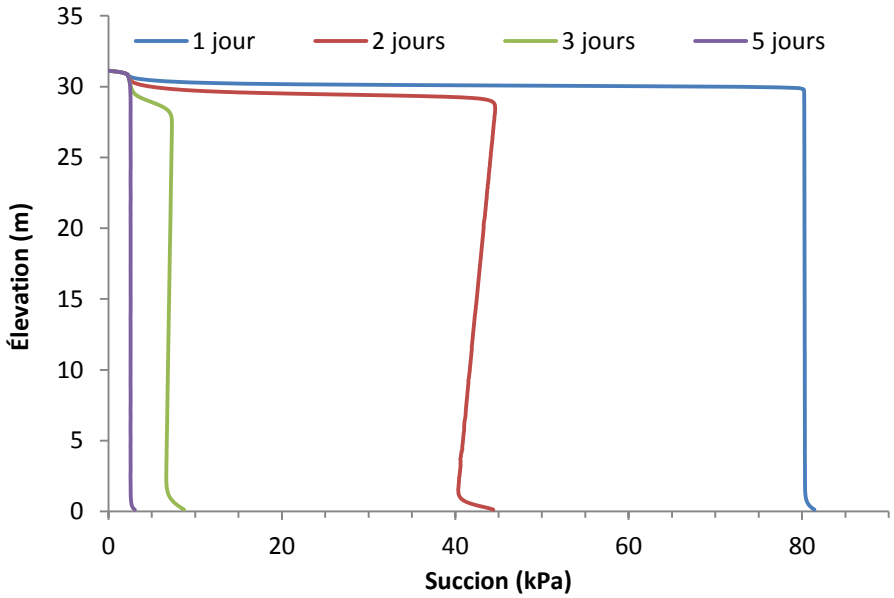


Figure 5.7 : Pressions à l'interface durant l'évènement de mouillage de 100 mm

En résumé, les résultats de la simulation numérique du premier essai de mouillage mettent en évidence une bonne concordance entre les valeurs prédites et celles mesurées sur le terrain. Les résultats numériques montrent également que les profils de pression à l'interface se stabilisent après le troisième jour et que le régime permanent est atteint autour du cinquième jour. Ce phénomène n'a pas été observé sur le terrain, car l'essai de mouillage a été arrêté le deuxième jour.

5.3.2 Évènement de mouillage de 155 mm

Cette section vise à comparer les résultats de terrain obtenus lors du deuxième évènement de mouillage (155mm/48h, suivi d'une précipitation naturelle de 60mm/24h qui a eu lieu 6 jours après le premier évènement) et les résultats numériques. La succion et la teneur en eau volumique initiales obtenues par une modélisation numérique en régime permanent sont identiques à la modélisation pour l'événement de mouillage de 100 mm. Pour les modélisations en régime transitoire, la condition frontière supérieure est une fonction des précipitations (flux unitaire/temps) qui a été placée à la surface et qui représente de façon simplifiée (fonction lissée afin de faciliter la convergence numérique) les conditions observées sur le terrain (voir figure 5-8). Les figures suivantes 5.9 5.10 et 5.11 montrent l'évolution de la teneur en eau volumique et de la succion mesurées et prédites par le modèle aux stations 2, 3 et 4 respectivement dans le matériau SR (rejets calcaires phosphatés). Tout comme pour la simulation précédente, la courbe de rétention d'eau utilisée est la courbe en mouillage.

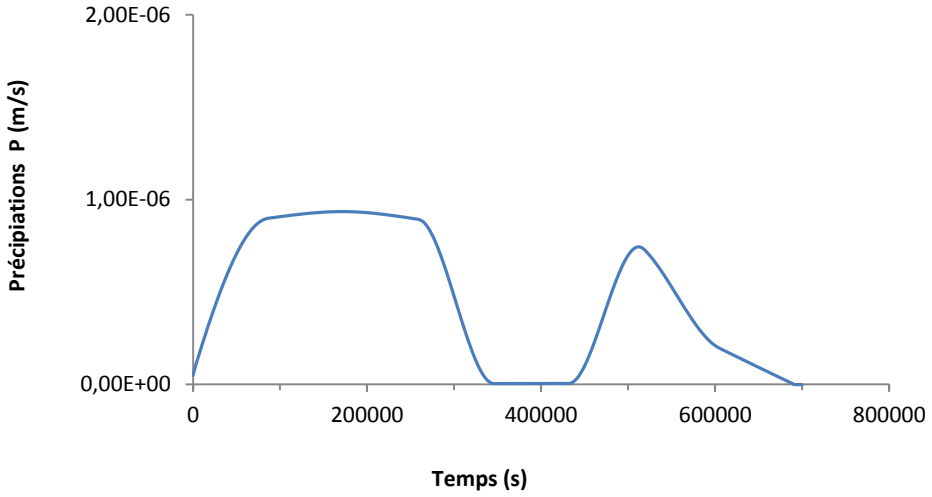


Figure 5.8 : Fonction de précipitations appliquée comme condition frontière durant le régime transitoire

Les profils de succion et de teneur en eau volumique mesurés et prédits montrent des tendances à peu près identiques. Les succions matricielles prédites sont proches de celles mesurées sur le terrain. Les résultats de teneurs en eau volumiques montrent que suite à l'application de l'événement de mouillage de durée de 48h, les teneurs en eau augmentent à des valeurs qui s'approchent de la saturation, particulièrement à la station 4 située au bas de la pente où la saturation complète est pratiquement atteinte. On remarque également que la teneur en eau volumique à l'élévation 1,2 m se draine plus rapidement lorsqu'il y a arrêt des précipitations qu'à l'élévation 0,6 m, et que la station 2 située en haut de la pente se draine plus rapidement que la station 4 située au bas de la pente. Ce comportement est cohérent avec les succions observées qui sont habituellement supérieures en haut de la couche de rétention d'eau et au haut de la pente. Comme pour les modélisations numériques précédentes, l'écart entre les teneurs en eau volumiques mesurées et simulées résulterait essentiellement de la représentativité des fonctions hydriques utilisées (θ-ψ) et (k_u-ψ), aux écarts d'ajustement des courbes de rétention d'eau des matériaux utilisés, aux erreurs liées à la précision des instruments ainsi qu'aux hétérogénéités locales du matériau (Bussière et al. 2003).

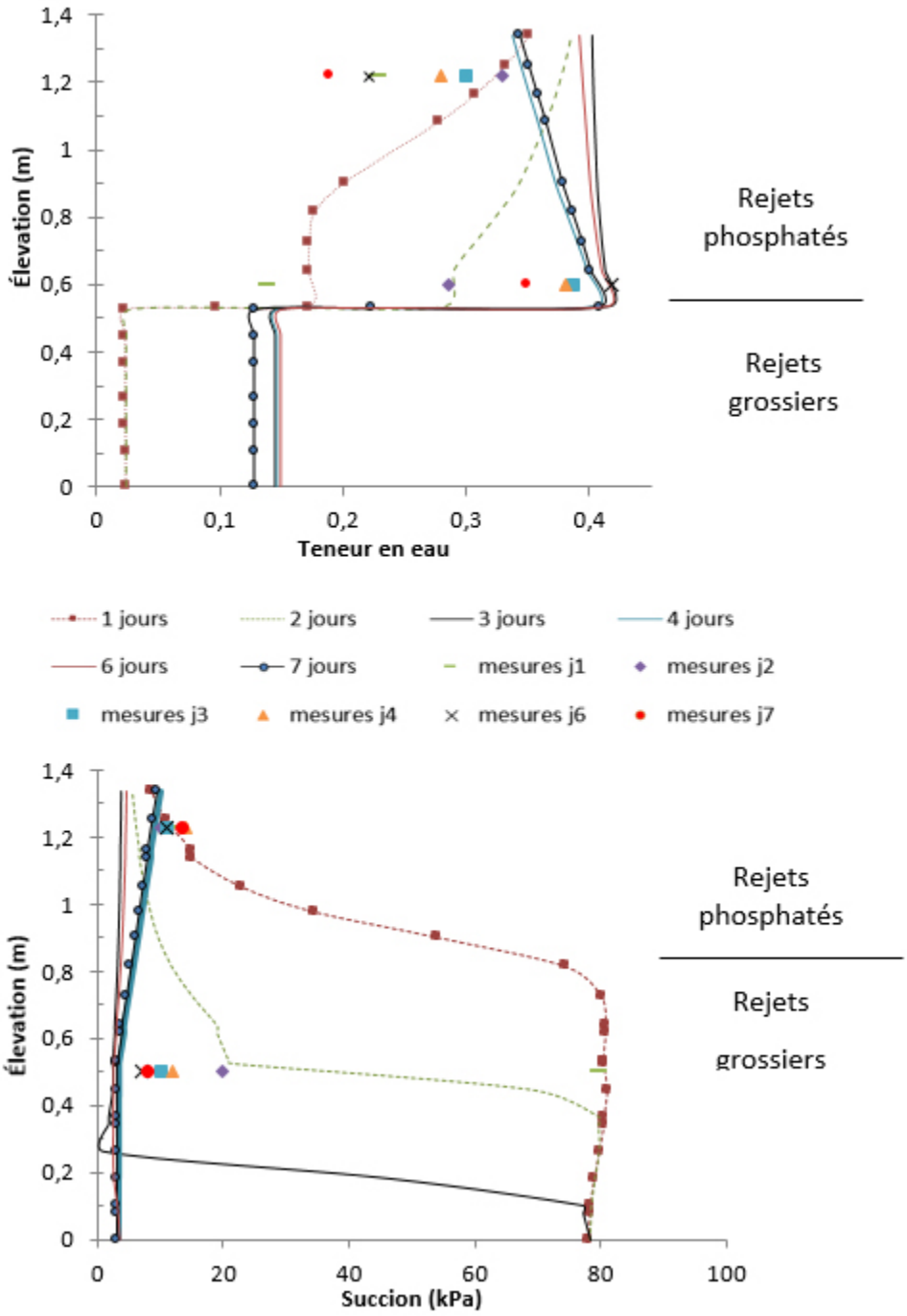


Figure 5.9 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 2

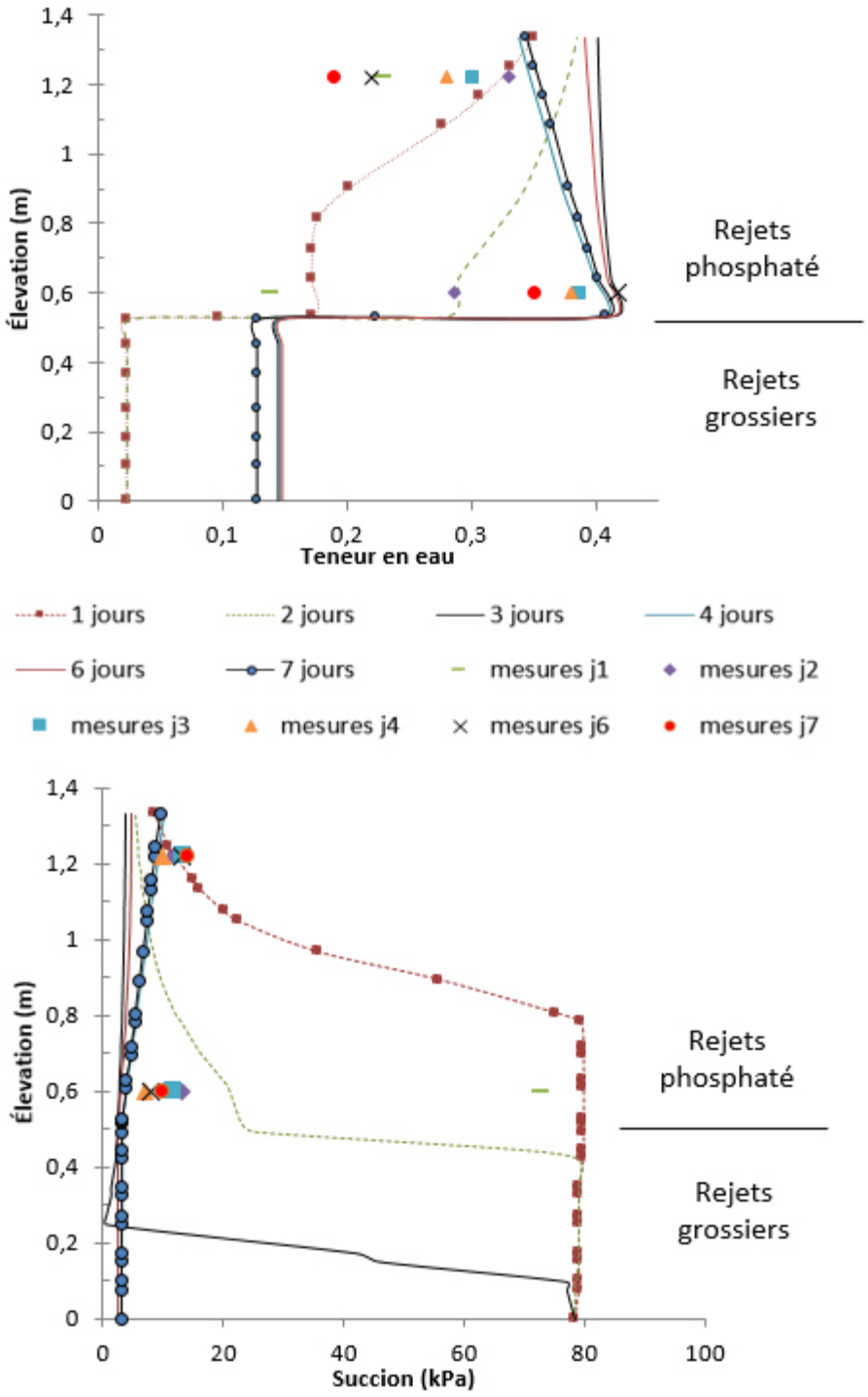


Figure 5.10 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 3

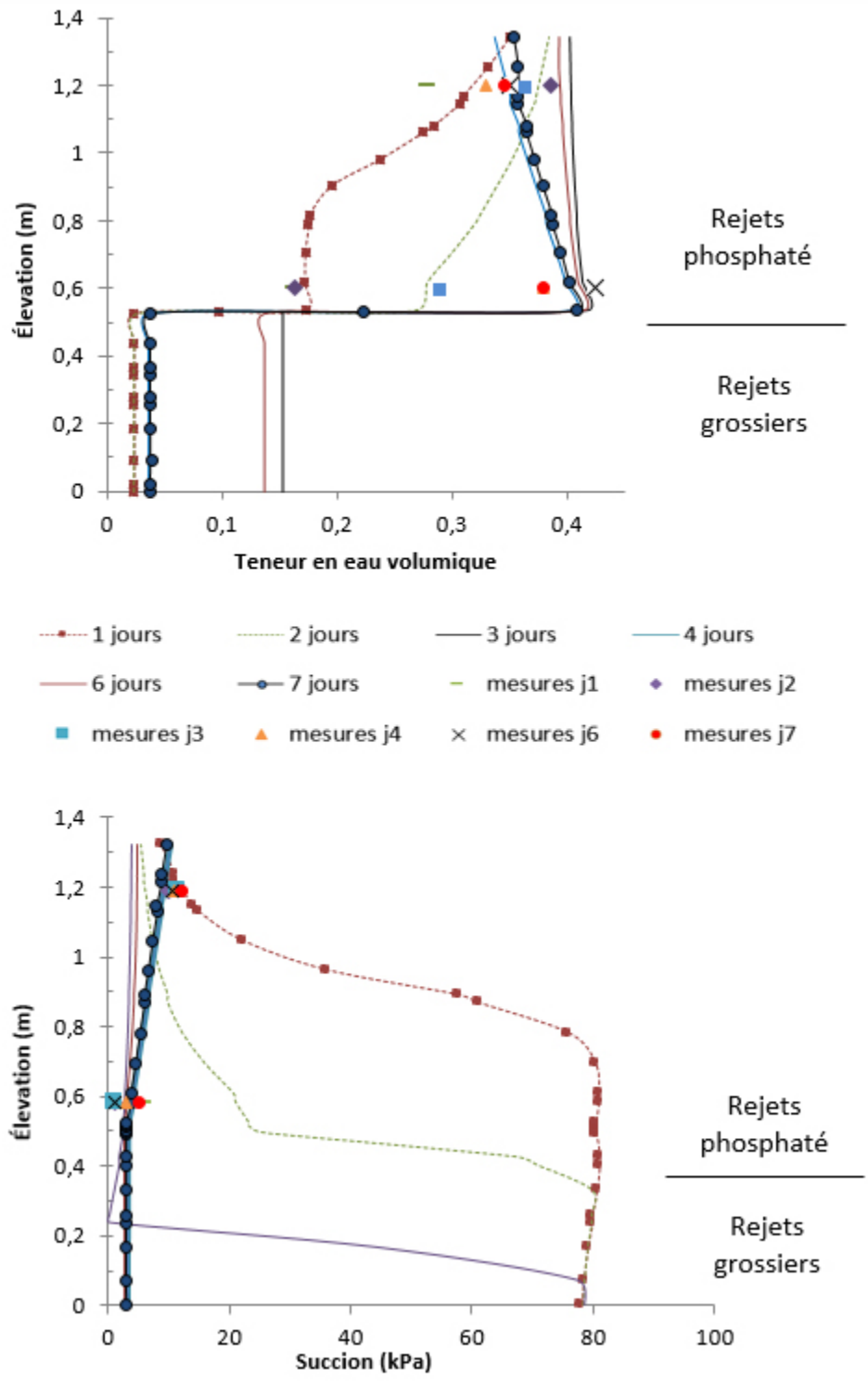


Figure 5.11 : Profils de teneur en eau et de succion prédits (symboles reliés) et mesurés (symboles non reliés) pour la station 4

Les profils de succions à l'interface sont présentés à la figure 5-12 afin de mieux comprendre la capacité de déviation du recouvrement SR incliné testé. Les résultats montrent que la pression à l'interface simulée numériquement durant le deuxième évènement de précipitation diminue à partir du deuxième jour, ce qui confirme les mesures de terrain où on a collecté de l'eau au lysimètre 4 (situé à 19 m). Les précipitations des jours suivant l'évènement, et particulièrement les 63 mm d'eau en 24 h survenus le sixième jour, ont causé la dissipation des effets de barrière capillaire et la percolation a été observée dans tous les lysimètres. La longueur effective de la barrière capillaire après atteinte du régime permanent serait de l'ordre de 1 à 2 m.

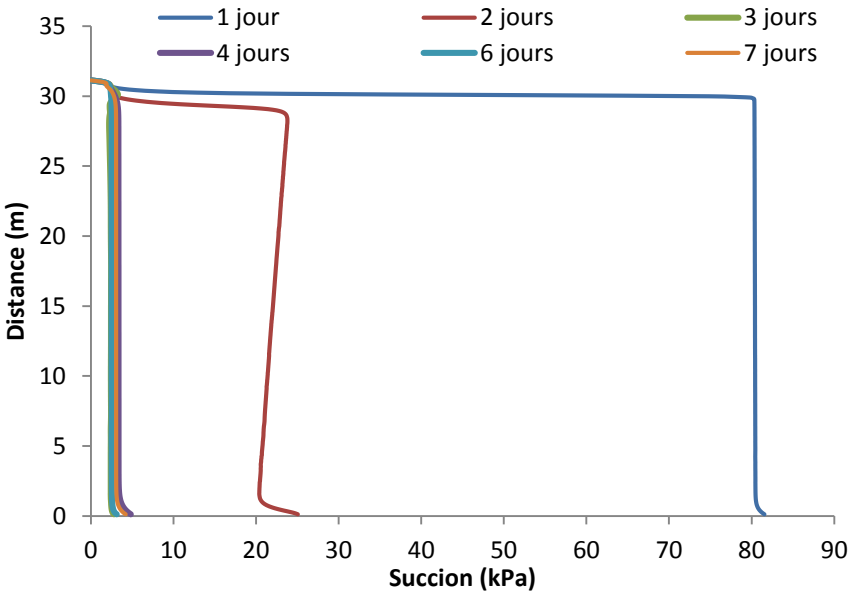


Figure 5.12 : Pressions à l'interface durant l'évènement de mouillage de 155 mm

D'une façon générale, la modélisation numérique valide les données obtenues lors des différents essais réalisés et permet de prédire adéquatement le comportement hydrique du recouvrement SR incliné testé dans la cellule expérimentale du site Kettara.

5.4 L'influence de la courbe de rétention d'eau sur les modélisations numériques

Les rejets calcaires phosphatés, qui font l'objet de cette étude, ont un important ratio d'hystérésis (ratio d'hystérésis = 11) (Bossé 2014). Par conséquent, dans la réalité, les mesures de θ et de ψ sur le terrain se retrouveront à l'intérieur de ces deux courbes. Dans les sections précédentes, la courbe

de rétention d'eau utilisée pour les modélisations numériques est la courbe de mouillage présentée à la figure 5-1. Ce choix est basé sur les travaux de Bossé (2014) qui a montré que les mesures de terrain dans des cellules expérimentales avec recouvrement SR similaire à cette étude situées également au site Kettara étaient près de la MWC. Cependant, il a été jugé intéressant de voir la différence au niveau des prédictions entre la courbe de mouillage (MWC) et la courbe de drainage (MDC) en utilisant les mêmes conditions initiales. Des modélisations numériques ont donc été réalisées avec la courbe de drainage où l'on simule l'essai de mouillage de 100 mm à la station 3 en utilisant la (MDC) et la (MWC). Il est important de souligner que toutes les autres caractéristiques de la modélisation numérique restent identiques à celles présentées au tableau 5-2.

Les figures 5-13 et 5-14 montrent respectivement les profils de teneur en eau volumique et de succion matricielle à la station 3 avec la MDC et la MWC. Les résultats montrent que lorsqu'on utilise la courbe en drainage (figure 5-13a), le régime permanent est obtenu plus rapidement. En effet, les résultats de teneur en eau volumique montrent que la saturation totale avec la MDC est atteinte dès le premier jour tandis qu'avec la MWC, elle est atteinte au bout du cinquième jour. Les profils de succions quant à eux sont en accord avec les résultats de teneur en eau volumique où ils montrent que la cassure du bris capillaire disparait après le premier jour pour la MDC alors que le phénomène disparait seulement après 5 jours pour la MWC. Les résultats de succion à l'interface présentés à la figure 5-15 montrent clairement que le régime permanent est atteint plus rapidement avec la MDC. Cela signifie que le système perdrait sa capacité à dévier l'eau plus rapidement pour un matériau ayant une courbe de rétention d'eau similaire à la MDC, par rapport à la MWC.

En résumé, on peut retenir que la MWC représente bien les conditions de terrain tel que démontré précédemment par Bossé (2014). Le temps pour atteindre l'équilibre lors de la simulation de l'essai de mouillage de 100 mm est plus réaliste avec cette courbe (environ 5 jours). Cependant, il est important de noter que les simulations réalisées ne visaient pas à évaluer l'effet d'hystérésis puisque ce phénomène est plus complexe que de simuler seulement les deux courbes extrêmes (voir Bossé et al. 2015 pour plus de détails).

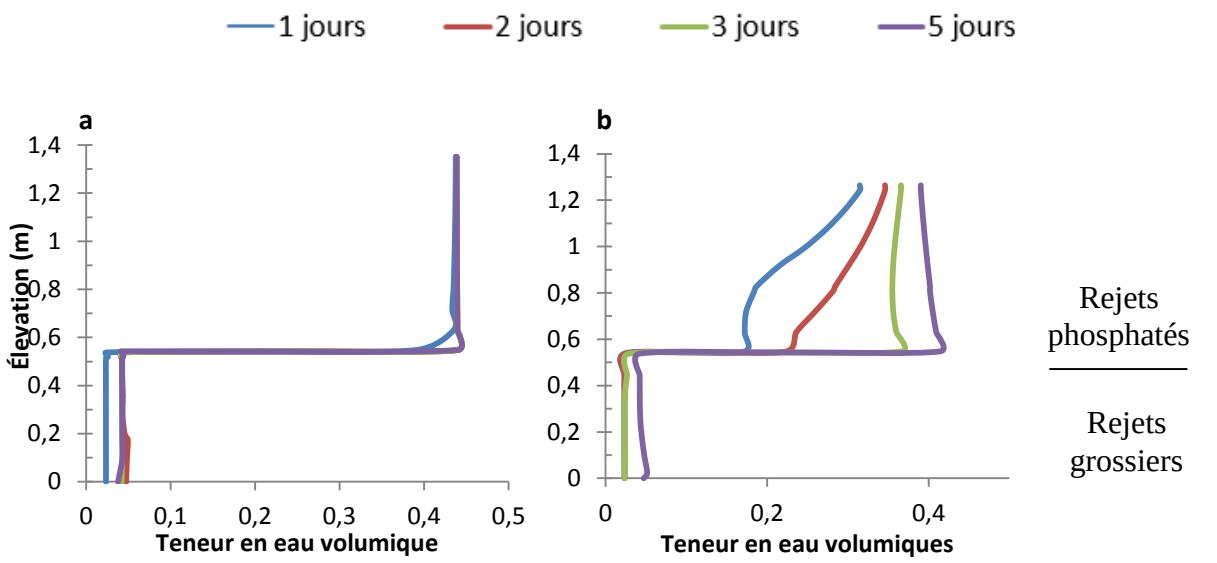


Figure 5.13 **:** Profils de teneur en eau en utilisant (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC)

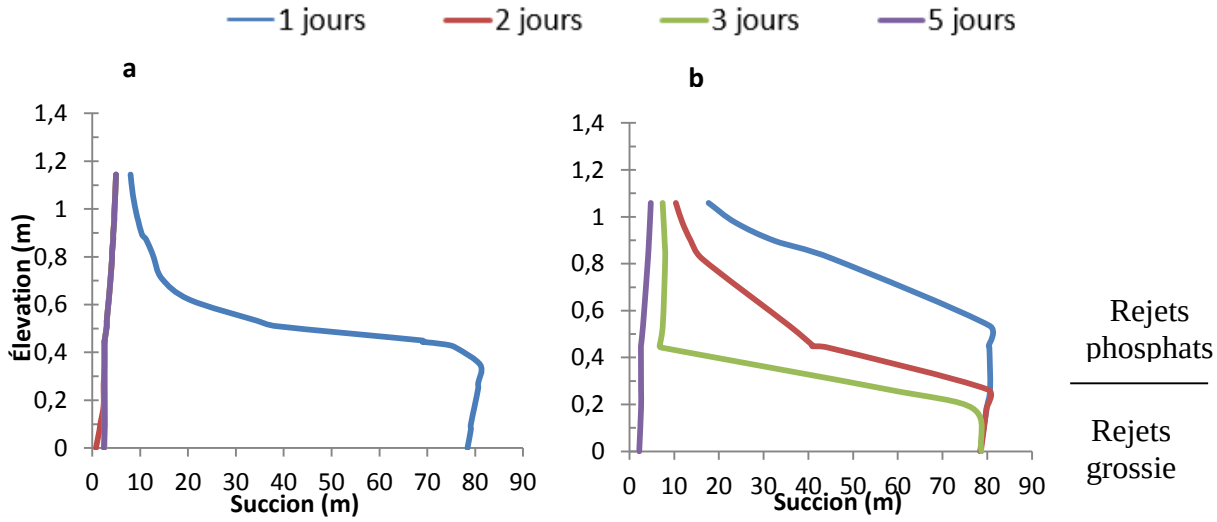


Figure 5.14 : Profils de succion matricielle avec (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC)

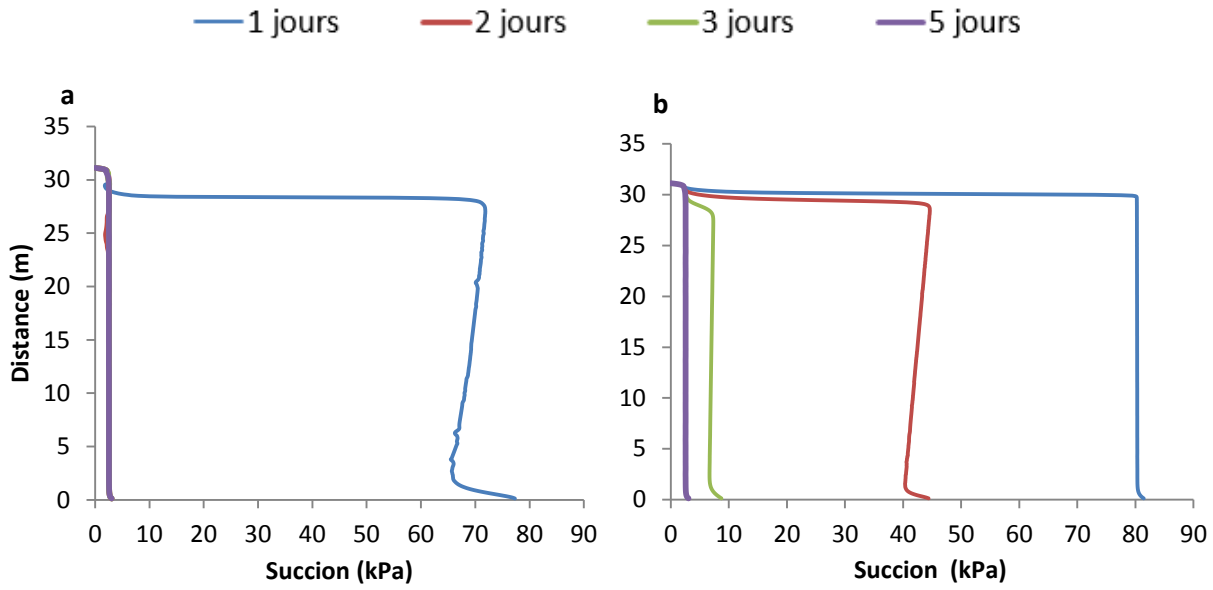


Figure 5.15 : Pressions à l'interface obtenue avec (a) la courbe en drainage (MDC) et (b) la courbe en mouillage (MWC)

5.5 Comparaison de la longueur effective de la barrière capillaire calculée de manière numérique, analytique et estimé sur le terrain

Au chapitre 4, les principales solutions analytiques (Ross 1990, Morel-Seytoux 1994 et l'équation de Ross modifiée par Steenhuis et al. 1991) visant à évaluer la longueur effective L_{eff} en régime permanent ont été présentées. Il est également possible de prédire la longueur effective à partir de modélisations numériques. Pour cela, on peut utiliser les vecteurs vitesses en y à l'interface en fonction de la distance; lorsque la vitesse en y augmente de façon significative à l'interface, cela signifie qu'il y a percolation à travers la couche grossière et que le point DDL est situé à cet endroit. Le tableau 5-3 et 5-4 présentent respectivement les résultats obtenus avec les solutions analytiques, mesurés sur le terrain grâce aux lysimètres et prédits par la modélisation numérique à l'équilibre.

Il est important de rappeler que les solutions analytiques sont valides pour des conditions particulières, dont le régime permanent, et que les modélisations numériques montrent que ce régime permanent est atteint pour des durées qui dépassent 2 à 3 jours. Comme les conditions appliquées réellement sur le terrain n'ont pas permis d'atteindre le régime permanent, la longueur

effective du bris capillaire (L_{eff}) mesurée par les solutions analytiques est une valeur surestimée. Comme l'a démontré Aubertin et al. (2009), le point DDL bouge du bas vers le haut durant la période transitoire jusqu'à se stabiliser lorsque le régime permanent est atteint.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les valeurs de L_{eff} mesurées sur le terrain diminuent avec l'augmentation du taux de précipitation (100, 155 et 215 mm), avec des valeurs de >31 m, 18 m et 9 m. Les valeurs prédites avec les solutions analytiques pour les courbes en mouillage, sont entre 8 et 17 m pour la solution de Ross (1990), entre 6 et 15 m pour la méthode de Steenhuis et al. (1991) et entre 1 et 2 m pour la solution de Morel-Seytoux (1994). Si on compare ces résultats avec ceux prédits par le modèle numérique une fois le régime permanent atteint (soit entre 1,3 et 1,5 m), il semble que l'approche de Morel-Seytoux (1994) soit la plus réaliste pour prédire L_{eff} en régime permanent. Quant à l'influence d'utiliser la courbe en drainage plutôt que la courbe en mouillage, on remarque que les valeurs de L_{eff} sont significativement plus grandes, soit entre 11 et 24 m pour la solution de Ross (1990), entre 10 et 27 m pour la méthode de Steenhuis et al. (1991) et entre 8 et 16 m pour la solution de Morel-Seytoux (1994).

En résumé, ces résultats montrent que la façon la plus réaliste d'estimer la valeur de L_{eff} pour un recouvrement SR incliné consiste à utiliser un modèle numérique validé. Ainsi, on peut prédire la localisation du point DDL, du régime transitoire jusqu'au régime permanent. Si on veut prédire de façon préliminaire la localisation du point DDL, il semble que, pour le cas étudié, la solution analytique de Morel-Seytoux (1994) soit mieux adaptée que celle de Ross (1990) et de Steenhuis et al. (1991). Enfin, toujours pour le cas étudié, la courbe de rétention d'eau qui permet de mieux caractériser le comportement hydrogéologique du recouvrement SR incliné est la courbe en mouillage. Ceci est en accord avec les conclusions de Bossé (2014) qui a étudié le comportement hydrogéologique de recouvrements SR semblables, mais en conditions 1D.

Tableau 5.3 : Principaux paramètres utilisés pour le calcul des solutions analytiques visant à évaluer la (L_{eff}) de la couverture SR inclinée simulée

Materiau	Brooks and Corey (1964)		Rijtema (1965)		
	M	p	a_s (m^{-1})	ψ_r	ψ_a
Rejets calcaires phosphatés (MDC)	2,3	7,6	0,07	2000	40
Rejets calcaires phosphatés (MWC)	2,3	7,6	0,1	300	10
Rejets grossiers de Kettara	0,25	3,5	90	2,8	1

Tableau 5.4 : Comparaison entre les valeurs de L estimées par les solution analytiques, les modélisations numériques à l'équilibre et celles mesurées sur le terrain

Longueur effective									
Précipitation (mm)	Terrain	Numérique		Ross (1990)		Morel-Seytoux (1994)		Steenhuis et al. (1991)	
		A la fin de l'évènement de mouillage	Après l'atteinte du régime permanent	MDC	MWC	MDC	MWC	MDC	MWC
100 mm	L_{eff}>31 m	29	1,5	24 m	17 m	16 m	2 m	27 m	15 m
155 mm	18 m	26	-	15 m	11 m	10 m	1,2 m	16 m	9 m
215 mm	9 m	1,2	1,3	11 m	8 m	8 m	1 m	10 m	6 m

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

La restauration des sites miniers, particulièrement ceux ayant un potentiel de génération de DMA, est un des défis majeurs auxquels font face l'industrie minière et les gouvernements responsables des sites miniers abandonnés. Présentement, plusieurs études sur les systèmes de recouvrement sont menées pour trouver des méthodes de contrôle efficaces et des matériaux alternatifs pour diminuer les coûts de restauration. En climat semi-aride à aride, les systèmes de recouvrement stockage-relargage, connus sous l'appellation anglaise « store-and-release (SR) covers », sont considérés comme une des technologies les plus prometteuses pour contrôler la production de DMA. Ces recouvrements sont constitués d'un matériau fin qui favorise le stockage des eaux météoriques durant les périodes humides et leur libération par le processus physique d'évaporation durant les périodes sèches. Quand le recouvrement est incliné, l'écoulement latéral de l'eau se combine avec l'évaporation pour augmenter l'efficacité du système de recouvrement à réduire les infiltrations.

Toutefois, peu de travaux ont évalué l'effet de la pente sur les recouvrements SR visant à limiter le DMA dans un climat aride. L'objectif principal de ce projet était d'évaluer le comportement hydrogéologique d'un recouvrement SR incliné, dont la couche de rétention d'eau est constituée de rejets miniers, en climat aride et ce, directement sur le site minier abandonné de Kettara (Maroc). L'une des particularités de ce travail est l'utilisation de stériles miniers (les rejets calcaires phosphatés) inertes disponibles en grande quantité et peu valorisés pour le recouvrement SR. Les coûts élevés d'approvisionnement en matériaux naturels sur les sites encouragent les entreprises minières à réutiliser des rejets miniers comme matériaux de recouvrement. Les travaux précédents en laboratoire, à l'échelle intermédiaire sur le terrain et directement sur le site minier, ont pu confirmer le potentiel de ces rejets comme composante d'un recouvrement SR.

Afin de mieux comprendre l'écoulement de l'eau dans un recouvrement SR incliné, plusieurs essais ont été effectués. En premier lieu, une caractérisation des principales propriétés physiques, hydrogéologiques et géotechniques a été réalisée sur les rejets calcaires phosphatés et les rejets miniers grossiers de Kettara. Ces travaux de caractérisation ont permis de montrer que les deux

matériaux ont un contraste suffisant pour créer les effets de barrière capillaire désirés à l'interface entre les deux matériaux.

Ensuite, une cellule expérimentale de terrain a été mise en place directement sur le site de Kettara, site générateur d'un important DMA. La cellule expérimentale est inclinée de 14,5 degrés (8 m de hauteur x 10 m de largeur) et comprend 80 cm de rejets calcaires phosphatés placés directement sur les rejets grossiers réactifs de Kettara. Le comportement hydrogéologique de la cellule inclinée a été évalué durant une année (d'avril 2014 à avril 2015), dans des conditions naturelles, ainsi qu'après application de deux évènements artificiels de précipitations importantes (100 mm/48h et 155 mm/48h). Le suivi a été effectué à l'aide de sondes de teneur en eau volumique, de capteurs de succion matricielle, de lysimètres, de drains et d'une station météorologique.

Les résultats de terrain ont montré qu'en conditions naturelles, la couverture SR a efficacement stocké, dévié et libéré les précipitations naturelles sans que celles-ci n'atteignent les rejets miniers générateurs de drainage minier. Par ailleurs, lors des premiers évènements de mouillage de 100 mm, toutes les sondes ont été affectées, mais aucune percolation n'a été détectée dans les lysimètres, cela en raison de la présence d'effets de barrière capillaire à l'interface des deux matériaux. Cependant, lorsque la couverture a été soumise à des précipitations plus importantes (simulation d'une précipitation de 155 mm en 48h) suivies 6 jours plus tard d'un deuxième événement de précipitations importantes (60 mm en 24h), tous les capteurs de teneur en eau volumétrique ont été affectés et ont détecté des valeurs de teneur en eau volumique proches de la saturation. De plus, la percolation a été mesurée dans tous les lysimètres. En d'autres termes, la capacité de stockage de la couverture a été dépassée, à tout le moins jusqu'au lysimètre le plus haut.

Les résultats ont également montré que la longueur de déviation (L_D) mesurée était supérieure à la longueur de la pente durant la simulation de 100 mm en 48 heures. Toutefois, le point DDL a été estimé à environ 19 m du haut de la pente durant la simulation de 155 mm. L'événement naturel de précipitation qui a eu lieu la même semaine (60 mm en 24 heures) et qui a suivi les 155 mm de précipitation, a déplacé le point DDL vers le haut de la pente d'environ 9 m. Cette étude a également mis en évidence la grande capacité de libération d'eau du matériau étudié. En effet, la couverture a été en mesure de libérer rapidement (pendant près de cinq mois) la grande quantité

d'eau stockée (simulation de 155 mm d'eau et pluies saisonnières), et a pu regagner sa capacité de stockage pour les prochains événements de précipitations.

Quant aux simulations numériques, elles ont permis de valider les résultats de terrain. De plus, elles ont mis en évidence que, durant la simulation des deux évènements de pluie, que ce soit de 100 mm ou de 155 mm, le régime permanent n'a pas été atteint. La modélisation numérique a également montré que le régime permanent est atteint environ 5 jours après le premier évènement de 100 mm et 3 jours après le deuxième événement de 155 mm. La longueur effective de la barrière capillaire (L_{eff}) a été déterminée avec trois méthodes, les essais de terrain, les solutions analytiques et la modélisation numérique. Les résultats de L_{eff} prédits par le modèle numérique une fois le régime permanent atteint sont entre 1,3 et 1,5 m ; ces valeurs sont très similaires aux résultats prédits par la solution analytique de Morel-Seytoux (1994). Les résultats de ce chapitre ont aussi montré que pour le cas étudié, la courbe de rétention d'eau qui permet de mieux caractériser le comportement hydrogéologique du recouvrement SR incliné est la courbe en mouillage, ce qui est en accord avec les travaux précédents de Bossé (2014).

Enfin, l'étude montre que le comportement du recouvrement incliné est influencé par l'effet de la pente et qu'un taux de précipitation critique ne doit pas être dépassé (≈ 100 mm en 48 heures) afin de contrôler l'infiltration d'eau dans les rejets miniers réactifs. Les résultats de cette étude confirment également le potentiel de valorisation des rejets miniers phosphatés en tant que composante principale d'un système de recouvrement hydrogéologique SR pour contrôler l'infiltration vers les rejets générateurs de DMA. L'utilisation de ces matériaux miniers, en plus d'être efficace pour contrôler la génération de DMA, permettrait de réduire les coûts de restauration. Grâce à ces travaux de recherche (1D et 2D), les organismes sur place auront les outils nécessaires à l'élaboration d'un plan de restauration prometteur dans le cas particulier du site minier abandonné de Kettara.

Il est important de mentionner que durant la construction de la cellule expérimentale inclinée (séjour de trois mois), plusieurs défis techniques ont dû être relevés dont les principaux sont:

- La conception de la cellule expérimentale inclinée ainsi que l'achat et l'acheminement d'instruments de mesure jusqu'au site d'étude;
- Le transport de plus de 1 000 tonnes de rejets miniers phosphatés ainsi d'une grande quantité d'eau (95 m^3) jusqu'au site abandonné de Kettara pour les évènements de mouillage;

- La construction et l'instrumentation des cellules de terrain et la simulation des deux évènements de précipitation dans des conditions de travail difficiles, avec des équipements rudimentaires et avec du personnel peu qualifié.

6.2 Recommandations

Les résultats de ces travaux de recherche ont démontré l'existence d'une intensité de précipitation seuil à partir de laquelle la couverture SR perd son efficacité (100 mm). Dans l'éventualité où l'on souhaiterait augmenter l'efficacité du recouvrement, différentes options s'offrent aux concepteurs :

- L'ajout d'une couche de transport (ex : sable) sous la couche calcaire pour augmenter la longueur de diversion et avoir un double effet de barrière capillaire, tel que proposé par certains auteurs (e.g. Stormont 1995, Pease and Stormont 1996, Morris and Stormont 1999, Martin 2003).
- Étant donné que le bas de pente est moins efficace pour limiter les infiltrations, utiliser des matériaux de recouvrement avec des propriétés hydrogéologiques différentes selon la localisation dans la pente pourrait être une bonne solution pour limiter la percolation.
- Augmenter l'inclinaison de la pente pour favoriser le ruissellement tout en prenant en compte la stabilité de l'ouvrage.

Tel que mentionné précédemment, les résultats de modélisations numériques 2D présentés dans ce mémoire sont préliminaires. Pour le design final, il serait important de :

- Refaire des modélisations numériques basées sur les résultats obtenus précédemment (que ce soit les cellules en 1D ou 2D) avec un modèle numérique plus détaillé qui intègre les conditions climatiques et l'effet d'hystérésis.
- Faire une étude paramétrique pour évaluer la capacité de déviation du recouvrement SR où les aspects à l'étude seraient les propriétés des matériaux, les taux de précipitation, le temps d'atteindre le régime permanent et le temps pour regagner sa pleine capacité de stockage.

L'amélioration des solutions analytiques servant à prédire la longueur effective de la barrière capillaire serait aussi un autre aspect important à investiguer davantage puisqu'il semble y avoir des écarts importants lorsque le régime permanent est atteint, à tout le moins dans le cas étudié ici. D'autres recherches sont également recommandées pour évaluer l'effet de la végétation sur les couvertures SR (1D et 2D) pour diminuer les risques d'érosion (hydrique et éolienne) et augmenter

le processus de libération des eaux météoriques par évapotranspiration. Faire le suivi du comportement du recouvrement SR sur plusieurs années est également un aspect important puisque la présente étude s'est déroulée sur une période qui est malgré tout relativement courte. À titre d'exemple, l'évolution des propriétés physico-chimiques et minéralogiques de la couche SR et son influence sur le comportement hydrogéologique du recouvrement à long terme mériterait d'être regardée de près. Il serait aussi intéressant d'effectuer des essais plus poussés sur l'influence de la direction de la pente (Nord / Sud) et de l'angle (entre 0 et 20°) sur l'évapotranspiration, étant donné que ces paramètres peuvent avoir un effet significatif sur le rayonnement solaire net et, par conséquent, sur l'évaporation potentielle et réelle (en d'autres termes sur la capacité de libération) (Weeks and Wilson, 2006).

Finalement, sur le plan technique, les équipements de mesures EC-5, MPS-2, Watermarks et les tensiomètres Jetfill ont donné de bons résultats. Cependant, l'effet de la température a été négligé et il serait intéressant d'évaluer exactement l'influence de cette omission. Les tensiomètres Jetfill semblaient donner de bons résultats (avec peu ou presque pas d'arrêt dans les mesures). Cependant, ils nécessitent un entretien, un suivi manuel et la formation de gens qui se trouvent sur place. Il serait pertinent de tenter de mettre en place un capteur de pression sur l'équipement afin de prendre des mesures en continu. Les lysimètres et les drains installés avaient pour objectif de déterminer la localisation du point DDL et évaluer avec plus de précision les composantes du bilan hydrique. Afin de faire une estimation plus précise du bilan hydrique, il serait intéressant d'installer des équipements plus performants pour bien collecter toute la percolation (ex : lysimètres couvrant toute la largeur de la cellule) et installer un système de mesure des débits provenant des drains performants afin de bien quantifier toute l'eau de ruissellement.

BIBLIOGRAPHIE

Aachib, M. (1997). "Étude en laboratoire de la performance de barrières de recouvrement constituées de rejets miniers pour limiter le DMA." Thèse de doctorat, Département des génies civil, géologie et des mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec.

Abdolahzadeh, A. M., Lacroix Vachon, B. and Cabral, A. R. (2011). "Evaluation of the effectiveness of a cover with capillary barrier effect to control percolation into a waste disposal facility." Canadian Geotechnical Journal **48**(7): 996-1009.

Abdolahzadeh, A.M., Lacroix Vachon, B., and Cabral, A.R. 2008. "Hydraulic barrier and its impact on the performance of cover with double capillary barrier effect". Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, 21–24 September. [CD-ROM].

Akindunni, F. F., Gillham, R. and Nicholson, R. (1991). "Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings." Canadian Geotechnical Journal **28**(3): 446-451.

Albrecht, B. A. and Benson, C. H. (2001). "Effect of desiccation on compacted natural clays." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **127**(1): 67-75.

Albright, W. H., Benson, C. H. and Apiwantragoon, P. (2012). "Field Hydrology of Landfill Final Covers with Composite Barrier Layers." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **139**(1): 1-12.

Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., McDonald, E. V., Tyler, S. W. and Rock, S. A. (2006). "Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Abichou, T., Roesler, A. C. and Rock, S. A. (2003). "Examining the alternatives." Civil engineering **73**(5): 70-75.

Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Roesler, A. C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B. F. and Rock, S. A. (2004). "Field Water Balance of Landfill Final Covers." **2332**: 2317-2332.

Albright, W. H., Benson, C. H. and Waugh, J. W. (2010). "Water balance covers for waste containment: principles and practice". American Society of Civil Engineers (ASCE).

Alfnes, E., Kinzelbach, W. and Aagaard, P. (2004). "Investigation of hydrogeologic processes in a dipping layer structure: 1. The flow barrier effect." Journal of contaminant hydrology **69**(3-4): 157-172.

Apithy, S. A. (2003). "Étude du comportement de couvertures à effets de barrière capillaire placées sur des haldes à stériles en climat semi-aride". Mémoire (M.Sc.A.), École Polytechnique, Montréal, Canada.

Apiwantragoon, P., Benson, C. H. and Albright, W. H. (2015). "Field hydrology of water balance covers for waste containment." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

ASTM. 2006a. D2434-68: Standard test method for permeability of granular soils, constant head. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2006b. D5550-06 Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2008. D 6836-02: Standard test methods for determination of the soil water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and\or centrifuge. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2009. D 6913-04: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.09.

ASTM. 2010. D 4318-10: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index soils. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2010. D5084-10: Standard test methods for measurements of hydraulic conductivity of saturated porous material using a flexible wall permeameter. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

ASTM. 2012. D 1557-12: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08.

Arnold, S., Schneider, A., Doley, D. and Baumgartl, T. (2015). "The limited impact of vegetation on the water balance of mine waste cover systems in semi-arid Australia." Ecohydrology **8**(3): 355-367.

Aubertin, M. (1995). "Évaluation en laboratoire des barrières sèches construites à partir de résidus miniers : rapport final." Projet CDT (Ecole polytechnique de Montréal, Centre de développement technologique) **1622**: 164.

Aubertin, M., Aachib, M., Bussière, B. and Chapuis, R. P. (1996). "Recouvrements multi-couches avec effets de barrière capillaire pour contrôler le drainage minier acide: étude en laboratoire et in situ." Symposium Int. "Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement": 181-199.

Aubertin, M. and Bussière, B. (2001). "Meeting environmental challenges for mine waste management." Geotechnical news **19**(3): 21-26.

Aubertin, M., Bussière, B., Barbera, J., Chapuis, R., Monzon, M. and Aachib, M. (1997). "Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings". Proceedings 4th International Conference on Acid Rock Drainage.

Aubertin, M., Bussière, B. and Bernier, L. (2002). "Environnement et gestion des rejets miniers." Montréal: Presses Internationales Polytechniques.

Aubertin, M., Chapuis, R., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J. and Tremblay, L. (1995). "Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers." Rapport MEND/NEDEM **2**.

Aubertin, M., Chapuis, R., Bussière, B. and Aachib, M. (1993). "Propriétés des résidus miniers utilisés comme matériau de recouvrement pour limiter le drainage minier acide (DMA)". Geoconfine 93. Symposium international.

Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S., 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. and Maqsoud, A. (2006). "An investigation of factors that influence the water diversion capacity of inclined covers with capillary barrier effects." Geotechnical & Geological Engineering: 1-12.

Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M. and Maqsoud, A. (2015). "Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA." Symposium 2015 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, QC.

Aubertin, M., Ricard, J.-F. and Chapuis, R. P. (1998). "A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines." Canadian Geotechnical Journal **35**(1): 55-69.

Awoh, A. S. (2012). "Étude expérimentale du comportement géochimique de résidus miniers hautement sulfureux sou sun recouvrement en eau". Ph.D. Diss. Thesis UQAT, Rouyn-noranda, QC, Canada.

Belzile, N., Chen, Y. W. and Li, Y. (2004). "A review on pyrrhotite oxidation." Journal of Geochemical Exploration **84**: 65-76.

Benson, C., Abichou, T., Albright, W., Gee, G. and Roesler, A. (2001). "Field evaluation of alternative earthen final covers." International Journal of Phytoremediation **3**(1): 105-127.

Benson, C., Bohnhoff, G., Apiwantragoon, P., Ogorzalek, A., Shackelford, C. and Albright, W. (2004). "Comparison of model predictions and field data for an ET cover". Tailings and Mine Waste.

Benson, C., Bohnhoff, G., Ogorzalek, A., Shackelford, C., Apiwantragoon, P. and Albright, W. (2005). "Field data and model predictions for a monolithic alternative cover." Waste containment and remediation. Geotechnical Spec. Publ **142**: 1-12.

Benson, C. H., Albrecht, B., Motan, E. and Querio, A. (1998). "Equivalency assessment for an alternative final cover proposed for the Greater Wenatchee Regional Landfill and Recycling Center." Envir. Geotech. Rep. No. 98-6, Dept. of Civ. and Envir. Eng., Univ of Wisconsin-Madison.

Benson, C. H. and Khire, M. V. (1995). "Earthen covers for semi-arid and arid climates". Landfill Closures : Environmental Protection and Land Recovery, ASCE.

Benson, C. H., Sawangsuriya, A., Trzebiatowski, B. and Albright, W. H. (2007). "Postconstruction changes in the hydraulic properties of water balance cover soils." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering **133**(4): 349-359.

Blowes, D. W., Ptacek, C. J., Jambor, J. L. and Weisener, C. G. (2003). "The geochemistry of acid mine 579 drainage." Chapter 9.05 of the Treatise on geochemistry, Holland, H.D., Turekian, K.K. (editors.), 580 Elsevier, ISBN: 0-08-043751-6, Elsevier Ltd **581**: 149-204.

Boehm, R., Benson, C., Foose, G. and McGuire, P. (1998). "Performance of two unvegetated alternative earthen final covers." Rep. Prepared for city of Glendale, Arizona, RUST Environment and Infrastructure, Sheboygan, Wis.

Bossé, B. (2014). Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride, UQAT.

Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqsoud, A. and Benzaazoua, M. (2015). "Field Experimental Cells to Assess the Hydrogeological Behaviour of Store-and-Release Covers Made with Phosphate Mine Waste." Canadian Geotechnical Journal: 150126143533001-150126143533001.

Bossé, B., Bussière, B., Maqsoud, A., Hakkou, R. and 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.

Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Plante, B. and Bussiere, B. (2015). "A quantitative approach for the estimation of the "fizz rating" parameter in the acid-base accounting tests: A new adaptations of the Sobek test." Journal of Geochemical Exploration **153**: 53-65.

Brooks, R. and Corey, T. (1964). "Hydraulic properties of porous media." Hydrology Papers, Colorado State University.

Buckingham, E. (1904). "Contributions to our knowledge of the aeration of soils." Bureau of Soils, Department of Agriculture, Washington, DC.

Burdine, N. (1953). "Relative permeability calculations from pore size distribution data." Journal of Petroleum Technology **5**(03): 71-78.

Bussière, 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. Département des génies civil, géologique et des mines. École polytechnique de Montréal: 393.

Bussière, B. (2007). "Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposai approaches." Colloquium 2004, Canadian Geotechnical Journal **144**: 1019-1052.

Bussière, B., Apithy, S. a., Aubertin, M. and Chapuis, R. P. (2003a). "Diversion capacity of sloping covers with capillary barrier effects." 56th Annual Canadian Geotechnical Conference and 4th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference(September).

Bussière, B., Aubertin, M. and Chapuis, R. P. (2002). "The behavior of inclined covers used as oxygen barriers." NRC Research Press Web site.

Bussière, B., Aubertin, M. and Chapuis, R. P. (2003b). "The behavior of inclined covers used as oxygen barriers." Can. Geotech. J. **40**(3): 512-535.

Bussière, B., Aubertin, M. and Julien, M. (2001). "Covers with capillary barrier effects for limiting acid mine drainage: theoritical and practical aspects." Vecteur Environnement, vol. 34(3), 37-50. **34**(3): 37-50.

Bussière, B., Aubertin, M., Zagury, G. J., Potvin, R. and Benzaazoua, M. (2005). "Principaux défis et pistes de solutions pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnés." Symposium 2005 sur l'environnement et les mines. UQAT, Rouyn-Noranda, Canada: 50.

Bussière, B., Aubertin, M. and Zhan, G. (2007). "Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect by S.-E. Parent and A. Cabral." Geotechnical and Geological Engineering **25**(6): 673-678.

Bussière, B., Benzaazoua, M., Aubertin, M., Lelièvre, J., Bois, D. and Servant, S. (1998). "Valorisation des résidus miniers : une approche intégrée – Phase II, Rapport final soumis au ministère des ressources naturelles du Québec." 198.

Bussière, B., Maqsoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J. and Julien, M. R. (2006). "Performance of the oxygen limiting cover at the LTA site, Malartic, Quebec." CIM Bulletin **1**(6): 1-11.

Chapuis, R. P. (2004). "Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio." Canadian Geotechnical Journal **41**(5): 787-795.

Chapuis, R. P., Chenaf, D., Bussière, B., Aubertin, M. and 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., Crespo, J. R., Chenaf, D. and Aubertin, M. (1993). "Evaluation of a groundwater F.E.M. software for steady and unsteady state conditions." In Proceedings of the 46th Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, Sask., 27–29 September: 61–70.

Childs, E. C. and Collis-George, N. (1950). "The permeability of porous materials". Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society.

Choo, L.-P. and Yanful, E. K. (2000). "Water flow through cover soils using modeling and experimental methods." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **126**(4): 324-334.

Cifuentes, E., Aubertin, M. and Chapuis, R. P. (2006). "Analyses of the water diversion length of inclined, layered soil covers." Sea to sky Geothechnique(514): 1744-1749.

Cosset, G. (2009). "Comportement hydrogéologique d'une couverture monocouche sur des résidus miniers sulfureux: essais en colonne et simulations numériques." École Polytechnique de Montréal.

Coulombe, V. (2012). "Performance de recouvrements isolants partiels pour contrôler l'oxydation de résidus miniers sulfureux." Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

Cyr, J., Maurice, R. and Demers, I. (2011). "Restauration du site minier Aldermac." C.R. Symposium 2011 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, QC.

Dagenais, A. M., Aubertin, M., Bussière, B. and Martin, V. (2005). "Large scale applications of covers with capillary barrier effects to control the production of acid mine drainage." PostMining 2005, November 16-17, Nancy, France.

Dane, J. H. and Topp, G. C. (2002). "Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, Madison,WI." Soil Science Society of America.

Decagon (2009). "Dielectric water potential sensor. Operator's manual, version 3, Decagon Devices Inc, Pullman WA, USA.".

Decagon (2014). ECH2O-TE/EC-TM water content, EC and temperature sensors. Operator's manual, Decagon Devices Inc, Pullman WA, USA.

DeJong, J., Tibbett, M. and Fourie, A. (2015). "Geotechnical systems that evolve with ecological processes." Environmental Earth Sciences **73**(3): 1067-1082.

Demers, I. (2008). "Performance d'une barrière à l'oxygène constituée de résidus miniers faiblement sulfureux pour contrôler la production de drainage minier acide". Ph.D. Thesis Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, QC, Canada.

Durham, A. J. P., Wilson, G. W., Bews, B. E. and Currey, N. (1999). "Evaluation of a low flux cover system for mine waste rock in a semi-arid environment". 52nd Canadian Geotechnical Conference.

Dwyer, S. F. (2001). "Finding a better cover." Civil Engineering **71**(1): 58.

Dwyer, S. F. (2003). "Water balance measurements and computer simulations of landfill covers". Ph.D Diss, The University of New Mexico, Albuquerque,NM,USA.

Dwyer, S. F., Reavis, B. and Newman, G. (2000). "Alternative Landfill Cover Demonstration, FY2000 Annual Data Report." Sandia Report, in print.

Edraki, M., Golding, S., Baublys, K. and Lawrence, M. (2005). "Hydrochemistry, mineralogy and sulfur isotope geochemistry of acid mine drainage at the Mt. Morgan mine environment, Queensland, Australia." Applied Geochemistry **20**(4): 789-805.

EPA (1997). "Exposure factors handbook (1997 final report)." Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

EPA (2003). "Water Quality Trading Policy." US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

EPA (2011). "Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment." US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

EPA (2012). "Evapotranspiration covers. Technology innovation and field services division." US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

EPA (2013). "Evapotranspiration covers. Technology innovation and field services division " US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.

Essaifi, A., Ballèvre, M., Marignac, C. and Capdevila, R. (2001). "Découverte et signification d'une paragenèse à ilménite zincifère dans les métapélites des Jebilet centrales (Maroc)." Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science **333**(7): 381-388.

Fayer, M., Rockhold, M. and Campbell, M. (1992). "Hydrologic modeling of protective barriers: Comparison of field data and simulation results." Soil Science Society of America Journal **56**(3): 690-700.

Fayer, M. J. and Gee, G. W. (2006). "Multiple-year water balance of soil covers in a semiarid setting." Journal of environmental quality **35**(1): 366-377.

Fredlund, D., Xing, A. and Huang, S. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." Canadian Geotechnical Journal **31**(4): 533-546.

Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil mechanics for unsaturated soils". John Wiley & Sons.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012). "Unsaturated soil mechanics in engineering practice". John Wiley & Sons.

Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." Canadian geotechnical journal **31**(4): 521-532.

Gardiner, R. T., Dawson, D. B. and Gray, G. G. (1997). "Application of ARD abatement technology in reclamation of tailings ponds at Cominco Ltd., Sullivan Mine".

Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, British Columbia, Canada.

Gardner, W. (1958). "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table." Soil science **85**(4): 228-232.

Gee, G. W., Benson, C. H. and Albright, W. H. (2006). "Comment on Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA." Vadose Zone Journal **5**(2): 809-809.

Geo-Slope International (2007). SEEP/W User's Manual, Third Edition. Copyright 1991-2005. Geo- Slope Ltd. Calgary, Alberta, Canada.

Green, R. and Corey, J. (1971). "Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods." Soil science society of America journal **35**(1): 3-8.

Hakkou, R., Benzaazoua, M. and Bussière, B. (2008a). "Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 1- environmental characterization." Mine Water Environ. **27**: 145-159.

Hakkou, R., Benzaazoua, M. and Bussière, B. (2008b). "Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 2- mine waste geochemical behavior." Mine Water Environ. **27**: 160-170.

Hakkou, R., Benzaazoua, M. and Bussière, B. (2009). "Laboratory evaluation of the use of alkaline phosphate wastes for the control of acidic mine drainage." Mine Water and the Env. **28(3)**: 206-218.

Harnas, F., Rahardjo, H., Leong, E. and Wang, J. (2014). "Experimental study on dual capillary barrier using recycled asphalt pavement materials." Canadian Geotechnical Journal **51**(10): 1165-1177.

Hauser, V. L. (2008). "Evapotranspiration covers for landfills and waste sites". CRC Press.

Hernandez, M. A. (2007). "Une étude expérimentale des propriétés hydriques des roches stériles et autres matériaux à granulométrie étalée." Mémoire Maîtrise Génie Minéral, CGM, École Polytechnique de Montréal.

Hillel, D. (1980). Fundamentals of soil physics. Academic Press, NY: 413-413Inc.

Hopp, L., McDonnell, J. J. and Condon, P. (2011). "Lateral Subsurface Flow in a Soil Cover over Waste Rock in a Humid Temperate Environment." Vadose Zone Journal **10**(1): 332-332.

Huvelin, P. (1977). "Étude géologique et gitologique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental)". Service géologique du Maroc.

Jambor, J. L. (1994). "Mineral ogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products." Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste, Jambor J.L., Blowes, D. W. (eds.): Mineralogical Association of Canada **vol. Special**: 59-102.

Jansik, D. P., Wildenschild, D. and Rosenberg, N. D. (2011). "Flow Processes in the Dry Regime: The Effect on Capillary Barrier Performance." Vadose Zone Journal **10**(4): 1173-1173.

Junqueira, F. F., Wilson, W. G., Nichol, C. and Dunlap, S. (2006)." The influence of climate, vegetation, layer thickness, and material properties for performance of the cover systems at the golden Sunlight mine". Proceedings of the 7th Inter. Conf. on Acid Rock Drainage (ICARD).

Kämpf, M., Holfelder, T. and Montenegro, H. (2003). "Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers." Water Resources Research **39**(10): n/a-n/a.

Keller, J., Busker, L., Milczarek, M., Rice, R. and Williamson, M. (2011). "Monitoring of the geochemical evolution of waste rock facilities at Newmont's Phoenix Mine". VI Intern. Seminar on Mine Closure, Lake Louise, Canada.

Kelln, C., Barbour, S. L. and Qualizza, C. (2008). "Controls on the spatial distribution of soil moisture and solute transport in a sloping reclamation cover." Canadian Geotechnical Journal **45**(3): 351-366.

Khalil, A. (2014). "Élaboration d'un systeme géospatial d'aide à décision pour la gestion des enjeux environnementaux autour des sites miniers : cas de la mine abandonée de Kettara". Université Cadi AYYAD, Faculté des sciences et techniques, Marrakech, Maroc.

Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O. and Hakkou, R. (2013). "Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using

geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models." Journal of Geochemical Exploration **125**: 117-129.

khire, M. V. (1998). "Field Hydrology and water balance modeling of earthen final covers for waste containment-PhD thesis".University of Wisconsin-Madison,USA.

Khire, M. V., Benson, C. H. and Bosscher, P. J. (1999). "Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H." Geotech. and Geoenv. Eng. **125**(6): 518-527.

Khire, M. V., Benson, C. H. and Bosscher, P. J. (2000). "Capillary barriers: design variables and water balance." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **126**(8): 695-708.

Khire, M. V., Meerdink, J. S., Benson, C. H. and Bosscher, P. J. (1995). "Unsaturated hydraulic conductivity and water balance predictions for earthen landfill final covers." Proc., Soil Suction Applications in Geotechnical Engineering Practice, Geotechnical special publication W. K. Wray and S. L. Houston, eds., ASCE, New York **48**: 38–57.

Kleinmann, R. L. P., Crerar, D. A. and Pacellil, R. R. (1981). "Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation." Mining Engineering: 300-304.

Kunze, R., Uehara, G. and Graham, K. (1968). "Factors important in the calculation of hydraulic conductivity." Soil Science Society of America Journal **32**(6): 760-765.

Kwong, Y.-T. J. (1993). "Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective". MEND.

Lacroix Vachon, B., Abdolahzadeh, A. M. and 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." Canadian Geotechnical Journal **52**(999): 1-8.

Lapakko, K. A. (1994). "Evaluation of neutralization potential determinations for metal mine waste and a proposed alternative". Proceeding: of the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, April.

Larchevêque, M., Desrochers, A., Bussière, B. and D., C. (2015). "Planting trees in soils above non-acid generating wastes of a boreal gold mine." Ecoscience **21**: 3-4.

Lawrence, R. W. and Scheske, M. (1997). "A method to calculate the neutralization potential of mining wastes." Environ. Geol. (Berlin) **32**: 100-106.

Lghoul, M. (2014). "Projet de réhabilitation de la mine abandonnée de Kettara (région de Marrakech, Maroc): Apport de la géophysique, de l'hydrogéochimie et de la modélisation du transfert en DMA". Ph.D. Université Paris 6, France.

Lghoul, M., Maqsoud, A., Hakkou, R. and Kchikach, A. (2014). "Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco." Journal of Geochemical Exploration **144, Part C**: 456-467.

Li, J. H., Du, L., Chen, R. and Zhang, L. M. (2013). "Numerical investigation of the performance of covers with capillary barrier effects in South China." Computers and Geotechnics **48**: 304-315.

Li, J. H., Du, L., Chena, R. and Zhang, L. M. (2013). "Numerical investigation of the performance of covers with capillary barrier effects in South China." Computers and Geotechnics **48**: 304–315.

Liu, J., Chen, J. M. and Cihlar, J. (2003). "Mapping evapotranspiration based on remote sensing: An application to Canada's landmass." Water Resources Research **39**(7).

Liu, J., Chen, R. and Ng, C. W. W. (2015). "Discussion of "Physical and numerical study of lateral diversion by three-layer inclined capillary barrier covers under humid climatic conditions"." Can. Geotech. J. **52**: 530-531.

Mancarella, D., Doglioni, A. and Simeone, V. (2012). "On capillary barrier effects and debris slide triggering in unsaturated layered covers." Engineering Geology **147**: 14-27.

Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M., Chouteau, M. and Mbonimpa, M. (2011). "Field investigation of a suction break designed to control slope-induced desaturation in an oxygen barrier." Canadian Geotechnical Journal **48**(1): 53-71.

Maqsoud, A., Bussière, B., Aubertin, M. and Mbonimpa, M. (2012). "Predicting hysteresis of the water retention curve from basic properties of granular soils." Geotechnical and Geological Engineering **30**(5): 1147-1159.

Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Aubertin, M. and Wilson, W. G. (2007b). "Instrumentation and monitoring of covers used to control Acid Mine drainage." Proceeding of the Mining Industry Conference, CIM, Montréal CD-rom.

Maqsoud, A., Mbonimpa, M. and Bussière, B. (2015). "Rheology and Hydrogeological Behavior of Thickened Tailings Disposal Using Field Experimental Cell. – In: Agreeing on solutions for more sustainable mine water management." Proceedings of the 10th ICARD & IMWA Annual Conference Santiago, Chile (GECAMIN): 191.

Martin, V. (2003)." Étude des propriétés non saturées des stériles miniers." Masters' thesis in mineral engineering École Polytechnique de Montréal.

Martin, V., McMullen, J. and Aubertin, M. (2005). "Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur". Proceedings of the 2nd Intern. Sympo. on Mining and the Environment: 56-71.

Maurice, R. (2002). "Restauration du site minier Poirier (Joutel) - Expériences acquises et suivi des travaux. C.R." Symposium 2002 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, QC: 545-552.

Maurice, R. (2012). "Normétal mine tailings storage facility HDPE cover: Design considerations and performance monitoring." Proc. 9th International Conference on Acid Rock Drainage, Ottawa, ON.

Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis, R. P. and Bussière, B. (2002). "Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity." Geotechnical & Geological Engineering **20**(3): 235-259.

McCarthy, D. F. (2007). "Essentials of soil mechanics and foundations: basic geotechnics." 7th edit, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

MEND (2004b). "Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings". Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada Volume 5 – Case Studies. Report 2.21.4e.

MEND (2012). "Cold regions cover system design technical guidance document. Report 1.61.5c." Mine Environmental Neutral Drainage program, Natural Resources Canada.

Merkus, H. G. (2009). "Particle size measurements: fundamentals, practice, quality". Springer Science & Business Media.

Milczarek, M., Keller, J., Hawthorne, T., Rogers, S., Litle, R., Klempel, T., Rice, R. C., Grabau, M. and Buchanan, M. (2011a). "Characterization and selection of waste rock borrow material for use as rock armor to reduce tailing impoundment side-slope erosion."

Milczarek, M., Steward, M., Word, W., Buchanan, M. and Keller, J. (2011). "Rooting morphology and salinity/pH interactions in monolayer soil covers above copper tailings."

Milczarek, M., Yao, T.-m., Vinson, J., Word, J., Kiessling, S., Musser, B. and Mohr, R. (2003). "Performance of mono-layer evapotranspirative covers in response to high precipitation and extended drought periods in the southwestern United States". Sixth International Conference Acid Rock Drainage.

Milczarek, M. A., Buchanan, M., Keller, J., Yao, T. M., Word, W. and Steward, M. (2009). "Ten years of tailings reclamation experiments at the Morenci Mine". 8th International Conference on Acid Rock Drainage.

Milczarek, M. A., Keller, J., Yao, T. M., Prieto, E., Venegas, C., Ludwick, W., Orellana, R., Quevedo, F. and Zhan, G. (2015). "Efficacy of Cover Systems in High Elevation Andean Climates. – In: Agreeing on solutions for more sustainable mine water management " Proceedings of the 10th ICARD & IMWA Annual Conference Santiago, Chile (GECAMIN): 166.

Morel-Seytoux, H. (1994). "Steady-state effectiveness of a capillary barrier on a sloping interface". Proceedings of the14th Hydrology Days Conference, Fort Collins, Colorado, USA.

Morel-Seytoux, H. J. (1992a). "L'effet de barriere capillaire a l'interface de deux couches de sol aux propriétés fort contrastées." Hydrol. continent **7**: 117-128.

Morris, C. E. and Stormont, J. C. (1997). "Capillary barriers and subtitle D covers: estimating equivalency." Journal of Environmental Engineering **123**(1): 3-10.

Morris, C. E. and Stormont, J. C. (1999). "Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering **125**(12): 1057-1065.

Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." Water Resour. Res **12**(3): 513-522.

Mualem, Y. and Klute, A. (1986). "Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas." Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods: 799-823.

Musy, A. and Soutter, M. (1991)." Physique du sol". PPUR presses polytechniques.

Ng, C. W. W., Liu, J., Chen, R. and Coo, J. L. (2015). "Numerical parametric study of an alternative three-layer capillary barrier cover system." Environ Earth Sci.

Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A. and Reardon, E. J. (1989). "Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers." Canadian Geotechnical Journal **26**(1): 1-8.

Nicholson, R. V. and Scharer, J. M. (1994). "Laboratory studies of pyrrhotite oxidation kinetics". ACS Symposium Series, Washington, DC: American Chemical Society.

Nordstrom, D. K. and Alpers, C. N. (1999). "Geochemistry of acid mine waters." The environmental Geochemistry of mineral deposits Part A: Processes,Techniques, and Health Issues. G. S. Plumlee and M. J. Logsdon, Society of Economie Geologists **6**(A): 133-160.

Nordstrom, K. D. (2000). "Advances in the hydrogeochemistry and microbiology of acid mine waters." International Geology Review **42**(6): 499-515.

O'Kane, M. and Waters, P. (2003). "Dry Cover Trials at Mt Whaleback. A Summary of Overburden Storage Area Cover System Performance." 6th International Conference on Acid Rock Drainage(July): 147-153.

O'Kane, M., Porterfield, D., Weir, A. and Watkins, L. (2000). "Cover system performance in a semi-arid climate on horizontal and slope waste rock surfaces". International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Denver, Colorado.

Ouakibi, O., Loqman, S., Hakkou, R. and Benzaazoua, M. (2013). "The potential use of phosphatic limestone wastes in the passive treatment of AMD : a laboratory study." Mine Water Environ **013**: 0226-0228.

Ouangrawa, M. (2007). "Étude expérimentale et analyse numérique des facteurs qui influencent le comportement hydro-géochimique de résidus miniers sulfureux partiellement saturés". ProQuest.

Ouangrawa, M., Aubertin, M., Molson, J., Zagury, G. and Bussiere, B. (2005). "An evaluation of the elevated water table concept using laboratory columns with sulphidic tailings [CD-ROM]". Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical Conference and the 6th Joint International Association of Hydrogeologists–Canadian National Chapter and Canadian Geotechnical Society Conference, Saskatoon, Sask.

Ouangrawa, M., Molson, J., Aubertin, M., Zagury, G. and Bussière, B. (2006). "The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study". 7th International Conference on Acid Rock Drainage.(St. Louis, Missouri).

Paktunc, A. (1999). "Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage." Environmental Geology **39**(2): 103-112.

Parent, S.-É. and Cabral, A. (2006). "Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect." Geotechnical and Geological Engineering **24**(3): 689-710.

Pease, R. E. and Stormont, J. C. (1996). "Increasing the diversion length of capillary barriers. In: Joint Conference on the Environment". Albuquerque, New Mexico.

Peregoedova, A. (2012)." Étude expérimentale des propriétés hydrogéologiques des roches stériles à une échelle intermédiaire de laboratoire". École Polytechnique de Montréal.

Perkins, E., Nesbitt, H., Gunter, W., St-Arnaud, L. and Mycroft, J. (1995). "Critical review of geochemical processes and geochemical models adaptable for prediction of acidic drainage from waste rock". Energy, Mines and Resources Canada, Canada Centre for Mineral and Energy Technology.

Philip, J. (1969). "Theory of infiltration. Adv Hydrosci " **5**: 215–296.

Plante, B. (2010). Évaluation de des principaux facteurs d'influence sur la prédiction du drainage neutre contaminé Rouyn-Noranda, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (UQAT). *Ph*.D : 238.

Qian, T., Huo, L. and Zhao, D. (2010). "Laboratory investigation into factors affecting performance of capillary barrier system in unsaturated soil." Water, Air, and Soil Pollution **206**(1-4): 295-306.

Rahardjo, H., Santoso, V., Leong, E. C., Ng, Y. S. and Hua, C. J. (2012). "Performance of an Instrumented Slope Covered by a Capillary Barrier System." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **138**(4): 481-490.

Rahardjo, H., Santoso, V. A., Leong, E. C., ASCE, M., Ng, Y. S. and Hua, C. J. (2012). "Performance of an Instrumented Slope Covered by a Capillary Barrier System." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **138**(4).

Richards, L. A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums." Journal of Applied Physics **1**(5): 318-333.

Rijtema, P. E. (1965). "An analysis of actual evapotranspiration". Center for Agricultural Publications and Documentation.

Ripley, E. A., Redman, R. and Crowder, A. A. (1996). "Environmental Effects of Mining." St. Lucie Press.

Rock, S., Myers, B. and Fiedler, L. (2012). "Evapotranspiration (ET) Covers." International Journal of Phytoremediation **14**: 1-25.

Rohde, T. (2009). "Instrumentation and Monitoring of a Large-scale, Potentially Contaminating Trial Waste Rock Dump."

Rohde, T. K. and Williams, D. J. (2009). "Early Hydrological Monitoring of Cadia's Instrumented Trial Waste Rock Dump." 8th International Conference on Acid Rock Drainage: 1-12.

Ross, B. (1990). "The Diversion Capacity of Capillary Barriers." Water Resources Research **26**: 2625-2629.

Rykaart, M. and Hockley, D. (2009). "Mine waste covers in cold regions." Mine Environment Neutral Drainage Program. SRK Consulting Ltd. Project(1CM019): 002.

Scanlon, B. R., Darling, B. K. and Mullican, W. F. (2001). "Evaluation of groundwater recharge in basins in Trans-Pecos Texas." Aquifers of West Texas. Texas Water Development Board, Austin, Texas, Report **356**: 26-40.

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Dwyer, K. E. and Dwyer, S. F. (2006). "Response to "Comments on 'Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA"." Vadose Zone Journal **5**(2): 813-813.

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Keese, K. E. and Dwyer, S. F. (2005). "Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA." Vadose Zone Journal **4**(1): 55-71.

Shock, C. C., Barnum, J. M. and Seddigh, M. (1998). "Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management". Proc. Int. Irrig. Show, San Diego California USA.

Shock, C. C., Flock, R., Feibert, E., Shock, C. A., Pereira, A. and Jensen, L. (2005)." Irrigation monitoring using soil water tension". Corvallis, Or.: Extension Service, Oregon State University.

Singer, P. C. and Stumm, W. (1970). "Acidic mine drainage: the rate-determining step." Science **167**: 1121-1123.

Singh, D. N. and Kuriyan, S. J. (2003). "Estimation of unsaturated hydraulic conductivity using soil suction measurements obtained by an insertion tensiometer." Canadian Geotechnical Journal **40** 476 – 483.

Skousen, J., Renton, J., Brown, H., Evans, P., Leavitt, B., Brady, K., Cohen, L. and Ziemkiewicz, P. (1997). "Neutralization potential of overburden samples containing siderite." Journal of Environmental Quality **26**(3): 673-681.

Smesrud, J. K., Benson, C. H., Albright, W. H., Richards, J. H., Wright, S., Israel, T. and Goodrich, K. (2012). "Using pilot test data to refine an alternative cover design in Northern California." International journal of phytoremediation **14**(sup1): 76-93.

Song, Q. and Yanful, E. K. (2011). "Oxygen influx and geochemistry of percolate water from reactive mine waste rock underlying a sloping channelled soil cover." Applied Geochemistry **26**(5): 655-665.

St-Amant, F. (2014). "La décroissance: une théorie à contre-courant." Thèse de doctorat.

Stannard, D. I. (1990). "Tensiometers-theory, construction, and use." Groundwater and Vadose Zone Monitoring, ASTM STP **1053**: 34-51.

Stark, T. D., Newman, E. J. and Aust, R. L. (2008). "Back-analysis of a PVC geomembrane-lined pond failure." Geosynthetics International **15**(4): 258-268.

Steenhuis, T. S., Parlange, J. Y. and Kung, K. J. S. (1991). "Comment on the diversion capacity of capillary barriers by B Ross." Water Resources Research **27**: 2155-2156.

Stormont, J. (1996). "The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope." Geotechnical & Geological Engineering **14**(4): 243-267.

Stormont, J. C. (1995). "The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance." Water Resources Research **31**(3): 783-785.

Stormont, J. C. and Morris, C. E. (2000). "Characterization of unsaturated nonwoven geotextiles." Geotechnical Special Publication: 153-164.

Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E.-c. and Fredlund, D. G. (2004). "Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier." **830**(2000): 814-830.

Tarantino, A., Ridley, A. M. and Toll, D. G. (2009). "Field measurement of suction, water content, and water permeability". Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils, Springer**:** 139-170.

Vachon, L. B., Abdolahzadeh, A. M. and 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." Canadian Geotechnical Journal **52**(999): 1-8.

Van Genuchten, M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil science society of America journal **44**(5): 892-898.

Waugh, J. W. (2004). "Designing Sustainable Covers for Uranium Mill Tailings". Proceedings High Altitude Revegetation Workshop No. 16 March 2004 Edited by, Citeseer.

Waugh, W. J. (2004). "Design, performance, and sustainability of engineered covers for uranium mill tailings." Proceedings of Long-term Performance Monitoring of Metals and

Radionuclides in the Subsurface: Strategies, Tools, and Case Studies. US Environmental Protection Agency, US Department of Energy, US Geological Survey, Nuclear Regulatory Commission.

Waugh, W. J., Kastens, M. K., Sheader, L. R. L., Benson, C. H., Albright, W. H. and Mushovic, P. S. (2008). "Monitoring the performance of an alternative landfill cover at the Monticello, Utah, uranium mill tailings disposal site". Waste Management 2008 Conference, Phoenix.

Wels, C., Fortin, S. and Loudon, S. (2002). "Assessment of Store-and-Release Cover for Questa Tailings Facility, New Mexico". Proceedings of Tailings and Mine Waste.

Wels, C., O'Kane, M. and Fortin, S. (2001). "Assessment of water storage cover for Questa tailings facility, New Mexico". In proceedings of the 9th Annual Conf. of the Am. Soc. for Surface Mining Reclamation. Albuquerque, NM.

Williams, D. J., Stolberg, D. J. and Currey, N. A. (2006). "Long-term monitoring of Kidston's "Store/Release" cover system over potentially acid forming waste rock piles." Proc, 7th ICARD, St Louis, MO, USA: 26-30.

Wilson, G. W. (2003). "The design and performance of mine-waste cover systems." Environmental aspects of mine wastes: 377-384.

Wilson, G. W., Fredlund, D. G. and Barbour, S. L. (1997). "The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces." (1990).

Winkler, W. (1999). "Thickness of monolithic covers in arid and semi-arid climates". University of Wisconsin-Madison.

Woyshner, M. R., St-Arnault, C. and St-Arnaud, L. (1997). "Five years after covering tailings and waster rock with a composite soil cover: a case review and water quality predictions at the Millenbach site near Rouyn-Noranda, Qc." Proceedings of the 4th Inter. Conf. on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver **4**: 1673-1690.

Yanful, E. K. and Aubé, B. (1993). "Modelling moisture-retaining soil covers." Proceedings of the Joint Canadian Society of Civil Engineers - American Society of Civil Engineers National Conference on Environmental Engineering: 273-280.

Yanful, E. K., Riley, M. D., Woyshner, M. R. and Duncan, J. (1993). "Construction and monitoring of a composite soil cover on an experimental waste-rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada." Canadian Geotechnical Journal **30**(4): 588-599.

Zhan, G., Aubertin, M., Mayer, A., Burke, K. and McMullen, J. (2001). "Capillary cover design for leach pad closure." SME Annual Mtg, Denver: 1-9.

Zhan, G., Keller, J., Milczarek, M. and Giraudo, J. (2014). "11 Years of Evapotranspiration Cover Performance at the AA Leach Pad at Barrick Goldstrike Mines." Mine Water and the Environment **33**(3): 195-205.

Zhan, G., Mayer, A. B., McMullen, J. and Aubertin, M. (2001). "slope effect study on the capillary design cover for spent leach pad." Proceedings of Tailings and Mine Waste '01, Fort Collins, Colorado, USA: 179-187.

Zhan, G., Milczarek, M., Keller, J. and Giraudo, J. (2013). "The AA leach pad cover design–a successful reclamation project at a Nevada gold mine." mwen.info: 237-242.

Zhan, G., Schafer, W., Milczarek, M., Myers, K., Giraudo, J. and Espell, R. (2006). The evolution of evapotranspiration cover system at Barrick Goldstrike Mines. Proceedings of the 7th international conference on acid rock drainage, ICARD.

Zornberg, J. G., LaFountain, L. and Caldwell, J. A. (2003). "Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering **129**(5): 427-438.

Zornberg, J. G. and McCartney, J. S. (2006). "Evapotranspirative cover systems for waste containment." J. Delleur. CRC Press, Boca Raton, Fla **2**: 34-31.

ANNEXE A – CONCEPTION D'UNE CELLULE EXPÉRIMENTALE INCLINÉE STOCKAGE-RELARGAGE DE TERRAIN SUR LE SITE MINIER ABANDONNÉ DE KETTARA-MAROC

Cette annexe décrit la procédure de construction de la cellule expérimentale inclinée sur le site minier générateur du DMA ainsi que les simulations des évènements de mouillage. La proposition de travail est présentée comme suit : une représentation schématique descriptive introduit le système expérimental incliné et son emplacement. Ensuite, les volumes des matériaux nécessaires pour la conception de la parcelle expérimentale et le nivellement de la pente sont estimés; les questions en relation avec l'approvisionnement, le transport et la préparation des matériaux sont également abordées au sein de cette partie. Les deux dernières sections de ce cahier des charges présentent la méthodologie ainsi que la logistique utilisée en lien avec la simulation du premier et deuxième événement de mouillage et dressent un estimé des dépenses.

- ✓ **Optique du cahier des charges**

La présente étude établit des propositions préliminaires concrètes en vue de la conception d'une parcelle expérimentale de terrain. L'objectif général de cette parcelle consiste à simuler les conditions d'un parc à rejets de concentrateur recouvert par un système SR incliné.

- ✓ **Zone d'étude**

Le premier travail vise à déterminer une zone d'étude expérimentale facile d'accès et à l'écart de la population pour des questions de sécurité (ex. actes de vandalisme ou vols d'instrumentation). Elle devra impérativement se situer sur une digue d'environ 10 m de hauteur et de préférence à proximité d'un point d'eau (pour les simulations d'événements de précipitations importants). De plus, une zone de stockage et/ou préparation des matériaux devra être définie au préalable. On présente à la figure 3 la zone suggérée qui répond aux exigences mentionnées ci-haut.

✓ **Proposition d'une zone de travail**

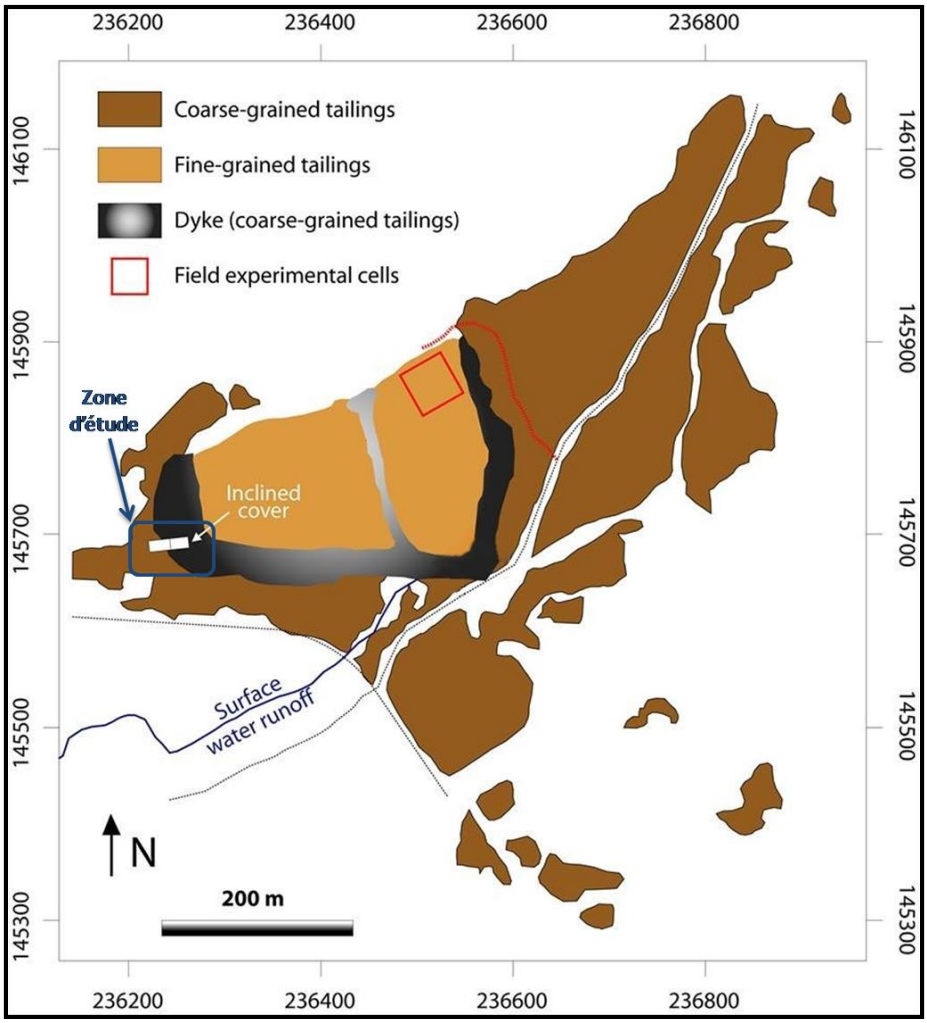


Figure A.1 : Zone d'étude expérimentale avec une largeur de 10m et une hauteur de 11m (Bossé et al. 2014).

✓ **Autorisations et permis (municipalité de Kettara)**

Les autorisations nécessaires, concernant la délimitation de la zone d'étude ainsi que la conception de la cellule expérimentale pour une durée de 2 à 3 ans, devront être obtenues dès que possible. Cela implique également les autorisations de circulation des engins pour le transport et le terrassement de plusieurs tonnes de matériaux.

Matériel nécessaire : cannettes de peinture, marqueur, piquets en bois, décamètre, niveau, tuyaux, cordelettes, etc.

✓ **Configuration du système incliné**

Comme mentionné auparavant, l'objectif de ce travail concerne la mise en place d'un système incliné (Fig. 4) sur le site de Kettara. La conception de la parcelle expérimentale serait constituée de 80 cm de rejets calcaires phosphatés (granulométrie initiale), directement au-dessus des rejets grossiers de Kettara constituant la digue. Cette épaisseur est sélectionnée en fonction des résultats obtenus dans les cellules expérimentales construite sur la portion plane du site (voir Bossé, 2013).

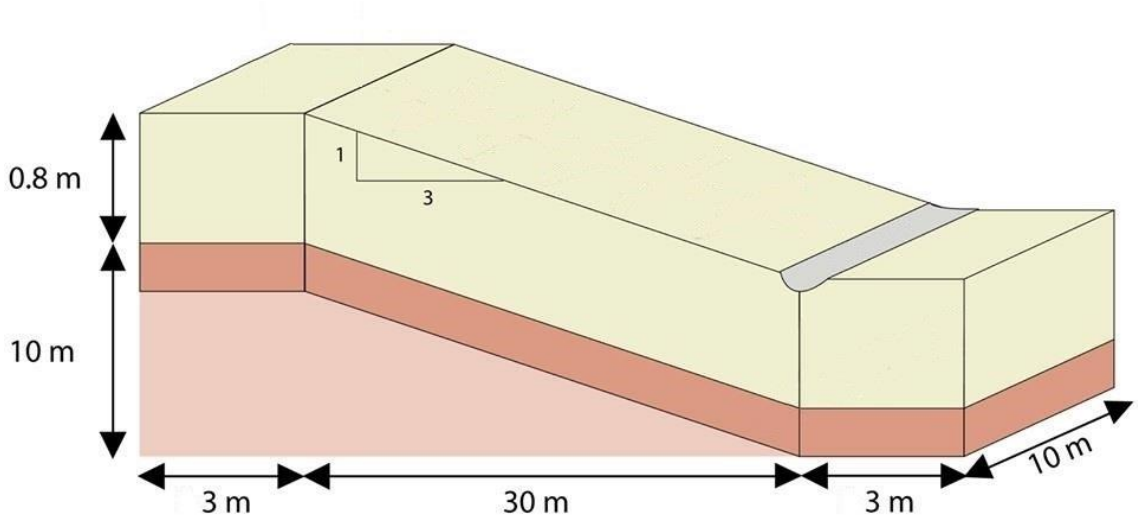


Figure A.2 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale

Cette parcelle expérimentale comprendrait plusieurs stations de mesure, placées au milieu de la SDR. Chaque station contiendrait les instruments suivants :

- ✓ Des sondes de teneur en eau volumique;
- ✓ Des senseurs à succion matricielle de type « granular matrix »;
- ✓ Des senseurs à succion matricielle de type tensiomètres Jetfill;
- ✓ Des lysimètres.

La figure ci-dessous représente un exemple de l'installation des stations de mesure et de l'instrumentation sur un système incliné.

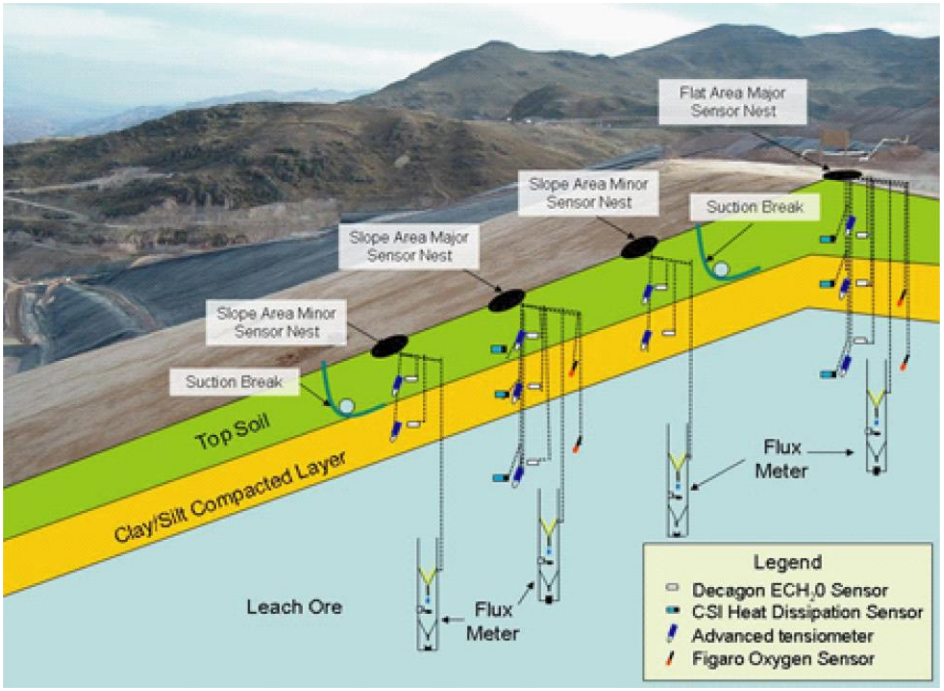


Figure A.3 : Exemple d'installation du matériel de mesure dans un système incliné (Zhan et al.2007)

✓ **Design du système incliné et emplacement de l'instrumentation**

Dans les conditions idéales, la cellule comprendrait 7 stations de mesure : **plan A**(Fig. 6).

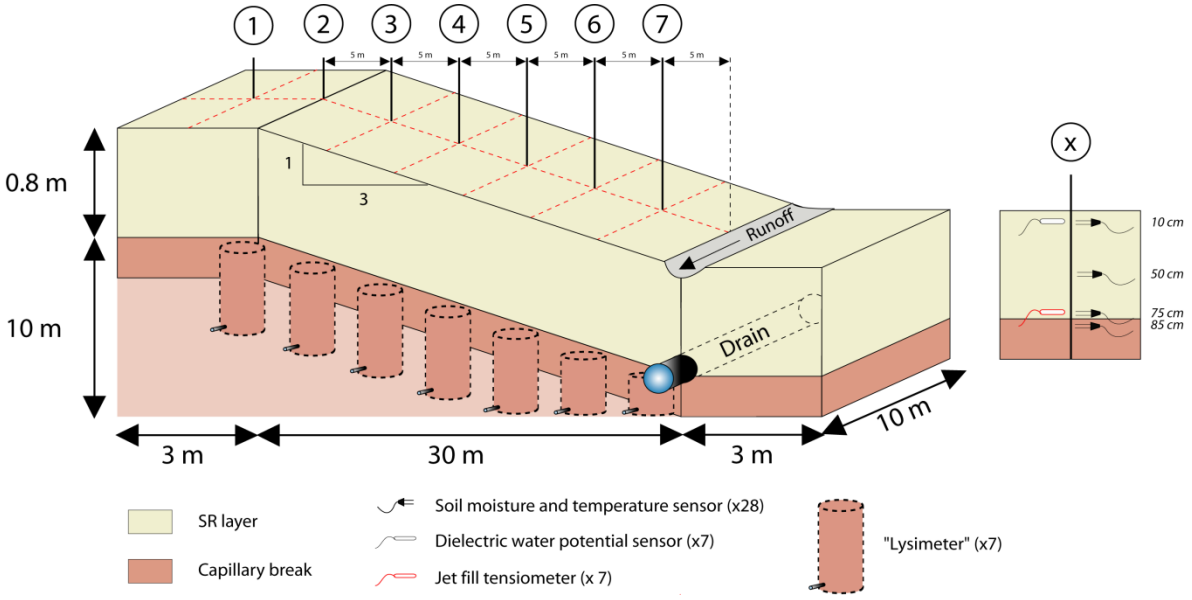


Figure A.4 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale inclinée avec 7 stations de mesures

Dans les conditions où le financement ne serait pas suffisant pour payer tous les équipements de la figure 6, on propose une cellule comptant 4 stations de mesure : **plan B** (Fig. 7).

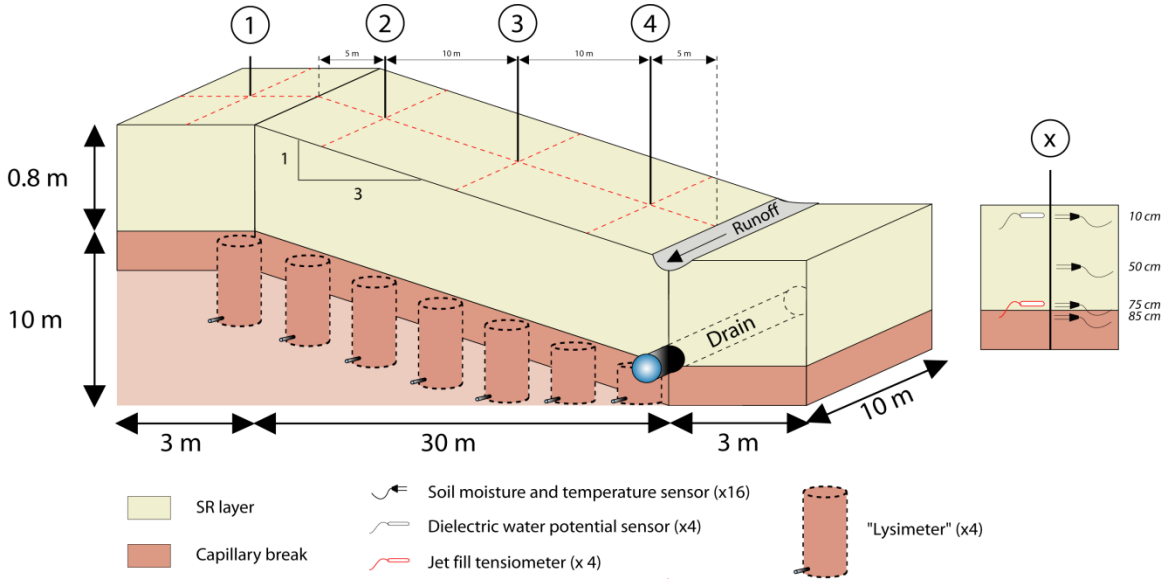


Figure A.5 : Représentation schématique 3D d'une cellule expérimentale inclinée avec 4 stations de mesure

- Les emplacements dans le recouvrement des instruments de mesure seraient identiques dans les deux cas (A et B);
- Les sondes EC5 seraient placées à 10cm, 50cm, 75 cm et 85cm à partir de la surface du recouvrement;
- Les capteurs Decagon (MPS-2) seraient installés à 10cm de la surface;
- Les tensiomètres (Jet Fill) seraient placés à l'interface des deux matériaux;
- Les lysimètres seraient disposés au préalable dans l'axe central de la cellule et reliés avec un tuyau pour collecter l'eau.

Matériaux (volume, transport, préparation)

✓ **Matériel nécessaire pour le nivellement de la pente**

Avant la mise en place du système incliné, il faudra adoucir la pente d'environ 37-45° à 14° à partir des rejets grossiers de Kettara (ou encore des rejets calcaires phosphatés) situés à proximité (Fig. 8).

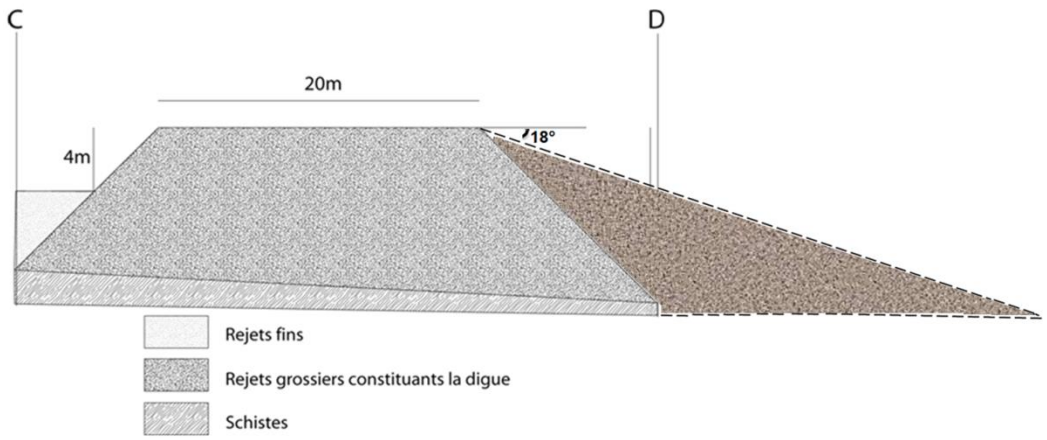


Figure A.6 : Aplanissement de la pente de 45° à 14°.

Le volume nécessaire pour aplanir la pente est de :<u>1259 m^3</u>

Le déplacement d'un tel volume implique un équipement approprié.

✓ **Matériel nécessaire pour le système incliné**

Deux matériaux sont nécessaires pour la conception du recouvrement SR incliné en climat aride : les rejets calcaires phosphatés (OCP groupe) situés à une trentaine de kilomètres au nord de Kettara (Fig. 1), et les rejets grossiers présents sur le site minier abandonné de Kettara.

- Calcul des volumes des matériaux avec un facteur de sécurité de 2 (30% de perte lors de la préparation, enlèvement des gros blocs de rejets de calcaire phosphatés...)

❖ **Les rejets calcaires phosphatés :**

Tableau A.1 : Calcul du volume des rejets calcaires phosphatés

	Cellule
hrejets calcaires phosphatés (m)	0,8
N	0,43
Dr	2,85
Vt rejets Calcaires phosphatés (m3)	304
Mrejets rejets calcaires phosphatés(t)	866,4
Mrejets rejets calcaires phosphatés(t)	494
Mrejets avec F_S	**988 (t)**

La préparation des rejets calcaires phosphatés et leur transport est fonction des possibilités offertes par le groupe OCP. Environ 990 tonnes de rejets calcaires phosphatés à granulométrie naturelle (scheidage des gros blocs avant et après chargements) sont nécessaires pour la conception de la cellule expérimentale.

Dans le cas échéant, il faudrait également envisager la location d'un équipement approprié, pour l’acheminement des matériaux jusqu’au site expérimental.

Logistique et méthodologie

Nous proposons l'utilisation d'une pelle excavatrice à chenille et un petit compacteur de sol devront être présents sur la zone d'étude sélectionnée pour procéder à la conception de l'ouvrage. De façon explicite, la procédure envisagée consisterait à superposer au cours du temps une succession de couches de matériaux compactés (à une teneur en eau naturelle) de quelques décimètres d'épaisseur. Plus précisément, chaque couche décimètrique serait réalisée de la façon suivante : dans un premier temps, la pelle excavatrice alignerait des petits tas de matériaux sur une surface de 300 m^2, suivi d'un travail manuel, constitué d'une ou de deux personnes permettant d'égaliser et d'homogénéiser les matériaux avant compaction et installation des instruments. La main-d'œuvre requise pourrait être constituée : d'une personne pour la pelle excavatrice, une personne pour le compacteur, et un aide de camp. Pour faire le suivi, un contrôle qualité des propriétés suivantes : la granulométrie, la teneur en eau et la densité sèche principalement, serait nécessaire. Le contrôle qualité devrait être réalisé pour différentes hauteurs du recouvrement : 10, 25, 30, 40 cm, afin de vérifier que la porosité est autour de 0,43 pour les rejets calcaires phosphatés.

Matériel et engins de terrassement nécessaires : pelle excavatrice à chenilles, petit compacteur de sol ou rouleau compresseur, pelles, râteaux, brouette, gants, seaux, *etc.*

- **Matériel de mesure et lysimètres**

✓ **Matériel de mesure**

Le matériel de mesure est constitué de sondes de teneur en eau volumique, de capteurs de succion matricielle, de tensiomètre Jet fillet et de data loggers (avec piles) (Annexe 1).

L'instrumentation pourrait varier selon le budget :

Tableau A.2 : Instrumentation selon le plan A et B

Plan A	**Plan B**
• Des sondes (EC5) (x 28) • Des sondes MPS-2 (x**7**) • Tensiomètre Jet fill (x7) • Data logger (Em50) (x**7**) • Lysimètres à (x7)	• Des sondes (EC5) (x 12) • Des sondes MPS-2 (x4) • Tensiomètre Jet fill (x4) • Data logger (Em50) (x4) • Lysimètres (x7)

✓ **Lysimétres**

Une méthode pour faire le suivi de la performance du système de couverture est l'utilisation de lysimètres. À partir de travaux récents (e.g. Bews et al. 1997, 1999, Milczarek et al. 2003 et Zornberg et MaCartney 2007) et dans le but de déterminer la percolation profonde ainsi que l'emplacement de la DDL, l'installation de lysimètres est recommandée. Ces derniers seraient intégrés dans les matériaux grossiers (rejets de Kettara), en dessous de chaque station de mesure (Plan A – Figs. 6 et 7); ils devraient être mis en place au cours de la conception de la cellule. Chaque lysimètre serait alors relié à un tuyau (fig. 9); la méthode de mise en place des lysimètres sera précisée par la suite.

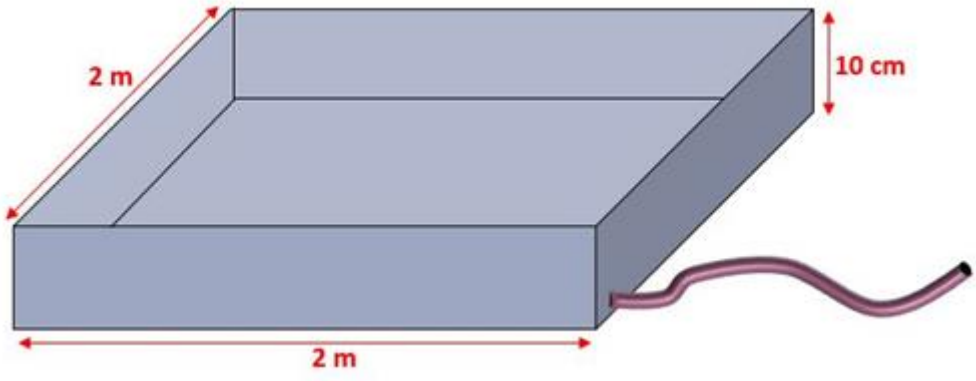


Figure A.7 : Schéma d'un lysimètre

✓ **Drain**

Deux drains doivent être installés au bas de la pente pour pouvoir collecter l'eau, le premier dans le matériau fin (pour collecter l'eau du ruissellement) et le deuxième dans le matériau grossier (pour collecter l'eau de percolation latérale à la base de la pente).

Le drain pourrait être constitué d'un tube en PVC, un tuyau en plastique avec un géosynthétique

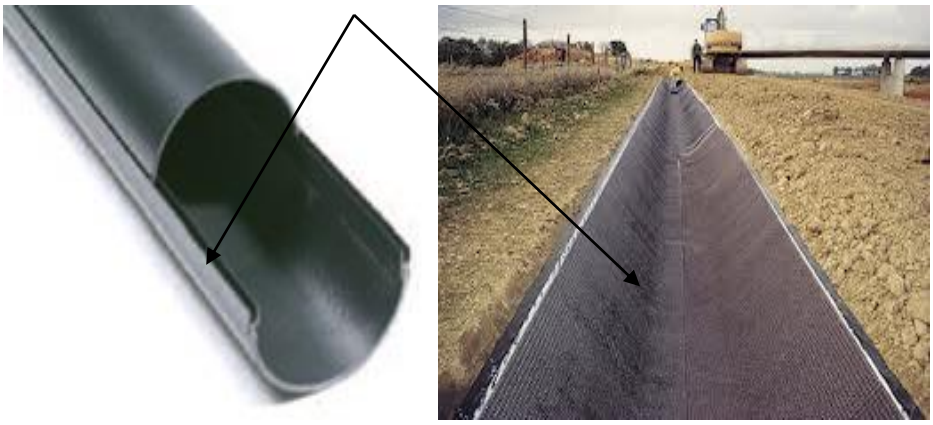


Figure A.8 : Exemples de drain

✓ **Simulation d'événements extrêmes**

La simulation d'événements extrêmes doit être envisagée après la construction de la cellule expérimentale. Un premier choix pour la hauteur des précipitations simulées pourra se faire selon (Bossé et al. 2013).

Logistique et méthodologie

Figure A.9` : Exemple d'un système d'irrigation (Zhan et al., 2001)

Une première proposition de travail concernant la simulation d'événements de mouillage pour un système incliné, nécessite un système d'irrigation le long de la pente, et ce, tel que mentionné dans les travaux de Zhan et al. (2001) (Fig. 9). Le système d'irrigation devra être relié et alimenté par un réservoir d'eau (citerne de l'ordre de 1-5 m^3). Il serait préférable d'avoir une installation mobile de base avec un écoulement par gravité (Fig. 10).

Un approvisionnement efficace en eau devrait permettre le bon déroulement de ces essais. L'eau serait transportée au réservoir qui alimenterait quotidiennement le système.

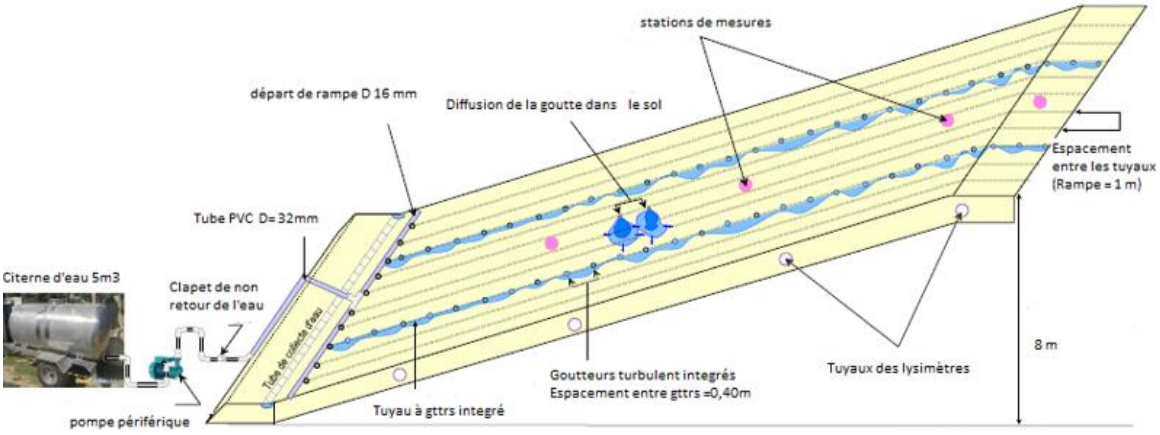


Figure A.10 : Simulation d'événements extrêmes pour le système incliné

✓ **Bilan économique**

Matériel de mesure :

Tableau A.3 : Bilan économique : Plan A :

	nombre	prix unitaire	prix tot
Tensiométre Jet Fill	7	178	1246
EC-5 sondes	28	111	3108
Sonde MPS-2	7	175	1225
Dattaloger EM50	7	456	3192
		Prix total	**8 771,00 $**

Avec des lysimétres (x7)

Tableau A.4 : Bilan économique : Plan B

	nombre	prix unitaire	prix tot
Tensiométre Jet Fill	4	178	712
EC-5 sondes	16	143	2288
Sonde MPS-2	4	207	828
Dattaloger EM50	4	447	1788
		Prix total	**5 616,00 $**

Avec des lysimétres (x5)

Système d'irrigation

Une première estimation des coûts de l'installation du système d'irrigation est d'environ **400 $ (Sahraoui S.R.L).**

- ✓ **Les phases de la construction et simulation du premier évènement de mouillage (100 mm) :**

La construction de la cellule inclinée se déroule en 4 phases :

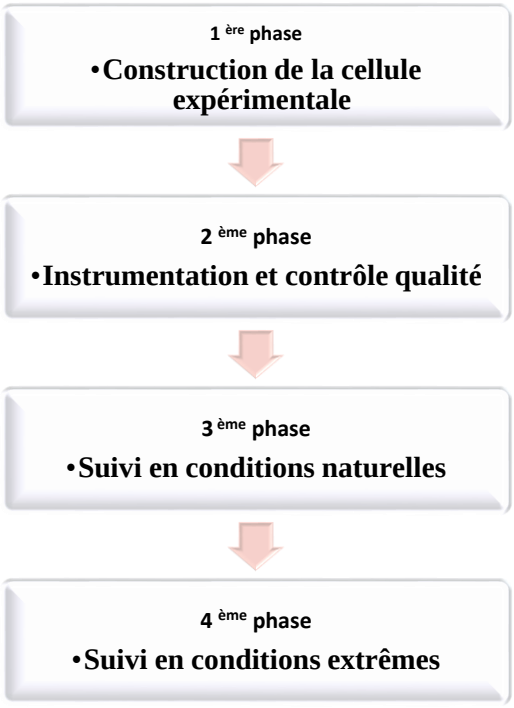


Figure A.11 : Schéma des phases de construction du projet

❖ **1ère phase : Construction**

Cette étape vise à mettre en place la cellule expérimentale :

- Reconnaissance et validation de la zone d'étude (Kettara);
- Délimiter la zone d'étude;
- Ramener les rejets calcaires phosphatés de l'OCP;
- Avoir 30 cm de matériel grossier pour la couche de 30 cm (bris capillaire);
- Procéder à l'achat du matériel (lysimètres, système d'irrigation, drains, piquets en bois,...).
- Location d'une pelle excavatrice et d'un compacteur avec une main-d'œuvre qualifiée.

❖ **2ème phase : Instrumentation**

Une fois le système mis en place avec les lysimètres (lysimètres reliés avec des tuyaux et des bacs de récupération), il faut :

- Procéder à la calibration des sondes de teneur en eau;

- Mettre en place des sondes de succion et des tensiomètres;
- S'assurer du fonctionnement de la station météorologique;
- Acheter le matériel adéquat pour la simulation des conditions extrêmes.

❖ **3ème et 4ème phase : Suivi**

Le suivi s'effectuera en deux étapes : en conditions naturelles puis en conditions extrêmes.

En conditions naturelles

Une fois construit, le système va être soumis aux conditions naturelles et des mesures seront prises. Un pas de temps de 6h va être programmé pour les sondes durant les premières semaines.

En conditions extrêmes

Les événements extrêmes sont généralement basés sur des périodes de retour avec une faible probabilité d'occurrence (par exemple, Zhan et al., 2001, Bossé, 2013). Un premier choix pour la hauteur des précipitations simulées sera de 100 mm/24 h.

6. Essai de contrôle/qualité :

Pour faire le suivi, un contrôle qualité des propriétés suivantes sera nécessaire :

- ✓ La granulométrie;
- ✓ La teneur en eau;
- ✓ La densité relative;
- ✓ La porosité/indice de vides;
- ✓ L'auto-compaction.

Le contrôle qualité devra être réalisé pour différentes hauteurs du recouvrement : 10, 40, 75, 85 cm (surtout à côté des équipements).

La cellule sera mise en place en quatre couches et la fréquence des essais de contrôle qualité sera déterminée par la suite.

4. Simulation du deuxième évènement de mouillage (155 mm)

Le travail va être effectué en trois phases :

❖ **1ère phase :** Essai de contrôle/qualité :

Pour faire le suivi, un contrôle qualité des propriétés suivantes sera nécessaire :

- ✓ Faire des tranchées pour mesurer la teneur en eau (évaluation de la teneur en eau massique aux les profondeurs 10,50, 75, 85cm pour la station 2 et 4;
- ✓ Mesure de la teneur en eau dans les 10 premiers centimètres pour les quatre stations;
- ✓ La porosité/indice de vides.

❖ **2ème phase : installation du système d'irrigation et instrumentation**

Vérifier que tout le matériel fonctionne bien ;

Mettre en place le système d'irrigation :

- ✓ S'assurer du bon fonctionnement des tuyaux ainsi que l'égalité du débit sur tout le recouvrement;
- ✓ Calcul du débit : ruissellement et de percolation;

Il est important que les onze citernes nécessaires pour simuler 155mm/48h soient mises en place en continu. Une alternative serait de construire un petit bassin ou utiliser une piscine remplie d'eau pour fournir le débit nécessaire (voir l'annexe 1 pour plus de détails) analyser la qualité d'eau qui passerait à travers le recouvrement (pH, Eh,…) pour démontrer que si le système ne fonctionne pas il y aura une génération du drainage minier acide.

❖ **3èmephase : suivi**

Le suivi s'effectuera en deux étapes : 1) en conditions extrêmes (durant l'irrigation) et ensuite 2) en conditions naturelles afin d'évaluer le comportement du recouvrement durant les jours qui suivront l'évènement.

En conditions extrêmes :

Les événements extrêmes sont généralement basés sur des périodes de retour avec une faible probabilité d'occurrence (voir, Zhan et al. 2001, Bossé, 2013). Le choix pour la hauteur des précipitations simulées sera de 155mm/48h pour pouvoir récolter l'eau dans les lysimètres.

En conditions naturelles :

Le système va être soumis aux conditions naturelles et des mesures seront prises.

Le pas de temps programmé pour les sondes EC5 et MPS-2 est de :

- ✓ 2 min durant l'évènement de mouillage;
- ✓ 12 h durant les semaines qui suivront l'évènement.

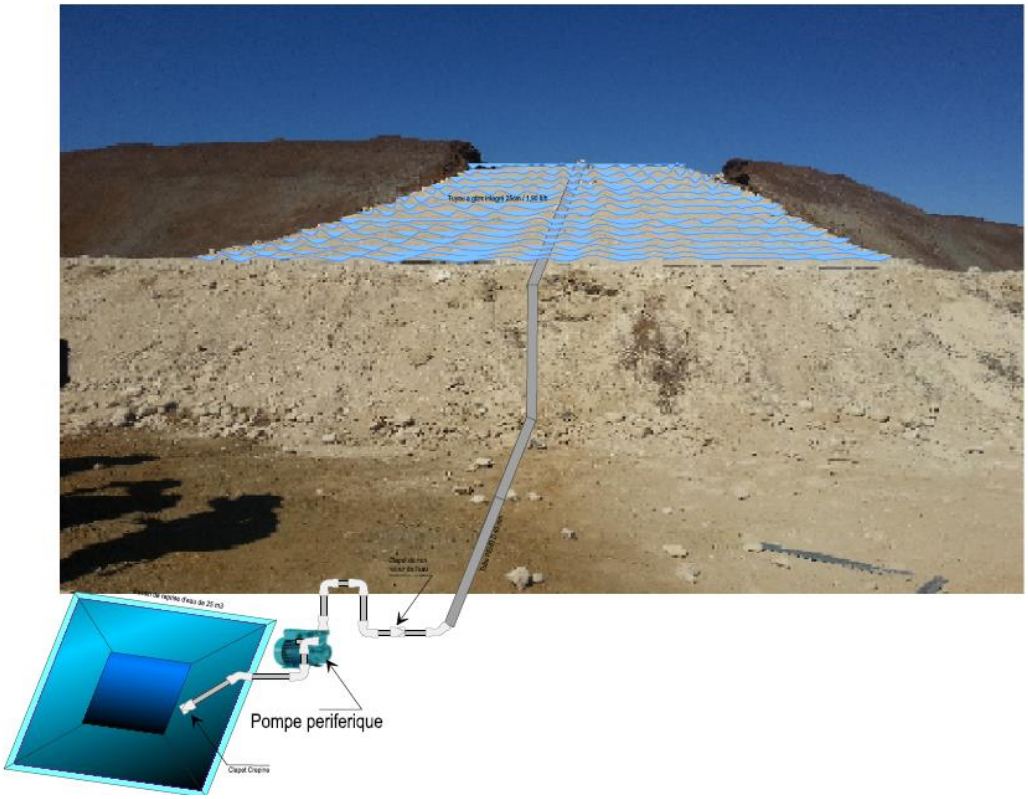


Figure A.12 : Schéma de la cellule inclinée avec système d'irrigation

Figure A.13 : Matériel de mesures

Em50:http://www.decagon.com/products/data-loggers-and-collectors-2/continuous-data loggers/em50-digital-analog-data-logger/

MPS-2 :http://www.decagon.com/products/sensors/water-potential-sensors/mps-2-dielectric-water-potential/

EC-5 : http://www.decagon.com/products/sensors/soil-moisture-sensors/ec-5-soil-moisture-small-area-of-influence/

ANNEXE B – REJETS DE LA MINE KETTARA

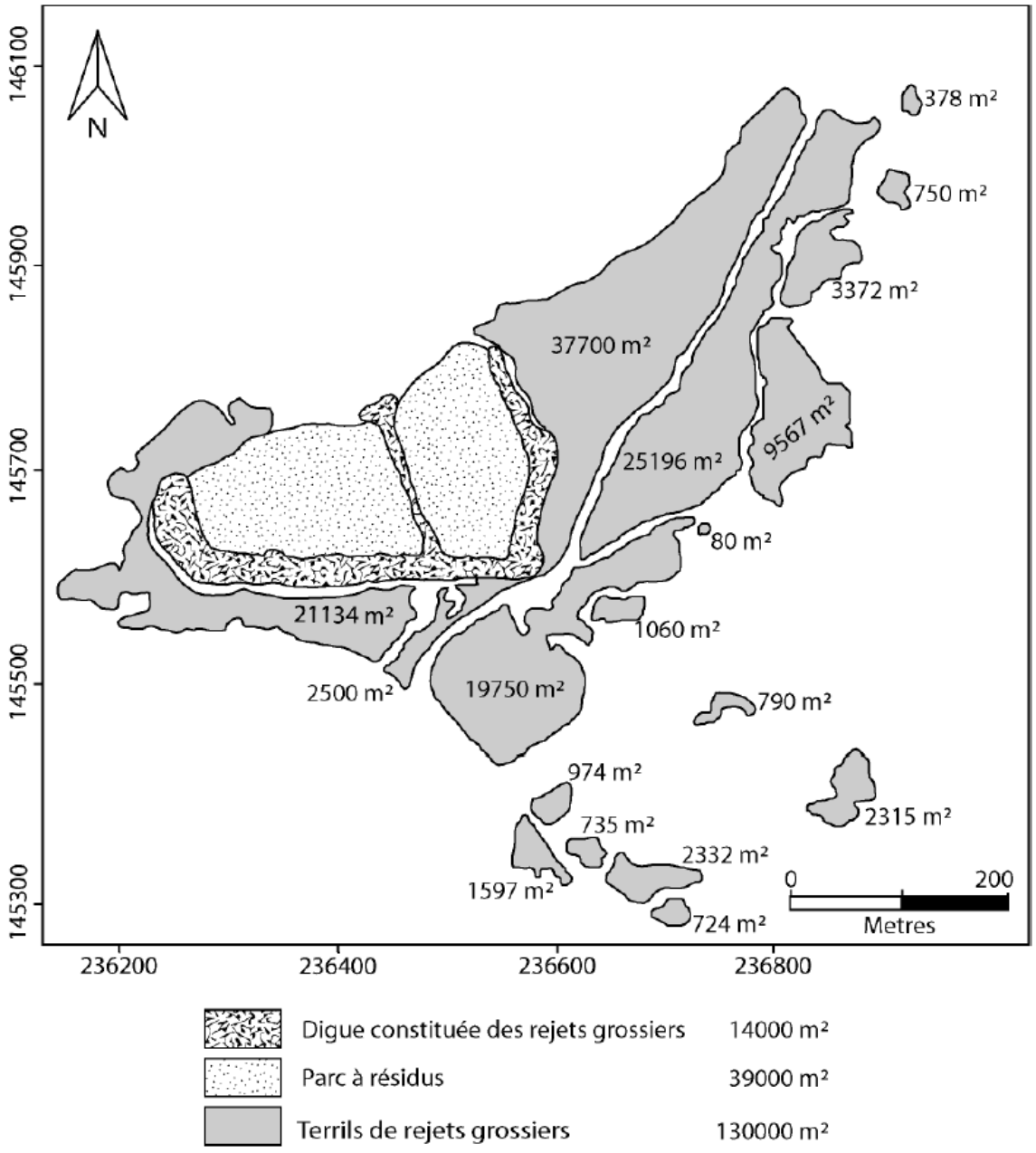


Figure B.1 : Différents rejets de la mine Kettra

Surface des rejets grossiers Kettara

Les rejets de la mine de Kettara sont des rejets de granulométrie différente (rejets fins et grossiers) dispersés sur le site miniers abandonné d'une façon aléatoire. Tous les rejets miniers de Kettara

couvrent une superficie totale de 28 ha avec un volume entier estimé à 440000 m3 (Ait-khouia, 2013).

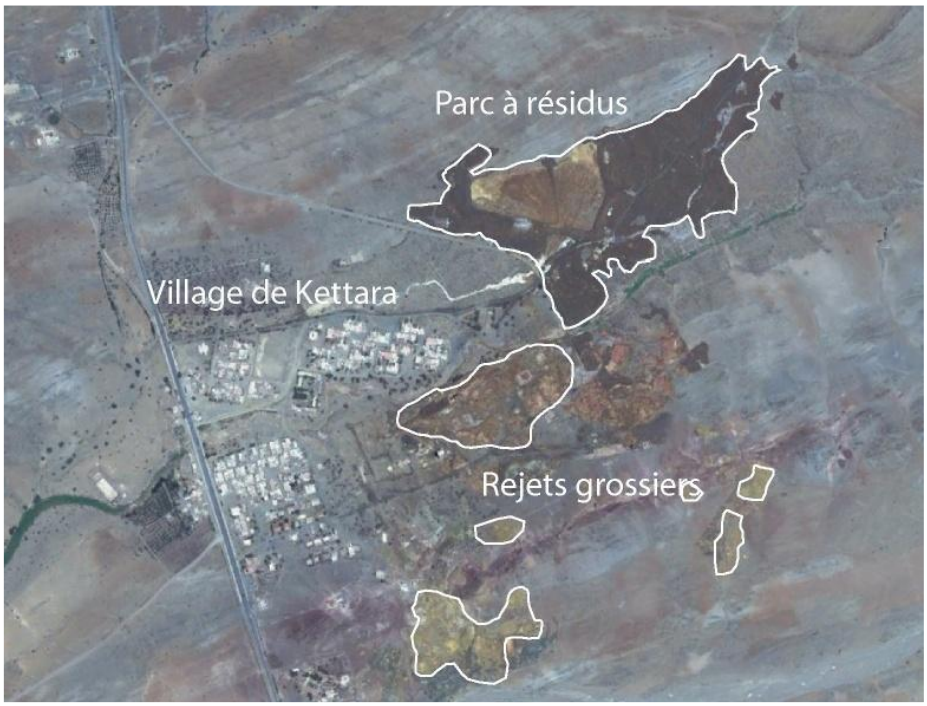


Figure B.2: Carte satellite de la mine Kettara

Figure B.3 : Rejets grossiers mis en tas

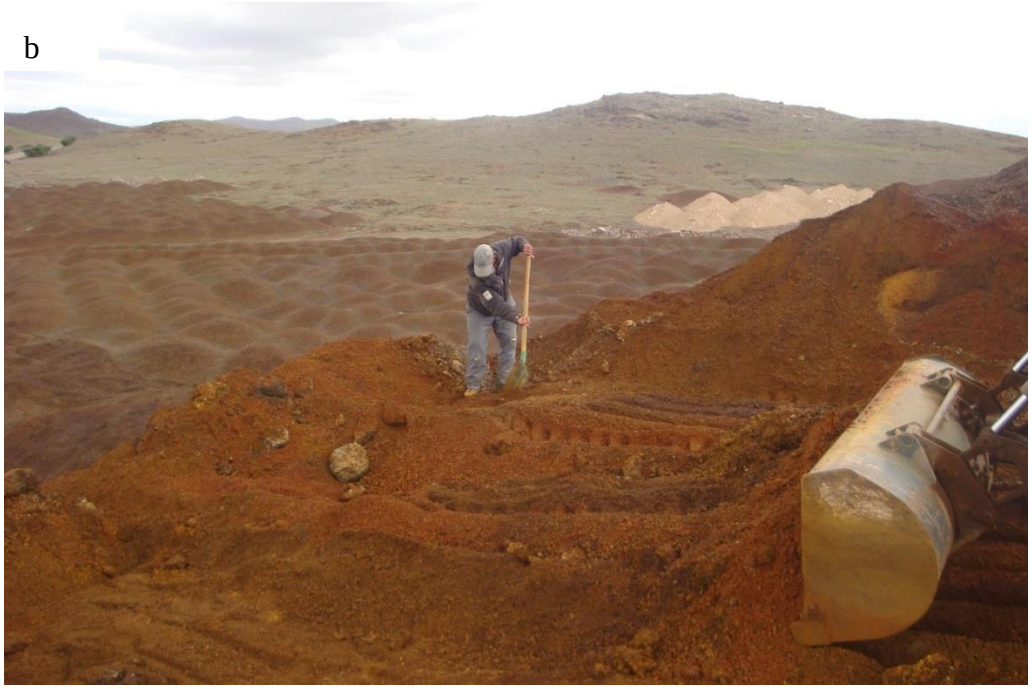
Figure B.4 : Rejets fins entourés par la digue

ANNEXE C – PHOTOS COMPLÉMENTAIRES DE LA CONSTRUCTION DE LA CELLULE EXPÉRIMENTALE

Figure C.1 : Zone d'étude

a

b



c

d

e

Figure C.2 : Travaux d’aplanissement de la pente (a, b, c, d, e)

a

b

Figure C.3 : Transport des rejets calcaires phosphatés (a et b)

a

b

Figure C.4 : Mise en place de la couche calcaire

Figure C.5: Drain sous forme de géomembrane relié à un tuyau

ANNEXE D – COURBES DE CALIBRATION DE SONDES (EC-5)

Les sondes EC-5 de Decagon ont été choisies pour mesurer la teneur en eau volumique dans le recouvrement SR. Cette sonde peut être utilisée dans un environnement de -40 à 60 °C. Elle mesure la teneur en eau volumique en utilisant la technique Frequency Domain (FD). La teneur en eau volumique est mesurée par une onde oscillant à 70 MHz qui mesure la permittivité diélectrique du sol. La sonde donne des valeurs précises à± 0,03 m^3/m^3 sur une gamme de 0 à 100% pour une calibration avant de procéder à la calibration des échantillons de terrain homogènes sont pris. Les échantillons avec une teneur en eau caractéristiques sont placés dans un cylindre de volume connu. Une fois la totalité du cylindre est complétée, la sonde est installée verticalement au centre. La sonde est ensuite connectée à un Datalogger (Em50 decagon). Une fois que la réponse de la sonde est enregistrée (en mV ou raw counts), l'échantillon est finalement retiré de son contenant, pesé mis à l'étuve et la masse sèche est ainsi obtenue. La teneur en eau volumique de l'échantillon est estimée à partir de la relation suivante :

$$M_w = M_h - M_s \qquad 1$$

$$V_w = \frac{M_w}{\varphi_w} \qquad 2$$

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \qquad 3$$

Où

Mw : masse d'eau (g),

Mh : masse humide du matériau (g),

Ms : masse sèche du matériau (g),

φw : masse volumique de l'eau (1 g/cm3), *Vw* volume d'eau (cm3),

*Vt :*volume total de l'échantillon (cm3), *θ* teneur en eau volumique (cm3/cm3)

Les figures ci-dessous présentent les courbes de calibrations pour les sondes ECH_20 (EC-5) des matériaux étudiés rejets grossiers de Kettara (bris capillaire) et les rejets calcaires phosphatés.

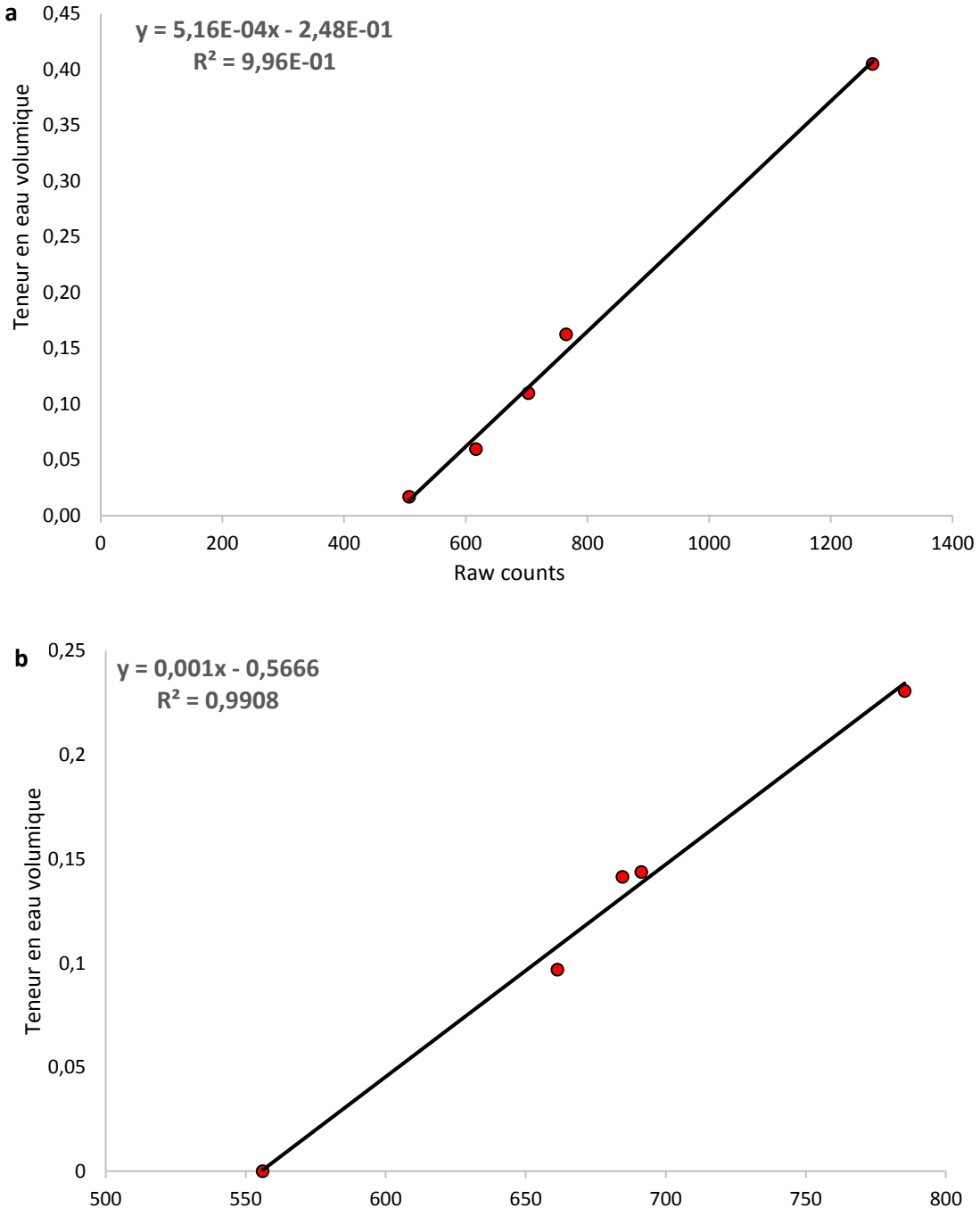


Figure D.1 : Courbes de calibration des sondes EC-5 pour les rejets grossiers et les rejets calcaires phosphatés de Kettara

ANNEXE E – CONTRÔLE QUALITÉ

Contrôle qualité durant la construction (avril 2014)

Tableau E.1: Essais de contrôle qualité

Échantillon	Teneur en eau massique (W%)	Porosité (n)
1	0,046	0,44
2	0,039	0,413
3	0,043	0,398
4	0,044	0,406
5	0,054	0,436
6	0,075	0,508
7	0,059	0,524
8	0,063	0,509
9	0,068	0,449
10	0,067	0,445
11	0,085	0,49

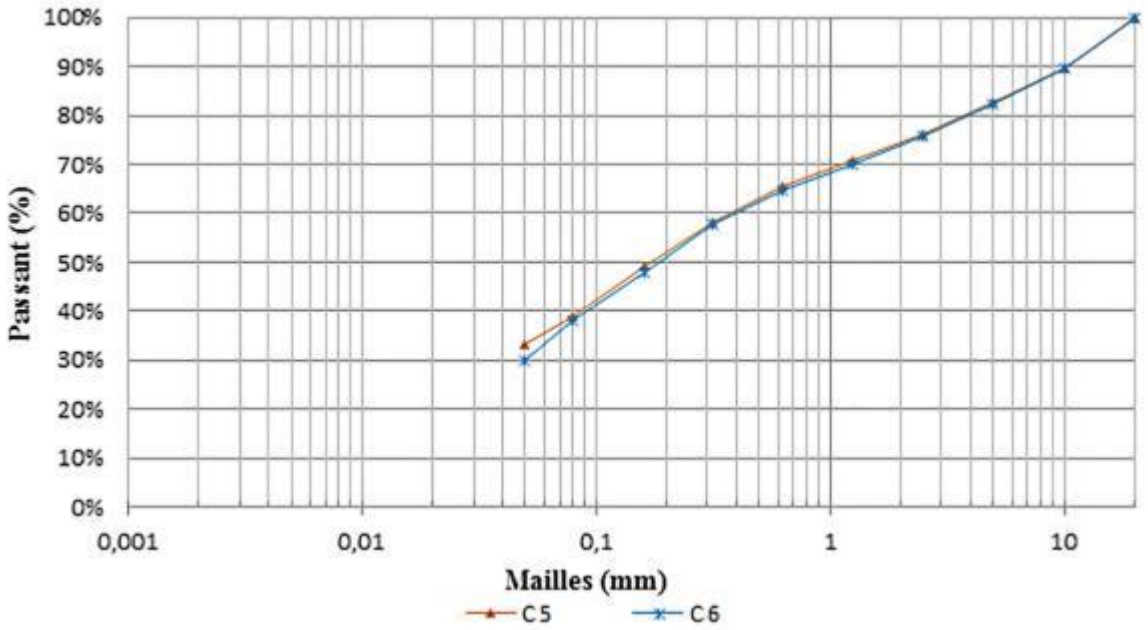


Figure E.1 : Essais de granulométrie

Tableau E.2 : Contrôle qualité avant l'évènement de mouillage de 155 mm (octobre 2014)

	Teneur en eau massique (W%)	**Densité sèche (rho)**
0 cm	0,009	0,179
2 cm	0,0179	0,132
4 cm	0,035	0,142
6 cm	0,041	0,107
8 cm	0,050	0,138
10 cm	0,058	0,324
50 cm	0,0930	1,401
75 cm	0,08	1,355
85 cm	0,051	1,903

Évaluation de la teneur en eau aux stations 2 et 4 sur le terrain après l'évènement de mouillage de 100 mm

Résultats de teneur en eau de 0 à 10 cm de profondeur

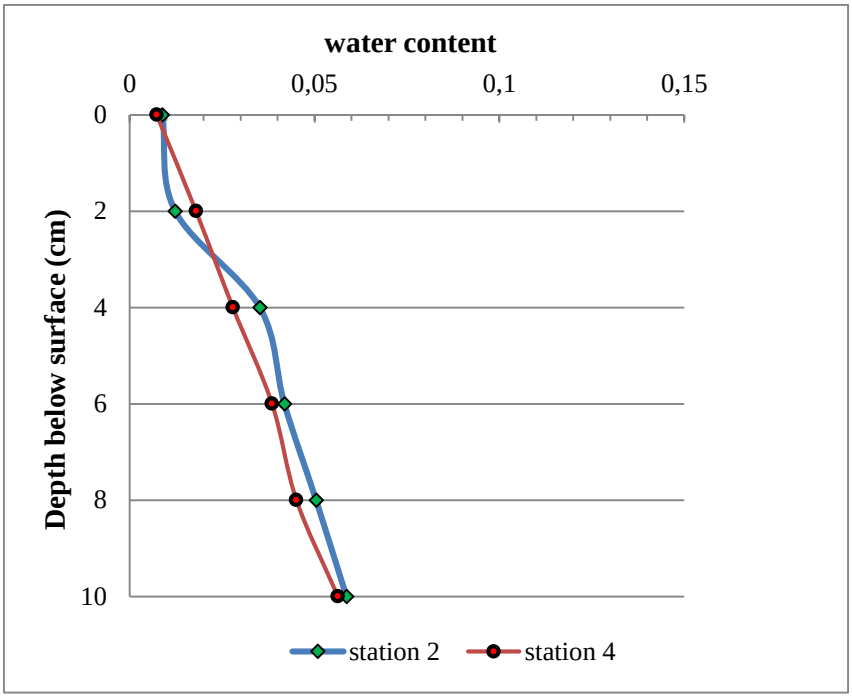


Figure E.2 : Résultats de teneur en eau de 0 à 10 cm de profondeur pour la station 2 et 4

Tableau E.3 : Résultats de teneur en eau à la profondeur 10, 50, 75, 85 cm pour la Station

Profondeur	**porosité**	**W (%)**	**θ (expérimentale)**	**θ(EC5)**
10 cm	0,41	5,8	9,8%	8,5%
50 cm	0,5	9,9	14,1%	15%
75 cm	0,52	7,9	11,3%	14%
85 cm	0,37	5,1	9,1%	10%

Tableau E.4 : Résultats de teneur en eau à la profondeur 10, 50, 75, 85 cm pour la Station 4

Profondeur	**porosité**	**W (%)**	**θ (expérimentale)**	**θ(EC5)**
10 cm	0,41	5,6	9,4%	10%
50 cm	0,5	8,6	13%	14,2%
75 cm	0,52	9,2	14,3%	17,7%
85 cm	0,35	6,9	13,2%	16%

Tableau E.5 : Teneur en eau (W%) à la profondeur 75 cm pour les stations 1, 2 et 4

Station 1	**Station 2**	**Station 4**
8,5	7,96	9,23

ANNEXE F – SIMULATIONS DES ÉVÈNEMENTS DE PRÉCIPITATIONS

Construction du bassin d'eau et installation du système d'irrigation

Figure F.1 : Construction du bassin d'eau pour l'irrigation

Figure F.2 : Mise en place du système d'irrigation

Figure F.3 : Démarrage des travaux d'irrigation

Mesure des débits durant l'évènement de mouillage de 155 mm

Tableau F.1 : Mesure des débits dans les gouteurs du système d'irrigation

	Volume d'eau en ml	**Côté droit**	**Milieu de la pente**	**Côté gauche**
Station 1	**100**	**241s**	**270s**	**273**
Station 2	**100**	**240**	**225s**	**224**
Station 3	**100**	**220**	**218**	**219**
Station 4	**100**	**190**	**189**	**187**

Figure F.4 : Eau de percolation des lysimètres

Résultats du pH de l'eau de percolation des lysimètres après l'évènement de mouillage de 155 mm

Tableau F.2 : Résultats du pH des eaux de percolation

Lysimètre 1	**Lysimètre 2**	**Lysimètre 3**	**Lysimètre 4**	**Lysimètre 5**
3,43	3,49	2,55	2,69	3,47

ANNEXE G – RÉSULTATS DU BILAN HYDRIQUE ET DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE

Évaluation du bilan hydrique durant l'important évènement de précipitation (155 mm)

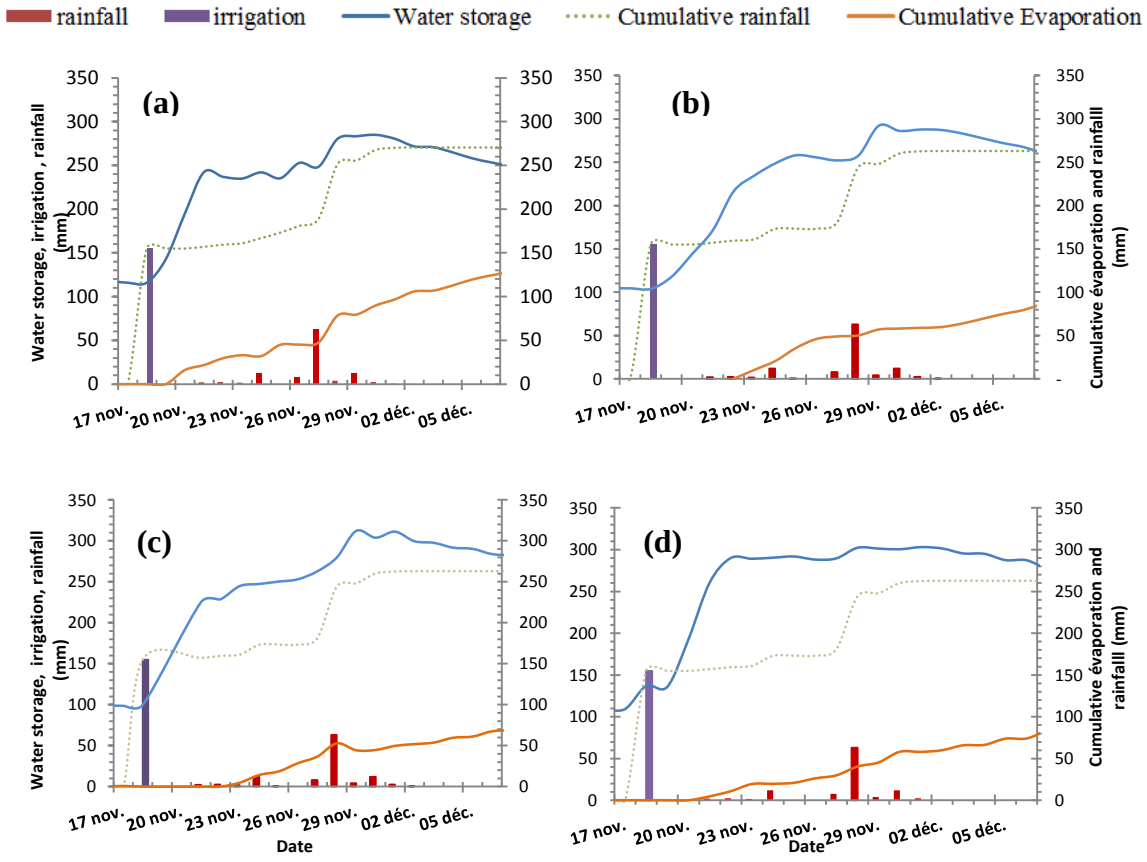


Figure G.1 : Bilan hydrique pour les 4 stations : 1 (a), 2 (b), 3 (c), and 4 (d).

Évaluation de la teneur en eau volumique durant l'important évènement de précipitations (155mm)

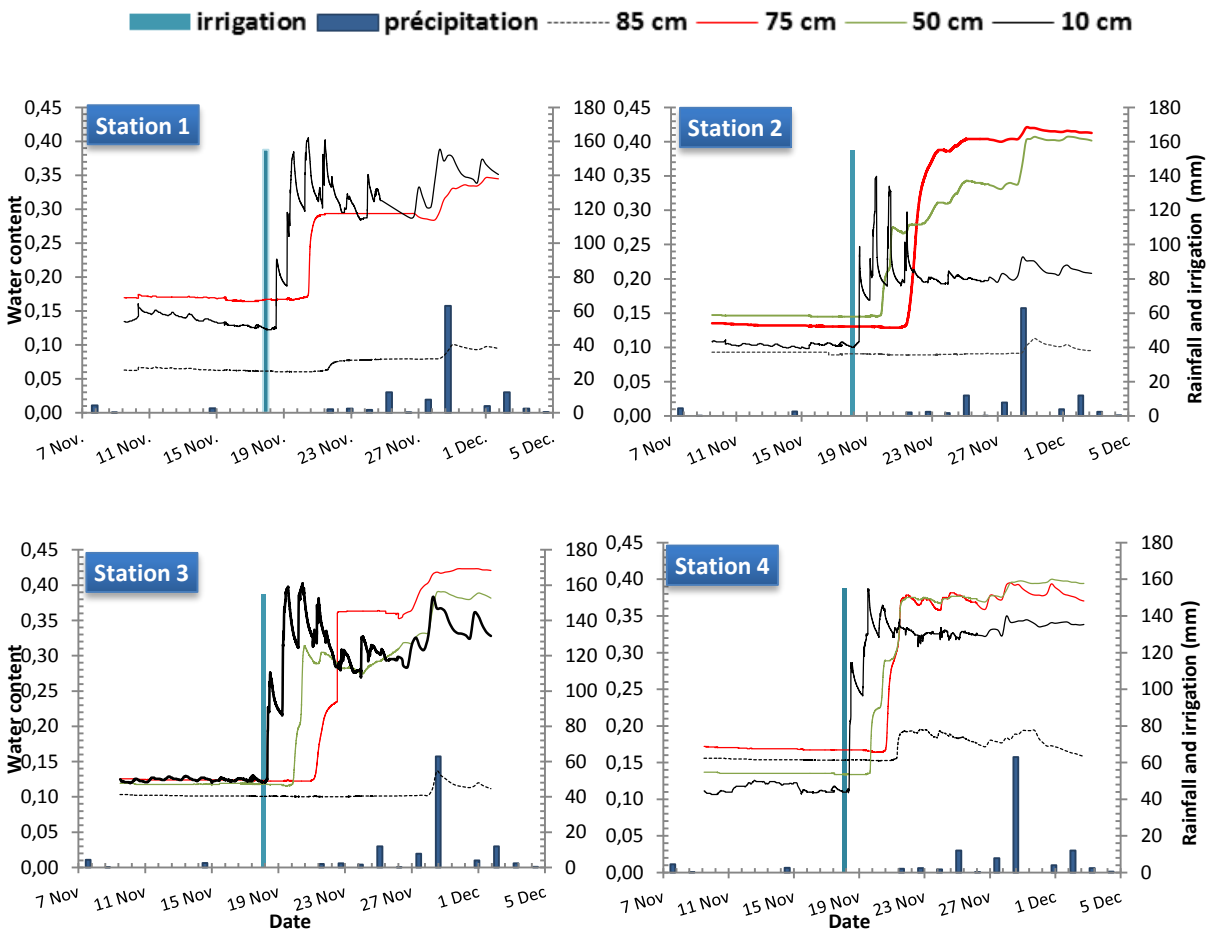
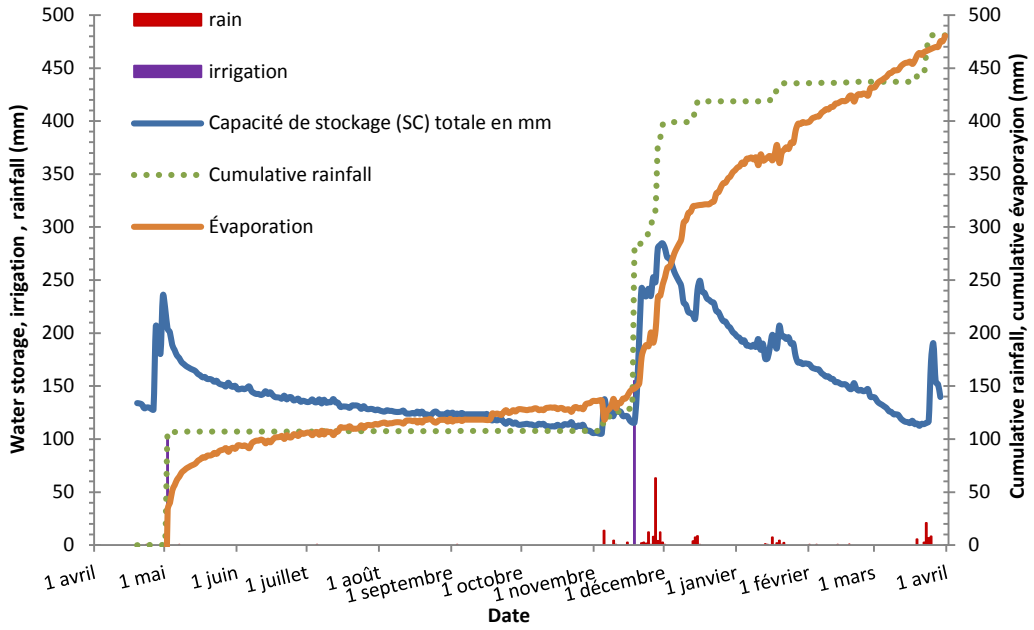


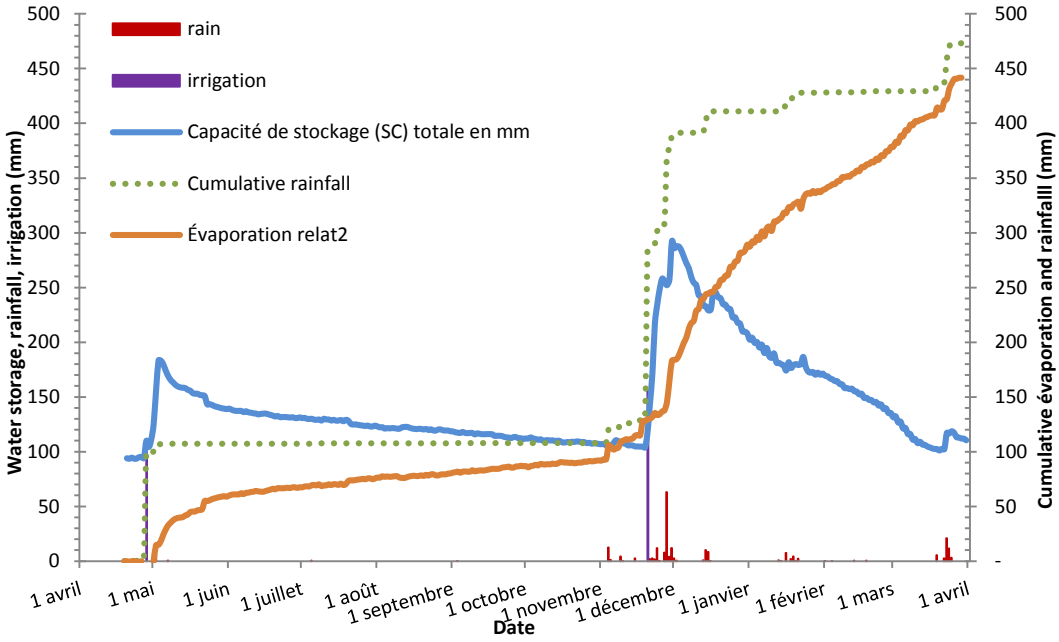
Figure G.2 : Évolution de la teneur en eau volumétrique à 10, 50, 75 et 85 cm de profondeur pour les 4 stations de la couverture SR expérimentale inclinée durant l'évènement de mouillage de 155mm

Bilan hydrique des quatre stations de mesures

Station 1



Station 2



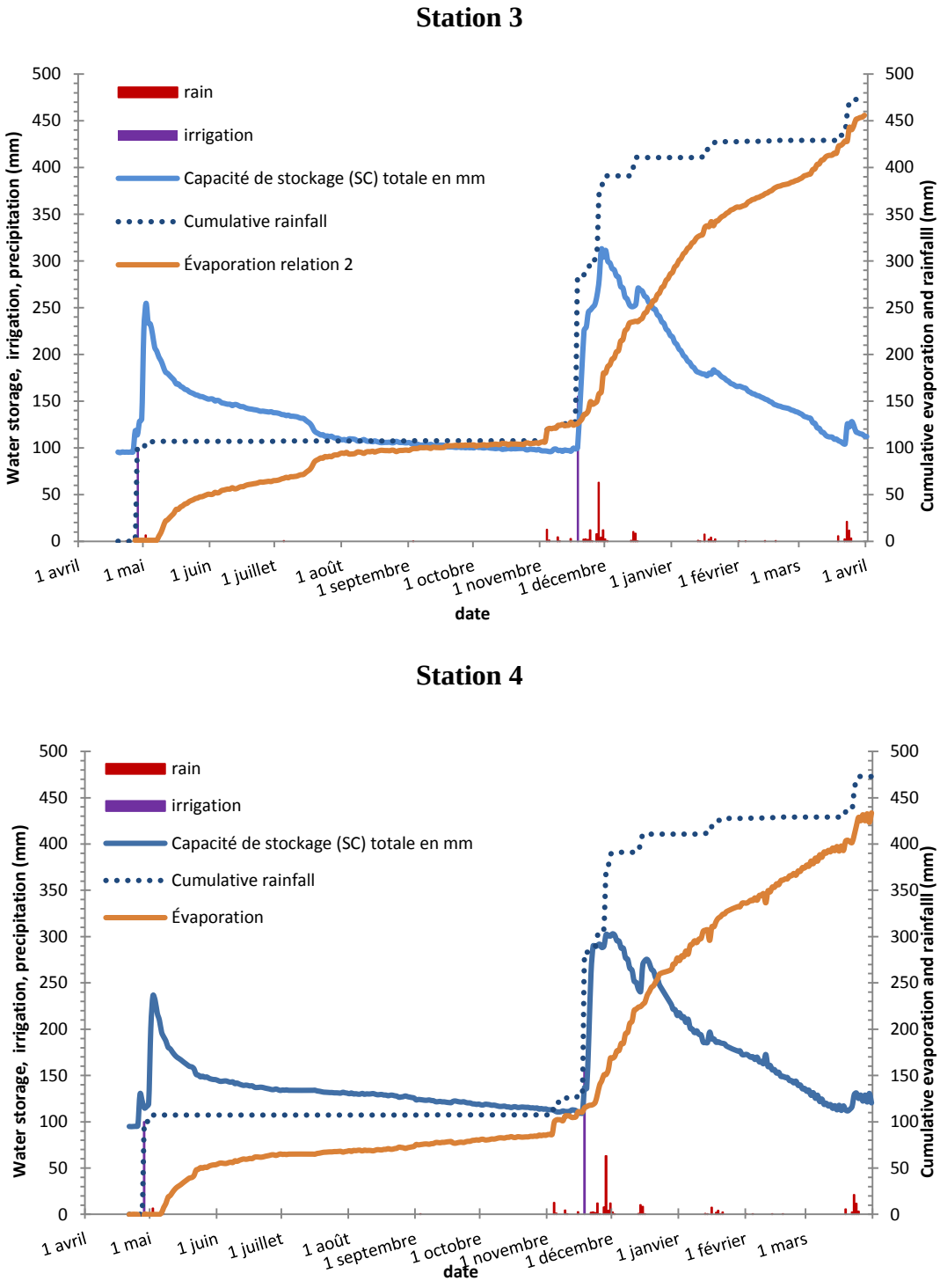


Figure G.3 : Bilan hydrique des 4 stations de mesures (station 1, 2, 3 et 4) d'avril 2014 à avril 2015.

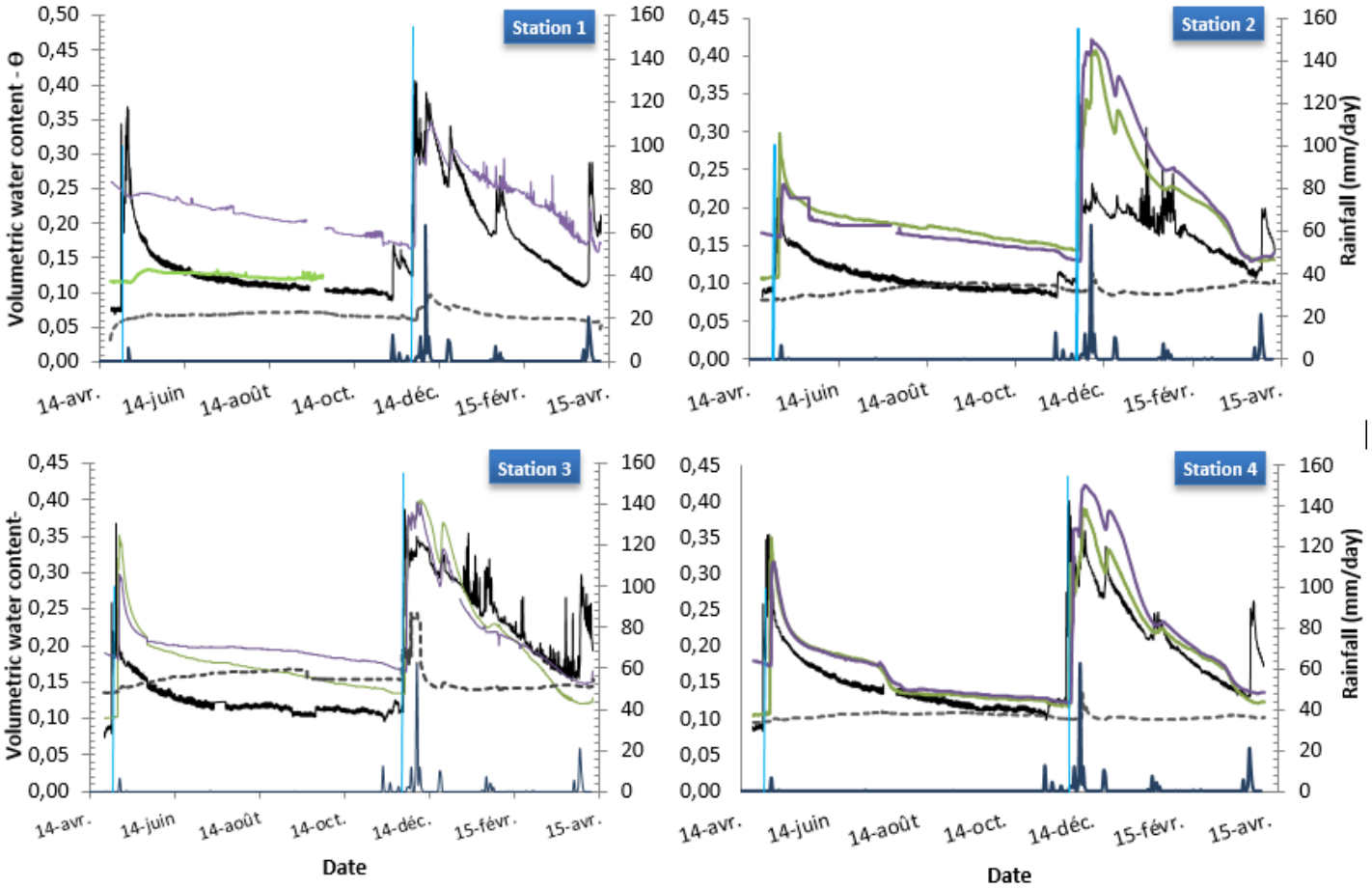


Figure G.4: Évolution de la teneur en eau volumétrique à 10, 50, 75 et 85 cm de profondeur pour les 4 stations de la couverture SR expérimentale inclinée d'Avril 2014 à Avril ici 2015

ANNEXE H – ÉTAPE DE CONSTRUCTION D'UNE CELLULE EXPÉRIMENTALE INCLINÉE

La conception d'une SR inclinée visant à contrôler l'infiltration de l'eau vers les rejets contaminés découle souvent d'une approche itérative qui passe par l'établissement d'une géométrie de départ fondée sur les propriétés des différents matériaux, la collecte de données climatiques, la caractérisation des matériaux utilisés et la réalisation des modélisations physiques et numériques (Aubertin et al. 2002). La conception d'une couverture SR en climat aride se réalise en sept étapes et ne prend en compte aucun aspect géochimique, seuls les aspects hydrogéologiques sont considérés. La figure 2.10 une représentation schématique des étapes à suivre pour la construction d'une SR visant à contrôler la production du DMA.

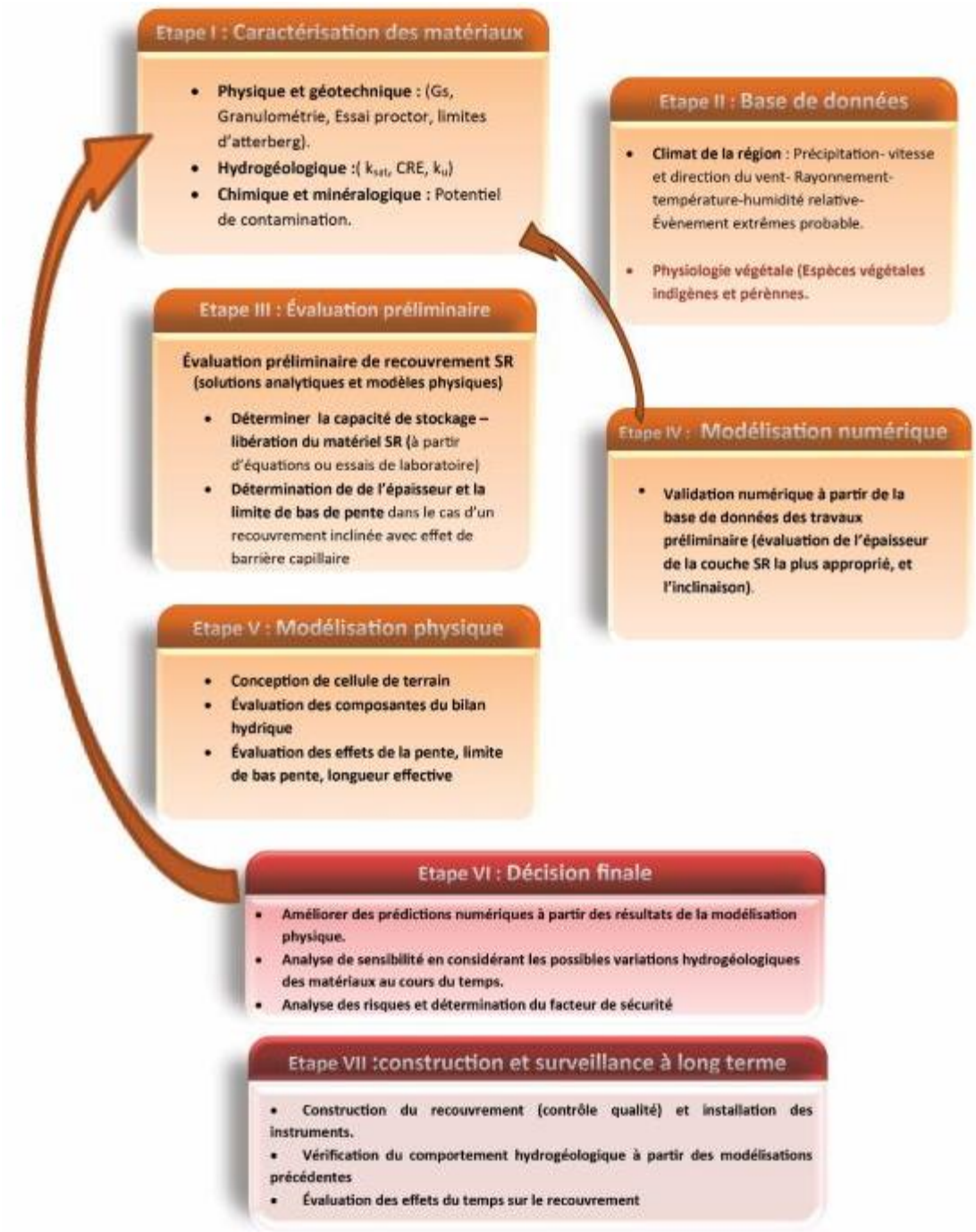


Figure H.1 : Les différentes étapes de la conception d'une couverture store-and-release inclinée

(Adapté de Bussière *et al. (*2007) et Bossé (2014))

Annexe I – Comparaison des méthodes d'estimation directe/indirecte du rayonnement net et calibration de la formule d'évapotranspiration potentielle de Hargreaves et Samani (1985)

Cette partie a été effectuée dans le travail précédent de Bossé (2014).

Introduction

Le standard FAO-56 de Penman-Monteith, communément utilisé lors de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), fait intervenir différentes variables météorologiques, telles que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement net. Généralement, ces variables sont mesurées directement à partir de plusieurs capteurs spécifiques. Toutefois, les stations météorologiques actuelles sont parfois sujettes à des disfonctionnements temporaires ou l'absence de certains capteurs (e.g. pyrradiomètre, capteur pour l'humidité relative ou la vitesse du vent) ne permet généralement pas l'estimation de l'ETP à partir de cette formule. Nonobstant des méthodes de calcul indirectes, par exemple dans le cas du rayonnement net (voir Bossé, 2014), ou des formules empiriques calibrées peuvent remédier à ces problèmes. Par conséquent, le présent appendice vise à étudier l'influence des méthodes de mesure du rayonnement net (directe et indirecte) sur l'estimation de l'ETP et à proposer une alternative au standard de Penman-Monteith pour des conditions climatiques typiques du site minier abandonné de Kettara.

Comparaison des méthodes d'estimation (directe et indirecte) du rayonnement net

Lors des essais de terrain en colonne instrumentée (Chapitre 2; Bossé, 2014) le rayonnement net a été calculé indirectement alors que dans le cas des cellules expérimentales (Chapitre 4; Bossé, 2014) ce dernier a été mesuré à partir de deux pyranomètres (pour plus d'information, voir Annexe B). Afin d'évaluer l'influence des méthodes utilisées sur l'estimation de l'ETP, des valeurs de rayonnement net obtenues à partir de ces deux méthodes distinctes sont comparées ci-dessous; cette comparaison a été réalisée à partir des mesures journalières (373 jours) de la station météorologique située sur le parc à rejets de Kettara.

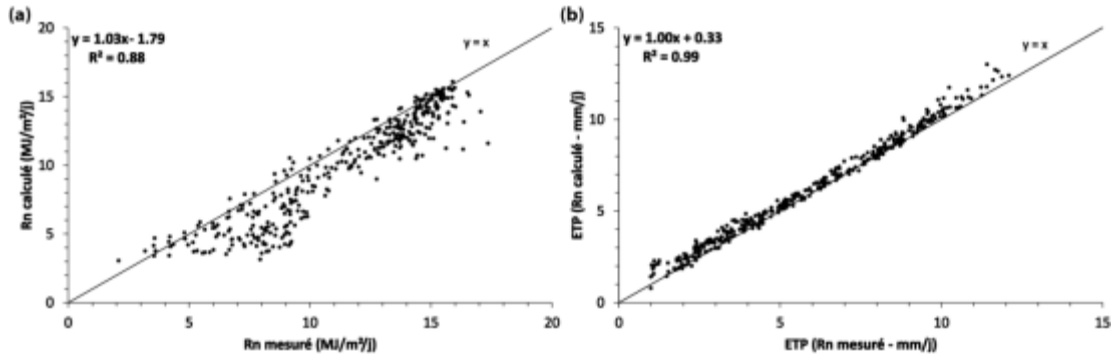


Figure I.1 : Droites de corrélation entre les estimations du rayonnement net (méthode direct/indirecte) (a) et des ETP résultantes (b).

La figure II.1a présente les corrélations entre les estimations journalières du rayonnement net obtenues à partir des deux méthodes. Concrètement, les estimations indirectes (calculées) sous-estiment légèrement (coefficient de détermination $R^2 = 0.88$) les valeurs du rayonnement net, et ce, principalement quand les valeurs mesurées sont inférieures à 10 MJ/m²/j (saisons humides). Toutefois, les estimations journalières de l'ETP, respectivement calculées à partir de ces valeurs, ne semblent pas être affectées (coefficient de détermination $R^2 = 0.99$) (Fig. II.1b). En effet, dans ce cas spécifique représentatif d'un climat aride, la méthode utilisée (directe ou indirecte) pour l'estimation de l'ETP n'est pas préjudiciable. Tel que réalisé dans le chapitre 2, l'estimation indirecte du rayonnement net semble finalement être un bon compromis en l'absence d'un pyrradiommètre.

Calibration de la formule empirique de Hargreaves et Samani (1985)

L'ETP calculée dans le chapitre 4 a essentiellement été obtenue à partir du standard FAO-56 de Penman-Monteith. Cependant, en raison de quelques disfonctionnements de la station météorologique située sur le parc à rejets de Kettara, une formule empirique basée exclusivement sur la température a été utilisée afin de compléter quelques données manquantes. Préalablement, plusieurs formules empiriques ont été testées pour ces conditions climatiques arides; la formule empirique de Hargreaves et Samani (1985) (équation II.1) a donné les estimations journalières préliminaires de l'ETP les plus proches de celles du standard de Penman-Monteith.

$$ETP = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} (T_a + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \qquad \text{(II.1)}$$

Où *Ra* rayonnement extra-terrestre (MJ/m²/j), *Ta* température moyenne de l'air (°C), *T* température maximale ou minimale de l'air (°C), λ chaleur latente de vaporisation (MJ/kg).

Généralement, afin d'améliorer les estimations de l'ETP une calibration des formules empiriques utilisées est recommandée. L'objectif d'une telle approche vise simplement à faire correspondre le plus possible les estimations de l'ETP avec les mesures d'un outil de référence (e.g. standard FAO-56 Penman-Monteith) en faisant varier le paramètre empirique de la formule originale (voir Table II.1). Une analyse statistique des formules empiriques (calibrée et originale) est présentée ci-dessous (Fig. II.2 et Table II.1).

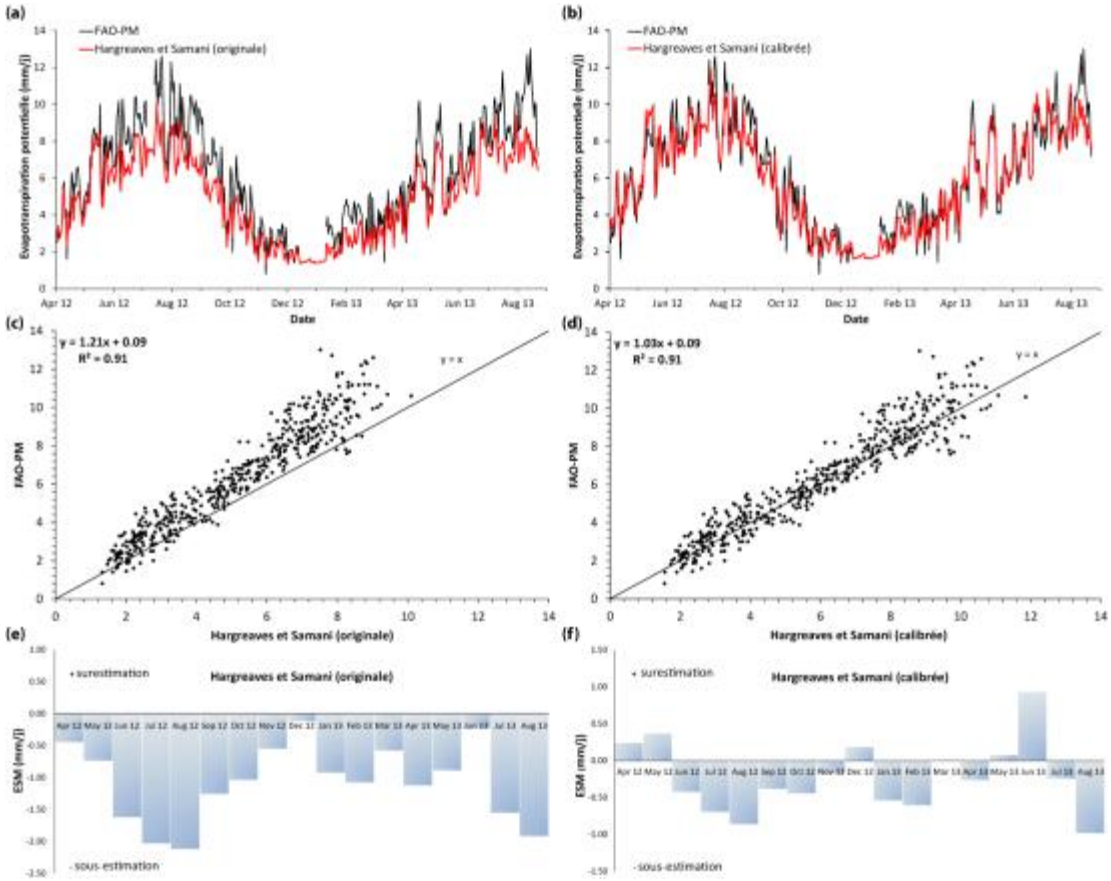


Figure I.2 : Comparaison des estimations de l'ETP, des droites de corrélations et des erreurs systématiques moyennes entre les formules de Hargreaves-Samani (originale ou calibrée) et le standard de Penman-Monteith.

Plusieurs outils usuels statistiques ont été utilisés, tels que le coefficient de détermination (R^2), les calculs de l'écart quadratique moyen (EQM), de l'erreur systématique moyenne (ESM) et du t-statistique (pour plus d'information voir Appendice I). Dans les deux cas, les comparaisons des estimations de l'ETP (Fig. II.2a, b) ainsi que les coefficients de détermination (R^2 = 0.91) (Fig. II.2c, d et Table II.1) montrent que les formules empiriques de Hargreaves et Samani (originale et calibrée) donnent des estimations proches de celles du standard FAO-56 Penman-Monteith.

Tableau I.1 : Constantes de la régression linéaire a (pente) et b (ordonnée à l'origine), R^2, EQM, ESM et t-statistique des formules de Hargreaves et Samani (calibrée et originale) par rapport au standard de Penman-Monteith (pour le site de Kettara).

Formule	Paramètre empirique	a (mm j^{-1})	b (mm j^{-1})	R^2	EQM (mm j^{-1})	ESM (mm j^{-1})	t
Hargreaves et Samani (originale)	0.0023	1.21	0.09	0.91	1.57	-1.12	22.11
Hargreaves et Samani (calibré)	0.0027	1.03	0.09	0.91	1.03	-0.22	4.92

*t_{crit} à 5% = 1.96, N = 469

Toutefois, d'après la figure II.2 et la table II.1, les constantes a et b de la droite de corrélation linéaire de la formule empirique de Hargreaves et Samani calibrée (1.03; 1.09) présentent raisonnablement un plus faible décalage que celle de la formule originale (1.21; 1.09). De plus, la formule de Hargreaves et Samani calibrée présente un écart moyen (EQM = 1.03 mm j^{-1}) et une erreur systématique moyenne (ESM = -0.22) plus faibles que la formule empirique originale (Table II.1). D'après la figure II.2, la formule de Hargreaves et Samani sous-estime les valeurs de l'ETP principalement durant la saison sèche (Fig. II.2a, e). Dans le cas de la formule empirique calibrée, l'erreur systématique moyenne est plus faible durant cette période (Fig. II.2f). Finalement, et ce, bien que le t-statistique (4.92) soit supérieure au t-critique (1.96), la formule calibrée de Hargreaves et Samani est jugée comme une alternative satisfaisante au standard de Penman-Monteith à l'échelle locale du site de Kettara.

Conclusions et recommandations

L'objectif du présent appendice était de démontrer l'influence de la méthode d'estimation du rayonnement net sur le calcul de l'ETP mais également de proposer une alternative au standard de Penman-Monteith pour des conditions climatiques représentatives du site minier abandonnée de Kettara. Concrètement, en climat aride, la méthode (indirecte ou directe) d'estimation du rayonnement net n'a pas affecté les valeurs calculées de l'ETP. De plus, la formule empirique de Hargreaves et Samani (1985) calibrée à partir du standard de Penman-Monteith a été présenté comme une alternative satisfaisante. Finalement, il est recommandé d'évaluer l'influence de la méthode d'estimation du rayonnement net sous des conditions climatiques distinctes de celles du site minier de Kettara et d'utiliser la formule de Hargreaves et Samani calibrée (paramètre empirique = 0.0027) en cas de défaillance de la station météorologique.

ANNEXE J – SCHÉMA DES SYSTÈMES DE RECOUVREMENTS HYDROGÉOLOGIQUES POUR LE CONTRÔLE DU DMA EN CLIMAT ARIDE

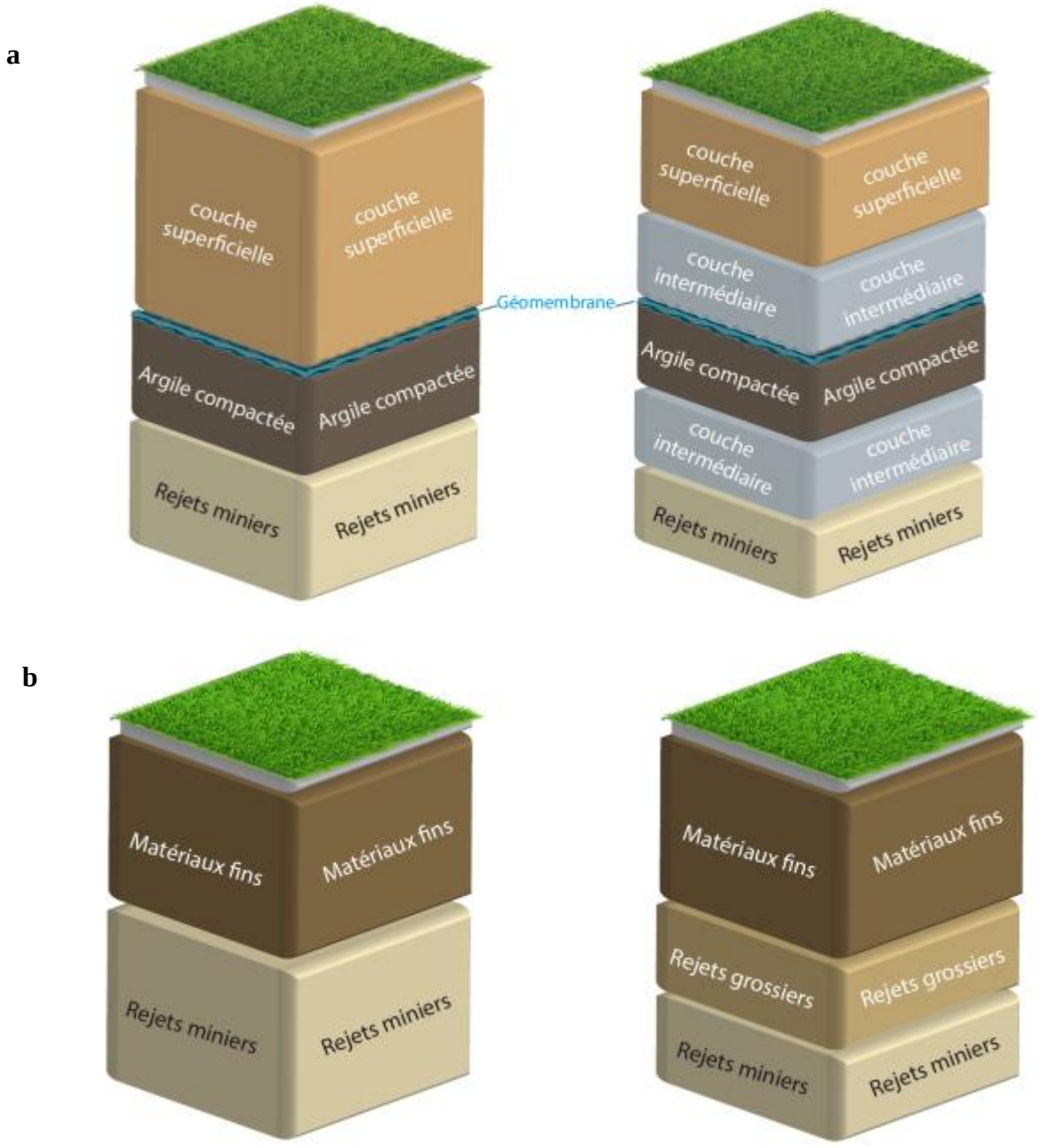


Figure J.1 : Systèmes de recouvrement conventionnel (a) et les recouvrements alternatifs type store-and-release (b) pour le contrôle du DMA