

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Promotion : 2001/2002

Département : Hydraulique

Mémoire

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Pour obtenir le titre de :
Ingénieur d'état en Hydraulique

Présenté et soutenu publiquement par

M^{elle} Feriel Meriem MESMOUDI

Détermination des paramètres hydrodynamiques des Géosynthétiques Bentonitiques et de leur influence sur les transferts dans les étanchéités composites des installations de stockage de déchets

Proposé et encadré par :
M^{me} Nathalie Touze-Foltz
Ingénieur ENGEES, Docteur de l'ENSM

Co-encadré par :
M^{elle} F. Z. Zerfa
Ingénieur ENP, Docteur de l'INPG



Unité Ouvrage pour le Drainage et l'Etanchéité
Parc de Tourvoie, Bp 44, 92163 Antony Cedex

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET...
POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Promotion : 2001/2002

Département : Hydraulique

Mémoire

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Pour obtenir le titre de :
Ingénieur d'état en Hydraulique

Présenté et soutenu publiquement par

M^{elle} Feriel Meriem MESMOUDI

**Détermination des paramètres
hydrodynamiques des Géosynthétiques
Bentonitiques
et
de leur influence sur les transferts dans
les étanchéités composites des
installations de stockage de déchets**

Proposé et encadré par :
M^{me} Nathalie Touze-Foltz
Ingénieur ENGEEES, Docteur de l'ENSMP

Co-encadré par :
M^{elle} F. Z. Zerfa
Ingénieur ENP, Docteur de l'INPG



Unité Ouvrage pour le Drainage et l'Etanchéité
Parc de Tourvoic, Bp 44, 92163 Antony Cedex

Remerciements



J'exprime ma reconnaissance et ma profonde gratitude à mon encadrante de stage M^{me} Nathalie Touze-Foltz, de l'unité DEAN, qui m'a guidée avec enthousiasme dans mon travail et dont les conseils judicieux ont été très enrichissants ; ainsi qu'à l'ensemble du personnel du Cemagref d'Antony pour son accueil chaleureux et sa volonté de créer une ambiance propice au travail.

Je remercie M^{elle} F.Z.Zerfa, ma tutrice de l'ENP, pour m'avoir encouragée et pour le temps qu'elle m'a consacré.

Je remercie également tous mes enseignants, qui ont contribué durant toute ma formation à me faire aimer la science et à élargir mes connaissances. En particulier, mon chef de département M^{elle} S.Benmamar, pour ses encouragements et le soutien constant qu'elle m'a apportée.

J'associe à ces remerciements tous mes camarades et amis, pour les bons moments que nous avons pu partager.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Karim d'avoir été présent à mes cotés malgré la distance, de m'avoir soutenu dans les moments difficiles, et d'être mon grand ami.

A Samira, l'éternelle amie d'enfance.

Lilia, pour la sœur, l'amie de cœur qu'elle est pour moi.

Je ne saurais terminer sans une pensée pour ma famille, pour mes chers et tendres papa, maman, mes frères et soeur Mustapha, Khaled et Sarah, pour avoir été toujours là pour moi, pour avoir fait en sorte que je ne manque de rien, pour avoir fait de moi une personne heureuse, comblée mais surtout fière d'être leur fille, d'être leur grande sœur.

J'espère qu'ils trouveront ici et combien c'est maigre comme récompense, l'expression de mon éternel amour et ma profonde gratitude.

Sommaire



Remerciements	
Sommaire	
Résumé	1
Listes des principaux symboles	2
Liste des acronymes	4
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Introduction	7
-Chapitre I-	9
Matériaux géosynthétiques d'étanchéité	9
1. Matériaux d'étanchéité :	9
1.1. Les géomembranes	9
1.1.1. Définition	9
1.1.2. Les différents types de géomembranes	9
1.1.3. Mise en place et utilisations	9
1.1.4. Sollicitations exercées sur les géomembranes et conséquences	10
1.2. Les géofilms	10
1.3. Les géotextiles	10
1.4. Les géosynthétiques bentonitiques	11
1.4.1. Définition	11
1.4.2. La bentonite	11
1.4.2.1. minéralogie et structure des bentonites	11
1.4.2.1.1. structure cristallographique des phyllosilicates	11
1.4.2.1.2. structure cristallographique des smectites (montmorillonites)	12
1.4.3. Les différents types de GSB	13
1.4.3.1. Les géotextiles bentonitiques	13
1.4.3.2. Les géofilms bentonitiques	13
2- Paramètres physiques	14
2.1. Porosité « n »	14
2.2. Teneur en eau massique « w »	14
2.6. Teneur en eau volumique « θ_v »	15
-Chapitre II-	16
Modélisation mathématique des écoulements dans les étanchéités composites avec GSB	16
1. Potentiel de l'eau dans le sol	16
1.1. Potentiel gravitationnel	16
1.2. Potentiel matriciel	17
1.3. Charge hydraulique	17
1.4. Succion	17
2. Capillarité	18
3. Equations d'écoulement	18
3.1. Equation de Darcy	18
3.2. Equation de continuité	19
3.3. Equation généralisée de Richards	19
4. Paramètres hydrodynamiques	20
4.1. Relations caractéristiques de succion-teneur en eau (Velly, 2000)	20
4.1.1. courbe caractéristique d'humidité	20

4.1.3.Relations proposées pour les courbes de succion-teneur en eau	21
4.2.la fonction de conductivité hydraulique	22
5. Modélisation des écoulements dans les interfaces des étanchéités composites	24
5.1.Présentation de la géométrie étudiée	24
5.2.Hypothèses	25
5.3.Solutions analytiques du modèle d'écoulement	25
5.3.1.Ecoulement radial entre deux plaques parallèles.....	26
5.3.2.Principe de résolution	27
5.3.3.Equation différentielle obtenue	27
5.3.4.Solutions générales (Touze-Foltz).....	28
5.3.5.conditions aux limites.....	28
5.3.5.1.condition à la limite aval de l'interface	28
5.3.5.2.condition à la limite amont de l'interface.....	28
5.3.6.Solutions analytiques obtenues (Touze-Foltz)	29
-Chapitre III-.....	31
Comportement hydraulique des GSB.....	31
1. Influence du liquide d'hydratation/percolation	31
2. Influence de la contrainte mécanique	32
3. Estimation de la transmissivité d'interface au laboratoire	35
4.Résultats expérimentaux de la bibliographie.....	36
4.1.Harpur et al. (1993)	36
4.2.Touze-Foltz et al (2002)	36
4.2.1.Dispositif	37
4.2.1.1. Cellule de mesure	37
4.2.1.2.Presse et anneau dynamométrique.....	37
4.2.1.3.Application de la charge hydraulique et mesure du débit de fuite	38
4.2.1.4.Application de la contrainte mécanique	38
4.2.2.Matériels testé.....	38
4.2.2.1.Sol.....	38
4.2.2.2.GSB	38
4.2.2.3.Géomembrane.....	38
4.2.3.Tests conduits avant la préhydratation	38
4.2.4.Résultats obtenus	39
5.Conclusion.....	40
-Chapitre IV-	41
Méthodes de mesure des relations teneur en eau-succion	41
1.Synthèse bibliographique	41
1.1. pour les géotextiles	41
1.2.pour le GSB/bentonite	43
1.3.Conclusion.....	45
2.Techniques de contrôle et de mesure de la succion.....	46
2.1.Contrôle par plaque tensiométrique.....	46
2.2.Contrôle par « translation d'axes ».....	47
2.3.Technique de contrôle osmotique.....	48
2.4.Technique de contrôle par phase vapeur	50
2.5.Mesure tensiométrique de la succion	51
2.6.Mesure psychrométrique de la succion	52
2.7.Méthode du papier filtre	52

2.8.Mesures de succion par d'autres systèmes	53
3.Conclusion	53
-Partie II-	56
Expérimentations	56
1.Présentation des matériaux étudiés.....	56
1.1.Le Bentomat	56
1.2.Le Gundseal.....	56
2.Protocoles élaborés pendant le stage	57
2.1.Procédures préliminaires	57
2.1.1.Détermination de la teneur en eau initiale du GSB	57
2.1.2.Détermination de la masse d'eau nécessaire à la préhydratation du GSB	57
2.2.Technique du papier filtre	57
2.3.Technique du micropsychromètre	60
3.Résultats et interprétations des expérimentations réalisés par la méthode du papier filtre.....	65
3.1.Résultats du Gundseal	65
3.2.Résultats du Bentomat.....	69
4.Conclusion	71
-Partie III-	74
Simulations numériques	74
1.Présentation de SEEP/W	74
2.But des simulations.....	75
3.Géométrie du problème	75
4.Caractéristiques des matériaux testés	75
5.Maillage du domaine	76
6.Conditions aux limites du problème.....	76
7.Analyse du cas saturé	77
7.1.Détermination de l'épaisseur équivalente de l'interface	77
7.2.Détermination de l'influence de la variation de la charge hydraulique.....	78
7.3.Détermination de l'influence de la variation de transmissivité	79
7.4.Conclusion.....	81
8.Analyse du cas non saturé	81
8.1.détermination des courbes de rétention	81
8.2.Les constantes du problème.....	82
8.3.Les modifications apportées par rapport au cas saturé.....	82
8.4.Simulations réalisées	82
8.4.1.Influence du pas de temps	82
8.4.2.Influence de l'application de la charge.....	83
8.4.3.Influence de la condition initiale	83
9.Conclusion et perspectives	83
Conclusion générale	85
Références bibliographiques	87
Annexes	92
Annexe 1 : schéma du dispositif expérimental de mesure de transmissivité d'interface GSB/GMB, d'après Harpur et al. (1993).....	92
Annexe 2 : résultats des mesures expérimentales.....	92
Annexe 3 : les pas de temps imposés pour les simulations numériques du cas non saturé..	92
Annexe 4 : fiches techniques du Bentomat et du Gundseal	92

Résumé



Le premier objectif de cette étude est de réaliser une synthèse bibliographique qui permettra de choisir la méthode la plus adéquate pour déterminer les courbes de rétention des géosynthétiques bentonitiques (GSB).

Des mesures seront ensuite réalisées à l'aide de cette méthode sur différents GSB. Les paramètres ainsi trouvés seront utilisés pour réaliser des simulations numériques avec le code de calcul SEEP/W afin de tester numériquement l'influence de la phase de saturation des GSB sur les transferts dans les étanchéités composites.

Mots clés : GSB, rétention d'eau, saturation (préhydratation), étanchéités composites.

Abstract

The main objective of this study is to establish a bibliographic synthesis which will permit to choose the adequate method to obtain the water retention curves of Clay Geosynthetic Barrier (CGB).

Measurements were undertaken using this method on different CGB's. The parameters achieved will be used to realise a numerical simulations using an infinite element code SEEP/W in order to test numerically the influence of prehydration of CGB's on the leakage rates through a composite liners.

Key words: CGB's, water retention, saturation (prehydration), composite liners.

تلخيص

الهدف الأولي من هذه الدراسة هو إنشاء خلاصة للوثائق المرجعية التي تسمح باختيار المنهاج المناسب لتعيين منحنيات حبس الماء للجيوستنتييك بانتونيتييك (GSB). ستقام قياسات حسب هذه الطريقة على أنواع مختلفة من جيوستنتييك بانتونيك. النتائج المتحصل عليها ستستعمل لإنجاز تصورات عددية باستعمال برنامج لاختبار عددي تأثير مرحلة تشبع هذه الأخيرة على انتقال السوائل في كتامة المركبات..

كلمات المفتاح: جيوستنتييك, حبس الماء, تشبع, كتامة المركبات

Listes des principaux symboles



Symboles grecs

γ_d	poids spécifique sec	$[M^{-2}.L.T^{-1}]$
γ_s	poids spécifique de grain	
μ	viscosité dynamique de l'eau	$[M.L^{-1}.T^{-1}]$
λ	indice de distribution de taille des pores de la relations de Brooks et Corey (1964)(1.12)	adim
Ψ	potentiel total de l'eau du sol	
Ψ_g	potentiel gravitationnel	
Ψ_m	potentiel matriciel	
Ψ_o	potentiel osmotique	
Ψ_p	potentiel de pression	
ρ_w	masse volumique de l'eau	$[M.L^{-3}]$
σ	tension superficielle	$[M.T^{-2}]$
θ	transmissivité d'interface	$[L^2.T^{-1}]$
θ_v	teneur en eau volumique	$[L^3.L^{-3}]$
θ_r	teneur en eau résiduelle	
θ_s	teneur en eau à saturation	
ν	viscosité cinématique	$[L^2.T^{-1}]$

Symboles latins

A	constante	[L]
B	constante	[L]
g	accélération de la pesanteur	$[L.T^{-2}]$
h	pression exprimée en hauteur d'eau	[L]
h_a	charge hydraulique dans une nappe	[L]
h_c	hauteur d'ascension capillaire	[L]
h_e	succion d'entrée d'air	
h_w	charge hydraulique appliquée sur l'étanchéité composite	[L]
H	charge hydraulique	[L]
H_s	épaisseur total de sol saturé	[L]
I_m	fonction modifiée de Bessel d'ordre m et de première espèce	
K	conductivité hydraulique non saturée	$[L.T^{-1}]$
K_m	fonction modifiée de Bessel d'ordre m et de troisième espèce ou fonction de MacDonald	adim
K_s	conductivité hydraulique à saturation ou coefficient de perméabilité	
n	porosité	adim
P	pression dans l'interface	[L]
P_c	pression capillaire	
P_h	masse de l'échantillon humide	[M]
P_s	masse de l'échantillon sec	[M]

Q	débit	$[L^3.T^{-1}]$
Q_r	débit radial à l'interface, pour une géométrie axisymétrique	$[L^3.T^{-1}]$
Q_s	débit d'infiltration dans le sol	$[L^3.T^{-1}]$
r	distance à l'axe de symétrie du défaut pour une géométrie axisymétrique	[L]
r_0	rayon du défaut dans la géomembrane	[L]
R_c	rayon physique du système étudié dans le cas d'une géométrie axisymétrique	[L]
s	épaisseur de l'interface	[L]
t	temps	[T]
T	température	[K]
u	succion	
v ou V	volume	$[L^3]$
w	teneur en eau massique	adim
w_{sat}	teneur en eau à saturation	
W	travail	$[L^2.M.T^{-2}]$
z	profondeur	[L]

Liste des acronymes



- ASTM : American Society for Testing and Materials
- CFG : Comité Français des Géosynthétiques
- CGB : Clay Geosynthetic Barrier
- EPDM : Ethylène-propylène-diène monomère
- GMB : Géomembrane
- GSB : Géosynthétique Bentonitique
- IGS : International Geosynthetic Society
- ISD : Installation de stockage de déchets
- NF : Norme Française
- PEBD : Polyéthylène basse densité
- PECS : Polyéthylène chlorosulfoné
- PEHD : Polyéthylène haute densité
- PP : Polypropylène
- PVC-P : Polychlorure de vinyle plastifié
- UV : Ultra-violets

Liste des figures



Figure 1: Représentation schématique de la structure de la montmorillonite, d'après CFG (1998)	12
Figure 2 : schéma des différents types de GSB (a) collé, (b) aiguilleté, (c) cousu, (d) géofilm bentonitique d'après CFG, (1998).	13
Figure 3: courbe caractéristique d'humidité	20
Figure 4 : courbes caractéristique d'humidité pour un sol sableux et argileux	21
Figure 5 : courbes log K- log h pour différents types de sols (hillel, 1977)	23
Figure 6 : schéma de la géométrie de l'étanchéité composite dans le cas axisymétrique (d'après Touze-Foltz, 2001)	24
Figure 7 : schéma de la géométrie radiale	26
Figure 7: Schéma de la cellule de mesure de transmissivité d'interface (Touze-Foltz et al 2002)	37
Figure 9 : principe de la plaque tensiométrique	47
Figure 10 : plaque tensiométrique	47
Figure 11: cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axes	48
Figure 12 : technique osmotique – relation succion et concentration	49
Figure 13 : Mise en oeuvre de la technique osmotique	50
Figure 14 : contrôle de succion par phase pratique	51
Figure 15 : principe de la mesure de la succion par tensiométrie	51
Figure 16 : tensiomètre de Ridley et al.	52
Figure 17 : Méthode du papier-filtre	53
Figure 18 : Matériels utilisés pour la technique du papier filtre	59
Figure 19 : schéma d'un capteur micropsychromètre	60
Figure 20 : l'équipement utilisé pour la calibration du micropsychromètre	62
Figure 21: courbe de calibration du micropsychromètre	62
Figure 22: le microvoltmètre	63
Figure 23: relation typique teneur en eau-succion	64
Figure 24: capteurs	65
Figure 25 : comparaison des résultats obtenus avec ceux de Daniel	66
Figure 26: comparaison des valeurs de succion avec les différentes équations proposées	68
Figure 27: comparaison des différentes courbes de rétention obtenues	68
Figure 28: comparaison de la courbe de Daniel (Gundseal) avec celle du Bentomat	69
Figure 29: comparaison des courbes de rétention obtenues avec les différentes équations proposées	70
Figure 30: comparaison des différentes courbes de rétention obtenues pour le Bentomat	70
Figure 31 : schéma de principe du maillage et des conditions aux limites imposées	76
Figure 32 : résultats de SEEP/W de la variation de l'épaisseur d'interface	77
Figure 33 : résultats de SEEP/W de l'influence de la variation de la charge hydraulique	78
Figure 34 : variation de la transmissivité d'interface	80
Figure 35 : variation de la transmissivité d'interface	80

Liste des tableaux



Tableau 1 : caractéristiques des différents types de GSB _____	14
Tableau 2 : conductivité hydraulique des GSB sous différentes conditions de test _____	35
Tableau 3 : notations _____	35
Tableau 4 : résultats en fin d'essai de Touze-Foltz et al (2002) _____	39
Tableau 5 : valeurs de succions correspondant aux différentes solutions salines _____	43
Tableau 6 : résultats teneur en eau-succion de Daniel et al. 1993 _____	44
Tableau 7: paramètres de Van Genuchten pour la bentonite _____	45
Tableau 8 : relation humidité relative – succion – nature du sel (en solution aqueuse saturée) _____	50
Tableau 9 : relation potentiel en eau-concentration de NaCl adapté par Lang (1967) _____	61
Tableau 10 : résumé des résultats du Gundseal _____	66
Tableau 11: résultats de la variation de la charge hydraulique _____	79
Tableau 12 : résultats de la variation de la transmissivité d'interface _____	79
Tableau 13: résultats de la variation de transmissivité d'interface _____	80
Tableau A-1 : fiche de préhydratation du Gundseal _____	94
Tableau A-2 : détermination des succions du Gundseal par la méthode du papier filtre _____	95
Tableau A-3: fiche de calcul de la teneur en eau volumique _____	96
Tableau A-4: calage Van Genuchten du Gundseal _____	97
Tableau A-5 : résultats obtenus avec les données de Babu pour le Gundseal _____	97
Tableau A-6 : fiche de préhydratation du Bentomat _____	98
Tableau A-7: fiche de préhydratation du Bentomat _____	99
Tableau A-8: calage Van Genuchten du Bentomat _____	100
Tableau A-9 : résultats obtenus avec les données de Babu pour le Bentomat _____	100
Tableau A-10: les différents pas de temps imposés _____	102

Introduction



Les étanchéités composites mises en place en fond des installations de stockage de déchets (ISD) sont généralement constituées par une couche d'étanchéité minérale compactée, de conductivité hydraulique inférieure à 10^{-9} m/s, surmontée par une géomembrane, matériau du génie civil, mince, souple et qui doit rester étanche même sous les sollicitations en service.

Les géomembranes présentent cependant des endommagements, qui peuvent constituer des passages préférentiels d'écoulement pour les lixiviats issus de la percolation des eaux météoriques à travers les déchets.

La réglementation française en matière d'étanchéité de fond d' ISD prévoit que l'étanchéité minérale puisse-être complétée ou remplacée par un dispositif équivalent. C'est à ce titre que les géosynthétiques bentonitiques (GSB), constituées de bentonite en poudre ou en granules emprisonnée entre deux géotextiles, peuvent être utilisés. Ces produits ne sont pas saturés en eau lors de leur mise en place. Il est cependant conseillé de les préhydrater. Une première étude a permis de montrer que le comportement hydraulique des GSB allait dépendre de cette préhydratation.

La question qui se pose donc est de déterminer quel va être le débit de fuite à travers l'association GSB – géomembrane en lien avec la préhydratation initiale. Un paramètre clé pour la réalisation de cette estimation est la connaissance des relations entre teneur en eau et succion pour les géosynthétiques bentonitiques, paramètres pour lesquels on dispose de très peu de données à l'heure actuelle.

Une première partie, fait état de la synthèse bibliographique qui a été menée durant le stage présentant tout d'abord en premier chapitre les matériaux de l'étude avec un rappel des différents paramètres physiques. En second chapitre, est traitée la modélisation mathématique des écoulements dans les étanchéités composites avec GSB, dans laquelle est présentée une solution analytique pour la quantification des débits de fuite à travers l'interface GSB/géomembrane. Le troisième chapitre, présente le comportement hydraulique des GSB. On s'intéresse plus particulièrement aux notions de conductivité hydraulique et de transmissivité, ainsi qu'aux facteurs influençant celles-ci.

L'objectif de notre travail étant de déterminer les courbes de rétention d'eau des GSB initialement non saturés, le dernier chapitre présente une synthèse des différentes méthodes de mesure des relations teneur en eau-succion pour les sols. Nous proposons à la suite de cette synthèse les méthodes que nous avons jugé applicables aux GSB.

La seconde partie du mémoire concerne l'expérimentation, elle présente dans un premier temps les différents protocoles de mesure des courbes de rétention établis au cours du stage, puis des résultats de mesure.

Une troisième et dernière partie, est consacrée aux simulations numériques des transferts ayant lieu dans l'interface GSB/GMB dans les deux cas lorsque GSB et interface sont saturés et non saturés, en utilisant les résultats obtenus expérimentalement.

Partie I
BIBLIOGRAPHIE

-Chapitre I-

Matériaux géosynthétiques d'étanchéité

1. Matériaux d'étanchéité :

On définit dans cette partie les différents géosynthétiques utilisés pour l'étanchéité, essentiellement géomembranes et GSB qui sont des éléments constitutifs des étanchéités composites. L'étude de ces éléments est impérative pour la compréhension de leur contribution à la problématique de la protection du milieu environnant les ISD.

1.1. Les géomembranes

1.1.1. Définition

Les géomembranes sont définies comme des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus, d'épaisseur supérieure à 1 mm, étanches aux liquides même sous les sollicitations en service (Norme NF P 84-500, 1991).

1.1.2. Les différents types de géomembranes

Il existe deux catégories de géomembranes : les bitumineuses et les géomembranes de synthèse (Lambert, 1997). Les premières sont constituées d'un géotextile (voir définition au paragraphe 1.3.) imprégné par du bitume oxydé ou polymère. Les secondes sont élaborées à partir de résines thermoplastiques, d'élastomères ou d'alliages élastomères-thermoplastiques.

L'éthylène-propylène-diène-monomère (EPDM) est le polymère élastomère le plus utilisé pour la fabrication des géomembranes. Les résines thermoplastiques les plus utilisées sont le polypropylène (PP), le polyéthylène haute densité (PEHD) ou basse densité (PEBD) et le polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P).

En plus du polymère de base, des adjuvants rentrent dans la fabrication des géomembranes notamment des anti ultra-violets (UV) et des anti oxydants. L'anti UV le plus utilisé est le noir de carbone ; c'est lui qui donne une couleur noire à la plupart géomembranes.

1.1.3. Mise en place et utilisations

En général, les géomembranes sont conditionnées en rouleaux d'une largeur supérieure à (1,5 m), (Lambert, 1997). Après la pose des différents rouleaux, ceux-ci doivent être collés ou soudés entre eux pour permettre une bonne continuité de l'étanchéité.

Les géomembranes sont utilisées dans les ouvrages hydrauliques (barrages, digues, etc.), les bassins de rétention d'eau, les canaux, les ouvrages souterrains, ainsi que dans les centres de stockage d'effluents industriels ou agricoles et dans les ISD.

1.1.4. Sollicitations exercées sur les géomembranes et conséquences

Lors de leur utilisation, les géomembranes vont être soumises à des sollicitations :

- physico-chimiques : agressions dues aux UV ou aux lixiviats par exemple ;
- mécaniques : tractions dues à une dilatation thermique ou poinçonnement dû au passage d'un engin lors de la mise en place de la couche drainante (drains + massif drainant servant à collecter les lixiviats, (figure1)).

Ces différents phénomènes entraînent une fragilisation de la géomembrane pouvant aboutir à la formation d'un défaut : trou lié à un poinçonnement local de la géomembrane, déchirure, coupure (Colucci et Lavagnolo, 1995). Ces défauts peuvent apparaître soit au cours de la pose de la couche granulaire, soit pendant la période d'exploitation du site lors de la mise en place des déchets. A ces défauts s'ajoutent ceux provenant de défauts de soudure (défaut dans le canal de soudure, perforation de la géomembrane due à la chaleur de soudure, etc).

1.2. Les géofilms

Les géofilms (CFG, 1998) sont des nappes de polymères ayant une épaisseur fonctionnelle inférieure à 1mm. Ils servent à limiter les transferts entre deux milieux (séparation et imperméabilisation) dans les domaines du génie civil et de la géotechnique.

1.3. Les géotextiles

Les géotextiles (d'après le CFG) sont des matériaux textiles. Les fibres synthétiques qui les constituent sont perméables à l'eau et à l'air. Ils sont employés en génie civil et en géotechnique, en contact avec des sols ou d'autres matériaux de construction. Les principaux polymères constituant les géotextiles sont le polyester, le polypropylène, le polyamide, le polyéthylène et l'aramide.

Il existe trois grandes familles de géotextiles :

- Les tissés résultant de l'entrecroisement à angle droit de deux ou plusieurs systèmes de fils, fibres, filaments, bandelettes ou d'autres éléments ;
- Les non-tissés constitués de fibres courtes ou de filaments continus répartis de manière aléatoire, et dont la cohésion est assurée par un traitement de liaison chimique, thermique ou mécanique (aiguilletage) ;
- Les tricotés composés d'un réseau de fibres d'armatures longitudinales déposées perpendiculairement sur un réseau transversal. Celles-ci sont liées par un fil de couture aux points d'intersection.

Dans le cas des GSB, les géotextiles se limitent aux fonctions suivantes :

- Séparation ;
- Renforcement ;
- Protection ;
- Fonction « conteneur ».

1.4. Les géosynthétiques bentonitiques

1.4.1. Définition

Un géosynthétique bentonitique (GSB) est un composite d'éléments synthétiques et minéraux. C'est un produit manufacturé en forme de nappe associant des géosynthétiques à de la bentonite, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil et assurant un rôle d'étanchéité (Rollin et al., 2000).

L'International Geosynthetic Society (IGS) donne la définition suivante: « Clay Geosynthetic Barrier (CGB) – an assembled structure of geosynthetic materials and low hydraulic conductivity earth material (clay or bentonite), in the form of a manufactured sheet, used in contact with soil/rock and/or any other materials in civil engineering applications » (Rollin et al., 2000).

Avant de présenter les différents types de GSB, une présentation de la bentonite et de ses propriétés va être effectuée.

1.4.2. La bentonite

La bentonite est l'argile qui assure la fonction étanchéité des GSB avec des propriétés extraordinaires, telles que la capacité très élevée de gonflement en absorbant de l'eau, capacité élevée d'échange cationique et faible perméabilité à l'eau. Les bentonites de haute qualité comme celles utilisées dans les GSB comprennent principalement le minéral montmorillonite ($\approx 75-90\%$ de leur poids).

A l'origine, les termes bentonite et montmorillonite étaient synonymes et servaient à désigner un même minéral, découvert presque simultanément à Montmorillon en France et à Fort Benton dans le Dakota du sud. Nous utiliserons indifféremment les termes montmorillonite (le minéral) ou bentonite (le produit commercial).

Les performances des GSB reposent sur les propriétés de gonflement et d'absorption d'eau des bentonites.

1.4.2.1. minéralogie et structure des bentonites

Les ouvrages cités en bibliographie Caillère et Hénin (1963), Millot (1964), Brindley et Brown (1980), Caillère et al. (1982), Gaboriau H. (1998) sont la base de la présentation qui va suivre.

Du point de vue granulométrique, les argiles correspondent à la fraction inférieure à 2 microns d'un sol ou d'une formation géologique. Minéralogiquement, elles sont définies comme des minéraux aluminosilicates, le plus souvent de la famille des phyllosilicates, qui sont formés de particules dont les unités sont des feuillettes d'épaisseur de 0,7/1,0 ou 1,4 nm.

1.4.2.1.1. structure cristallographique des phyllosilicates

L'unité de base des argiles est le feuillet. Les feuillettes ont une forme caractéristique en plaquettes hexagonales ou parfois en fibre. Ils résultent de la superposition de feuillettes composés de couches tétraédriques (couche T) de $(\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)^{-6}$ et de couches octaédriques (couche O) à base de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$, (figure 1).

1.4.2.1.2. structure cristallographique des smectites (montmorillonites)

Le constituant majeur de la bentonite est la montmorillonite. Ce minéral fait partie du groupe des smectites qui regroupe des argiles à trois couches (T-O-T). Le feuillet élémentaire de montmorillonite rassemble deux couches tétraédriques de SiO_2 entre lesquelles se situe une couche octaédrique d' Al_2O_3 , avec parfois une substitution de cations Al^{3+} par Fe^{2+} ou Mg^{2+} (CFG, 1998), (figure 1).

Les propriétés d'hydratation et de gonflement remarquables des smectites conduisent à désigner ces argiles par le terme d'argiles gonflantes.

De ces substitutions résulte un déséquilibre de charge à la surface du feuillet. Des ions comme Na^+ et Ca^{2+} viennent alors neutraliser ces charges. On définit ainsi la bentonite sodique naturelle et la bentonite calcique naturelle.

Les smectites (montmorillonite), se distinguent en particulier par :

- Leur propriété de gonflement qui permet le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à posteriori ;
- Une très faible conductivité hydraulique à long terme : pour des densités sèches variant de 0,5 à 2,2, la fourchette de conductivité hydraulique de la bentonite varie entre 10^{-14} et 10^{-11} m.s^{-1} (CFG, 1998) ; d'où son rôle pour l'étanchéité dans les GSB ;
- Des propriétés d'échange et d'absorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants.

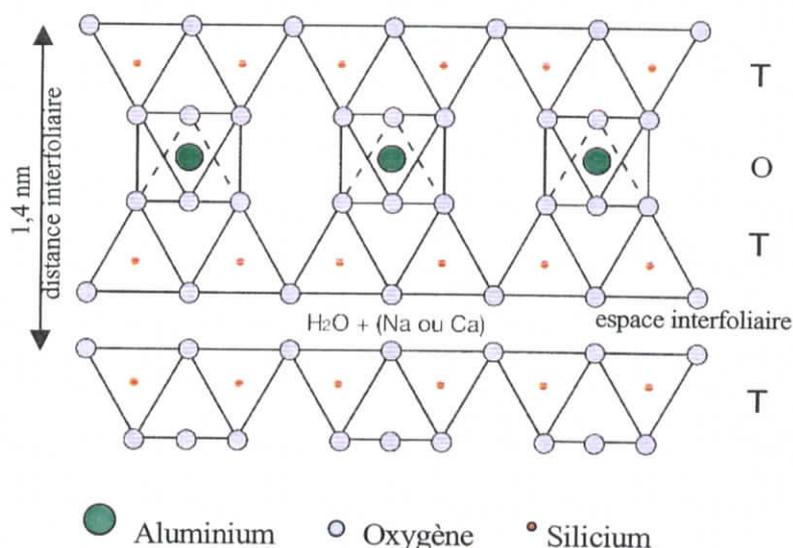


Figure 1: Représentation schématique de la structure de la montmorillonite, d'après CFG (1998)

Du fait de leur petite taille, les argiles offrent une surface spécifique très importante pouvant atteindre $700 \text{ m}^2/\text{g}$ pour les montmorillonites. Un fluide polaire comme l'eau peut alors pénétrer dans les espaces interfoliaires ce qui engendre une augmentation de volume ou, à volume constant, l'apparition d'une pression de gonflement. Or plus la bentonite est gonflée, plus sa conductivité hydraulique diminue. C'est l'une des raisons principales de son utilisation dans les GSB.

1.4.3. Les différents types de GSB

les GSB sont composés des deux familles de produits suivants :

1.4.3.1. Les géotextiles bentonitiques

Produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comprenant au moins un géotextile et de la bentonite assurant le rôle d'étanchéité :

- Les collés, composés de deux géotextiles entre lesquels se trouve une couche de bentonite. L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble. Cette colle assure la cohésion de la couche de bentonite lors des étapes de fabrication et de pose (voir figure 2.a) ;
- Les aiguilletés, constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue une couche de bentonite par aiguilletage sur toute sa surface. (l'aiguilletage est réalisé par de nombreux points de piquage au moyen d'aiguilles crochetées. Ainsi, les fibres d'un des géotextiles sont ancrées dans l'autre géotextile en traversant la couche de bentonite) (voir figure 2.b) ;
- Les cousus, constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue la couche de bentonite. Les couches sont liées entre elles par un système de couture ou de liens (voir figure 2.c).

1.4.3.2. Les géofilms bentonitiques

Ils sont composés d'un géofilm, d'une couche de bentonite et éventuellement d'un géotextile. L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble et/ou par couture (voir figure 2.d).

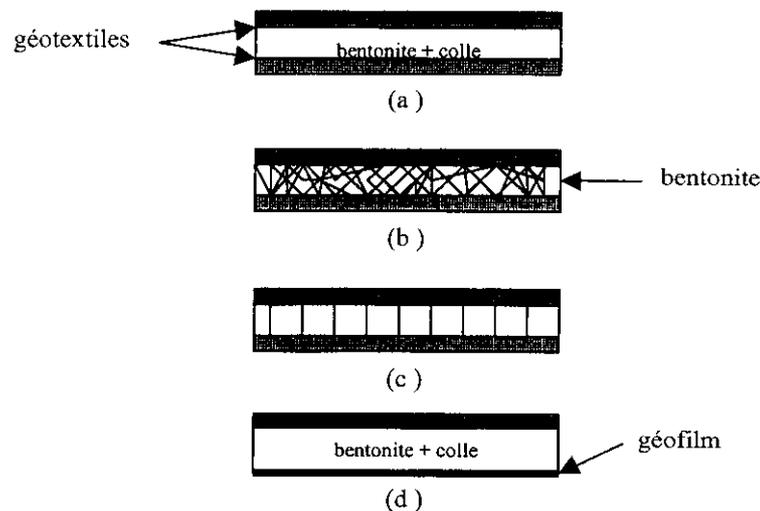


Figure 2 : schéma des différents types de GSB (a) collé, (b) aiguilleté, (c) cousu, (d) géofilm bentonitique d'après CFG, (1998).

Le tableau 1 présente les caractéristiques des principaux géosynthétiques bentonitiques existants sur le marché.

1.4. Les géosynthétiques bentonitiques

1.4.1. Définition

Un géosynthétique bentonitique (GSB) est un composite d'éléments synthétiques et minéraux. C'est un produit manufacturé en forme de nappe associant des géosynthétiques à de la bentonite, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil et assurant un rôle d'étanchéité (Rollin et al., 2000).

L'International Geosynthetic Society (IGS) donne la définition suivante: « Clay Geosynthetic Barrier (CGB) – an assembled structure of geosynthetic materials and low hydraulic conductivity earth material (clay or bentonite), in the form of a manufactured sheet, used in contact with soil/rock and/or any other materials in civil engineering applications » (Rollin et al., 2000).

Avant de présenter les différents types de GSB, une présentation de la bentonite et de ses propriétés va être effectuée.

1.4.2. La bentonite

La bentonite est l'argile qui assure la fonction étanchéité des GSB avec des propriétés extraordinaires, telles que la capacité très élevée de gonflement en absorbant de l'eau, capacité élevée d'échange cationique et faible perméabilité à l'eau. Les bentonites de haute qualité comme celles utilisées dans les GSB comprennent principalement le minéral montmorillonite ($\approx 75-90$ % de leur poids).

A l'origine, les termes bentonite et montmorillonite étaient synonymes et servaient à désigner un même minéral, découvert presque simultanément à Montmorillon en France et à Fort Benton dans le Dakota du sud. Nous utiliserons indifféremment les termes montmorillonite (le minéral) ou bentonite (le produit commercial).

Les performances des GSB reposent sur les propriétés de gonflement et d'absorption d'eau des bentonites.

1.4.2.1. minéralogie et structure des bentonites

Les ouvrages cités en bibliographie Caillère et Hénin (1963), Millot (1964), Brindley et Brown (1980), Caillère et al. (1982), Gaboriau H. (1998) sont la base de la présentation qui va suivre.

Du point de vue granulométrique, les argiles correspondent à la fraction inférieure à 2 microns d'un sol ou d'une formation géologique. Minéralogiquement, elles sont définies comme des minéraux aluminosilicates, le plus souvent de la famille des phyllosilicates, qui sont formés de particules dont les unités sont des feuillets d'épaisseur de 0,7/1,0 ou 1,4 nm.

1.4.2.1.1. structure cristallographique des phyllosilicates

L'unité de base des argiles est le feuillet. Les feuillets ont une forme caractéristique en plaquettes hexagonales ou parfois en fibre. Ils résultent de la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques (couche T) de $(\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)^{-6}$ et de couches octaédriques (couche O) à base de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$, (figure 1).

1.4.2.1.2. structure cristallographique des smectites (montmorillonites)

Le constituant majeur de la bentonite est la montmorillonite. Ce minéral fait partie du groupe des smectites qui regroupe des argiles à trois couches (T-O-T). Le feuillet élémentaire de montmorillonite rassemble deux couches tétraédriques de SiO_2 entre lesquelles se situe une couche octaédrique d' Al_2O_3 , avec parfois une substitution de cations Al^{3+} par Fe^{2+} ou Mg^{2+} (CFG, 1998), (figure 1).

Les propriétés d'hydratation et de gonflement remarquables des smectites conduisent à désigner ces argiles par le terme d'argiles gonflantes.

De ces substitutions résulte un déséquilibre de charge à la surface du feuillet. Des ions comme Na^+ et Ca^{2+} viennent alors neutraliser ces charges. On définit ainsi la bentonite sodique naturelle et la bentonite calcique naturelle.

Les smectites (montmorillonite), se distinguent en particulier par :

- Leur propriété de gonflement qui permet le remplissage des fissures existantes ou qui se développeraient à posteriori ;
- Une très faible conductivité hydraulique à long terme : pour des densités sèches variant de 0,5 à 2,2, la fourchette de conductivité hydraulique de la bentonite varie entre 10^{-14} et 10^{-11} m.s^{-1} (CFG, 1998) ; d'où son rôle pour l'étanchéité dans les GSB ;
- Des propriétés d'échange et d'absorption aptes à retenir préférentiellement certains polluants.

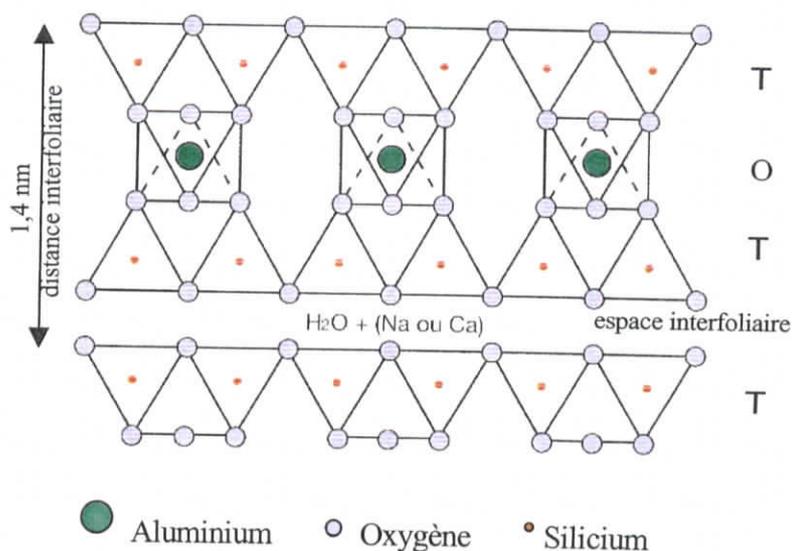


Figure 1: Représentation schématique de la structure de la montmorillonite, d'après CFG (1998)

Du fait de leur petite taille, les argiles offrent une surface spécifique très importante pouvant atteindre $700 \text{ m}^2/\text{g}$ pour les montmorillonites. Un fluide polaire comme l'eau peut alors pénétrer dans les espaces interfoliaires ce qui engendre une augmentation de volume ou, à volume constant, l'apparition d'une pression de gonflement. Or plus la bentonite est gonflée, plus sa conductivité hydraulique diminue. C'est l'une des raisons principales de son utilisation dans les GSB.

1.4.3. Les différents types de GSB

les GSB sont composés des deux familles de produits suivants :

1.4.3.1. Les géotextiles bentonitiques

Produit manufacturé en forme de nappe, constitué d'un assemblage de matériaux comprenant au moins un géotextile et de la bentonite assurant le rôle d'étanchéité :

- Les collés, composés de deux géotextiles entre lesquels se trouve une couche de bentonite. L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble. Cette colle assure la cohésion de la couche de bentonite lors des étapes de fabrication et de pose (voir figure 2.a) ;
- Les aiguilletés, constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue une couche de bentonite par aiguilletage sur toute sa surface. (l'aiguilletage est réalisé par de nombreux points de piquage au moyen d'aiguilles crochetées. Ainsi, les fibres d'un des géotextiles sont ancrées dans l'autre géotextile en traversant la couche de bentonite) (voir figure 2.b) ;
- Les cousus, constitués d'un géotextile support et d'un géotextile de couverture entre lesquels est contenue la couche de bentonite. Les couches sont liées entre elles par un système de couture ou de liens (voir figure 2.c).

1.4.3.2. Les géofilms bentonitiques

Ils sont composés d'un géofilm, d'une couche de bentonite et éventuellement d'un géotextile. L'ensemble est maintenu par une colle hydro-soluble et/ou par couture (voir figure 2.d).

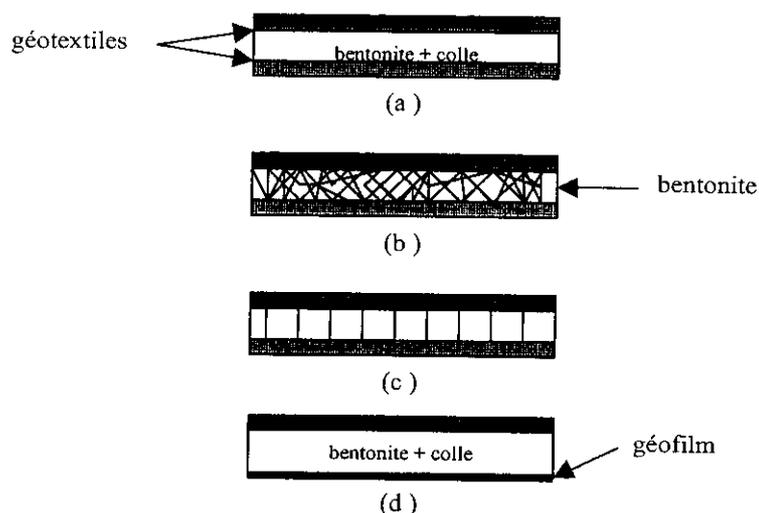


Figure 2 : schéma des différents types de GSB (a) collé, (b) aiguilleté, (c) cousu, (d) géofilm bentonitique d'après CFG, (1998).

Le tableau 1 présente les caractéristiques des principaux géosynthétiques bentonitiques existants sur le marché.

Produit	Masse/surf nominale (Kg/m ²)	Bentonite Masse/surf (kg/m ²)	Géosynth sup	Géosynth inf	Méthode de construction
BF1 (Bentofix NW)	4.16	3.5	NW	NW	NP
BF2 (Bentofix NS)	5.39	4.9	W	NW	NP
BF3 (Bentofix NW5000)	5.55	4.9	NW	NW	NP
BF4 (Bentofix BFG5000)	5.50	4.7	W	NW:B	NP
BM (Bentomat SS)	5.22	4.9	W	NW	NP
CL (Claymax 200R)	5.05	4.9	W	W	G
GS (Gundseal, régulier)	Variable	5.0	-	GMB PEHD	G
GSC (Gundseal, résistant aux contaminants)	variable	5.0	-	GMB PEHD	G

NW : non tissé ; W : tissé ; GMB : géomembrane ; NW : B : Bentonite imprégnée ; NP : aiguilleté ; G : collé.

Tableau 1 : caractéristiques des différents types de GSB

Les valeurs nominales et celles de la bentonite sont données par la norme ASTM D5261.

Les GSB sont posés alors que la bentonite est sèche. Elle sera hydratée par la suite, soit par les défauts dans la géomembrane, soit pré hydratée, la plupart du temps au contact du sol posé.

Elle n'est généralement pas saturée au moment où les premiers transferts liés aux défauts de la GMB apparaissent. C'est pour cette raison que l'on s'intéresse aux caractéristiques non saturées de ces matériaux.

2- Paramètres physiques

La bentonite est constituée d'un arrangement de particules solides, de minéraux et de matière organique, séparés par des espaces remplis d'air ou d'eau. Ce paragraphe a pour objectif de faire un rappel de certaines notions physiques relatives aux répartitions de l'air et de l'eau dans les vides d'un sol donné. Afin de décrire le milieu poreux non saturé, on utilise des grandeurs moyennes à l'intérieur d'un volume élémentaire représentatif (Brun, 1989).

2.1. Porosité « n »

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides au volume total de sol.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

(éq 1)

où :

V_v : volume des vides ($V_{\text{eau}} + V_{\text{air}}$)

V : volume total ($V_{\text{eau}} + V_{\text{air}} + V_{\text{sec}}$)

2.2. Teneur en eau massique « w »

Elle est définie comme étant le rapport, pour un volume de sol considéré, du poids d'eau qu'il contient au poids de sol sec, donné par l'équation :

$$w = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (\text{éq 2})$$

où : P_h : poids de l'échantillon humide ;
 P_s : poids de l'échantillon sec.

2.3. Teneur en eau à saturation « w_{sat} »

Elle est définie comme étant le rapport du poids de l'eau à saturation au poids de sol sec.

$$w_{sat} = \frac{P_{causat} - P_s}{P_s} \quad (\text{éq-3})$$

où : P_{causat} : poids de l'eau à saturation
 P_s : poids de sol sec

2.4. Degré de saturation « S_r »

Le degré de saturation en eau d'un sol est défini comme la fraction du volume des vides occupée par l'eau. Le sol est dit saturé lorsque l'intégralité des vides du sol est remplie par de l'eau.

$$S_r = \frac{w}{w_{sat}} \cdot 100 \quad (\text{éq-4})$$

2.5. Densité sèche « γ_d »

La densité sèche d'un sol est définie comme le rapport de la masse de sol sec dans un volume donné à ce volume, rapporté à la masse volumique de l'eau.

$$\gamma_d = \frac{P_{sec}}{V} \quad (\text{éq-5})$$

2.6. Teneur en eau volumique « θ_v »

Elle est définie comme étant le volume d'eau par unité de volume de sol. La teneur en eau volumique peut-être calculée à partir de la relation suivante (Velley 2002) :

$$\theta_v = w \frac{\gamma_d}{\rho_w} \quad (\text{éq-6})$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau.

-Chapitre II-

Modélisation mathématique des écoulements dans les étanchéités composites avec GSB

Ce chapitre s'intéresse à la modélisation des transferts advectifs, dans le GSB et à l'interface GSB/GMB, interface qui sera définie dans la suite de ce chapitre.

Le principe d'écoulement de l'eau dans le sens de la décroissance de son énergie totale, sera abordé par une approche énergétique et appliqué aux relations sol-eau.

1. Potentiel de l'eau dans le sol

La notion de potentiel de l'eau du sol, introduite par Buckingham (1907), caractérise l'énergie retenant l'eau dans le sol à n'importe quelle teneur en eau. Elle représente le travail unitaire qu'il est nécessaire de fournir pour passer d'un état donné de l'eau dans un solide poreux à une cote donnée à celui de l'eau libre et pure à une cote de référence.

Il est exprimé en unités de pression (Pa) ou de longueur (m), et est noté ψ . C'est la somme des potentiels associés à chaque catégorie de forces agissant sur l'eau :

- Le potentiel gravitationnel ψ_g , est le potentiel correspondant à l'action de la pesanteur ;
- Le potentiel matriciel ψ_m , est le potentiel lié aux interactions eau-air-matrice dans un sol non saturé ;
- Le potentiel osmotique ψ_o , est dû à la présence de sels dans l'eau ;
- Le potentiel de pression ψ_p .

Pour notre étude, nous avons retenus les potentiels concernant les sols saturés ou non saturés (Velly, 2000); le potentiel de pression, matriciel et gravitationnel dont la somme constitue le potentiel total :

Pour un sol non saturé : $\boxed{\psi = \psi_m + \psi_g}$ (éq-7)

Pour un sol saturé : $\boxed{\psi = \psi_p + \psi_g}$ (éq-8)

1.1.Potentiel gravitationnel

le potentiel gravitationnel s'exprime sous la forme suivante :

$$\Psi_g = \frac{W_0^z}{dv} = \frac{dm \cdot g \cdot z}{\rho_w} = \rho_w \cdot g \cdot z \quad (\text{éq-9})$$

avec :

W_0^z : travail nécessaire pour transférer dans le champ de la pesanteur la masse d'eau

dm : du plan de référence au point dont la cote est z par rapport à ce plan

dv : volume élémentaire

ρ_w : masse volumique de l'eau

g : accélération de la pesanteur

1.2. Potentiel matriciel

Le potentiel matriciel est le travail à fournir pour transporter de façon réversible et isotherme une quantité unitaire d'eau du récipient de référence à l'eau du sol les deux étant situés à la même cote. En se rapportant à l'unité de volume, le potentiel matriciel peut s'exprimer sous la forme d'une pression, négative, de l'eau interstitielle notée p . on appelle succion de l'eau du sol, la quantité positive u telle que :

$$u = -p \quad (p \leq 0) \quad \text{et} \quad u = 0 \quad (p > 0) \quad (\text{éq-10})$$

Si p est positif, le potentiel matriciel est nul et est substitué par le potentiel de pression.

Ψ_m est, de ce fait appelé *potentiel de succion*.

1.3. Charge hydraulique

Le potentiel total ψ peut s'exprimer en terme de charge hydraulique $H(m)$ en se rapportant à l'unité de poids et non plus de volume. En milieu saturé, la charge hydraulique est définie par :

$$H = \frac{\Psi}{\rho_w \cdot g} = \frac{\Psi_g}{\rho_w \cdot g} + \frac{\Psi_p}{\rho_w \cdot g} \quad \text{ou :} \quad H = \frac{\Psi}{\rho_w \cdot g} - z \quad (\text{éq-11})$$

En notant que $h = \frac{\Psi}{\rho_w \cdot g}$, qui représente une pression exprimée en hauteur de colonne d'eau équivalente, on obtient :

$$H = h - z \quad (\text{éq-12})$$

Ceci est également valable en milieu non saturé où h , négatif, représente le potentiel matriciel rapporté à l'unité de poids.

1.4. Succion

La succion dans les sols a été définie en géotechnique, dans un contexte thermodynamique, comme une énergie potentielle comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés. Cette définition est analogue à celle du potentiel électrique d'une charge dans un champ électrique :

pour amener, à l'altitude constante, de l'eau libre de l'infini jusqu'au sol non saturé, il faut fournir une énergie pour résister à l'attraction exercée ; il s'ensuit, par définition, que la valeur du potentiel capillaire ou matriciel est négative. Ce potentiel est égal à « la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à altitude constante et à pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé ».

Habituellement, le potentiel ou succion, est exprimé soit en unité de pression ou en hauteur d'eau. Cette dernière unité est plus courante chez les agronomes, qui utilisent *la notion de pF*, qui représente *le logarithme décimal de la valeur absolue de la succion, exprimée en cm d'eau*.

2. Capillarité

Les phénomènes de capillarité se produisent à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interaction non équilibrées. A la différence d'une molécule d'eau au sein d'une masse d'eau qui est soumise à des actions de même nature, celle à l'interface entre deux fluides est soumise à des actions différentes dues aux deux fluides.

Une énergie superficielle dite tension interfaciale, qui dépend de la nature des fluides ainsi que de la température, résulte de la différence entre ces forces et représente l'énergie qu'il faut vaincre pour augmenter l'aire de l'interface séparant les fluides.

La pression capillaire est égale à la différence de pression à travers une surface séparant deux fluides i et j non miscibles. Cette grandeur est donnée par la loi de Laplace (Delage et al, 2002), qui se simplifie dans l'hypothèse de pores cylindriques et prend l'expression de la loi de Jurin :

$$p_c = p_i - p_j = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot \cos \theta^{\wedge}}{r} = \rho_w \cdot g \cdot h_c \quad (\text{éq-13})$$

avec :

- σ_s : tension superficielle du liquide
- θ^{\wedge} : angle de raccordement ou de mouillabilité
- r : rayon du capillaire (m)
- h_c : hauteur d'ascension capillaire

La loi de Jurin permet de calculer pour une pression donnée et appliquée à un sol en surface un rayon d'accès de pore équivalent. Cette équation est classiquement utilisée dans le modèle capillaire qui assimile le sol à un faisceau de tubes capillaires. Cependant, ce modèle est très schématique car les pores du sol ne sont pas des tubes capillaires de rayons constants et uniformes et il néglige les effets d'interconnexion des pores.

3. Equations d'écoulement

Les équations régissant les transferts d'eau en milieu non saturé ont été initialement définies dans le cas de sols saturés indéformables, avec continuité de la phase gazeuse, ce qui permet de considérer qu'à tout instant la pression d'air est égale à la pression atmosphérique. Seules les équations décrivant la dynamique de l'eau dans le sol sont alors à définir.

3.1. Equation de Darcy

- En milieu saturé isotrope, l'écoulement de l'eau est décrit par l'équation de Darcy :

$$\vec{q} = -K_s \cdot \vec{\text{grad}}H \quad (\text{éq-14})$$

où :

- \vec{q} : flux volumique ou vitesse de filtration de l'eau
- K_s : conductivité hydraulique à saturation ou coefficient de perméabilité
- $\vec{\text{grad}}H$: gradient de charge hydraulique

- En milieu non saturé, l'équation de Darcy reste valable et se généralise sous la forme :

$$\vec{q} = -K \cdot \vec{\text{grad}}H \quad (\text{éq-15})$$

où :

- K : conductivité hydraulique non saturée est fonction de la teneur en eau (ou de la succion)
- $K = K(\theta) = K(h)$

3.2. Equation de continuité

D'après le principe de conservation de la masse, la variation de quantité d'eau dans un élément de volume élémentaire est égale à la somme algébrique des quantités qui y pénètrent et de celles qui en sortent. L'eau étant considérée incompressible, on a la relation suivante :

$$\text{div}(\vec{q}) = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{éq-16})$$

avec : $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ et $\frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{d\theta}{dh}$ quand la relation $\theta - h$ est biunivoque

$\frac{d\theta}{dh}$ étant le terme de capacité capillaire C , la relation (éq-16) devient :

$$\text{div}(\vec{q}) = -C \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{éq-17})$$

3.3. Equation généralisée de Richards

La combinaison de l'équation de Darcy avec l'équation de continuité, permet d'obtenir l'équation généralisée de Richards pour un écoulement dans un système de coordonnées cylindriques avec symétrie de révolution :

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (\text{éq-18})$$

4. Paramètres hydrodynamiques

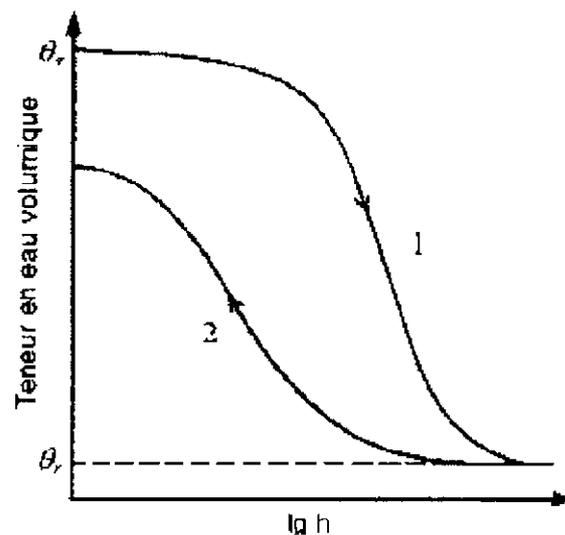
Les relations analytiques liant la conductivité hydraulique et la capacité capillaire à la succion h indispensables à la résolution de l'équation de Richards, sont données ci-après.

4.1. Relations caractéristiques de succion-teneur en eau (Velly, 2000)

4.1.1. courbe caractéristique d'humidité

Chaque type de sol possède une relation entre la pression négative h (ou succion $-h$) et la teneur en eau volumique. Sa courbe caractéristique est appelée courbe caractéristique d'humidité ou courbe de rétention capillaire dans un repère $\theta - h$ ou $\theta - \log|h|$, (figure 3).

Le point de départ est considéré comme le point où le sol est à teneur en eau à saturation. Aucune variation de θ ne se produit lorsqu'une succion croissante est appliquée à l'eau jusqu'à atteindre une certaine valeur critique nommée pression d'entrée d'air h_e , elle correspond à la valeur de succion pour laquelle les plus grands pores se vident. La relation de Jurin permet de prévoir que les pores les plus fins se vident lorsque la succion est augmentée. C'est ce qu'on appelle le drainage. Du fait que l'eau n'obéit plus aux lois de capillarité, seuls les pores les plus fins retiennent l'eau des pressions élevées correspondant à la teneur en eau résiduelle θ_r .



1 : courbe d'imbibition, 2 : courbe de drainage

Figure 3: courbe caractéristique d'humidité

Pour un potentiel donné, la teneur en eau est plus faible à l'imbibition qu'au drainage. On définit alors l'**hystérésis** comme la dépendance entre la teneur en eau et l'état du sol selon le sens du processus. Elle est due à la différence de l'angle de mouillabilité au drainage et à l'imbibition. Le point final de la courbe d'imbibition peut différer du point de départ de la courbe de drainage du fait d'un piégeage d'air dans le sol (hystérésis géométrique due à la morphologie du milieu poreux).

Des courbes caractéristiques d'humidité et drainage sont présentées pour différents types de sols sur la figure 4.

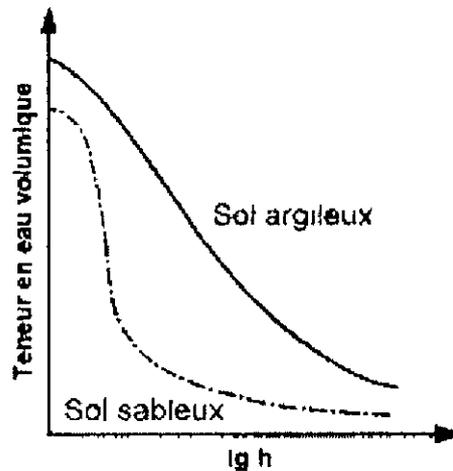


Figure 4 : courbes caractéristique d'humidité pour un sol sableux et argileux

4.1.3. Relations proposées pour les courbes de succion-teneur en eau

Plusieurs équations empiriques ont été proposées afin de décrire la relation liant la succion à la teneur en eau :

- La relation de Brooks et Corey (1964) qui exprime la teneur en eau comme un rapport de teneurs en eau en fonction de la pression. Cette équation n'est applicable que lorsque la pression est supérieure à la pression d'entrée d'air h_e . Plusieurs études l'ont reprise et vérifié (Gardner et al, 1970, Mc Cuen et al, 1981), elle se traduit par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_e}{h}\right)^\lambda & \rightarrow h < h_e \\ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = 1 & \rightarrow h \geq h_e \Rightarrow \theta = \theta_s \end{cases}$$

(éq-19)

avec λ : indice de distribution de taille des pores.

Gardner (1970), a proposé une relation qui n'est valable que pour la gamme de teneurs en eau faibles :

$$\boxed{h = a\theta^{-b} \Rightarrow \theta = \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{b}}} \quad \text{d'où : } \theta_r = 0 \quad \text{pour } |h| \rightarrow \infty \quad \text{(éq-20)}$$

Avec a et b des paramètres d'ajustement.

- La relation de Visser (1966) qui fait intervenir la porosité du sol :

$$h = a \cdot \frac{(n - \theta)^b}{\theta^c} \quad (\text{éq-21})$$

où :

n : la porosité

n-θ : teneur en air

a,b,c : constantes telles que :

$$0 < a < 3$$

$$0 < b < 10$$

$$0.4 < n < 0.6$$

- La relation de Van Genuchten (1980) est la plus utilisée pour décrire analytiquement la relation succion-teneur en eau :

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \left\{ \frac{1}{1 + ((\alpha\psi)^n)} \right\}^m \quad (\text{éq-22})$$

Où :

Θ : saturation effective

ψ : succion

α, n et m : paramètres d'ajustement de la relation

avec :

$$m = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (\text{éq-23})$$

pour : $\theta_r = 0 \quad \Rightarrow \quad \Theta = \frac{\theta}{\theta_s} = \text{degré de saturation}$

4.2.la fonction de conductivité hydraulique

Afin de caractériser les transferts hydriques, il est indispensable de mesurer la conductivité hydraulique. Elle est fonction de l'humidité du sol. Elle croît avec la pression de l'eau du sol et décroît avec la succion, du fait que le potentiel de l'eau du sol augmente avec la teneur en eau.

La conductivité hydraulique est maximale à saturation et traduit la capacité du sol à conduire de l'eau pour un gradient hydraulique unitaire.

Plusieurs relations ont été proposées liant la conductivité hydraulique à la teneur en eau ou à la succion :

- La relation de Gardner (1958) exprime la conductivité hydraulique sous forme exponentielle :

$$K(h) = K_s e^{\alpha h}$$

(éq-24)

Avec : $\alpha > 0$; $h \leq 0$

Où :

α : paramètre du sol, appelé aussi nombre « sorptif » ou « paramètre alpha », qui détermine l'importance relative des forces gravitaires et capillaires durant les mouvements d'eau dans le sol non saturé. Si α est grand, la gravité est dominante.

Ce paramètre représente la pente de la courbe de $\ln K$ en fonction de h . α aura une valeur différente entre le drainage et l'imbibition du fait de l'hystérésis. Il a une valeur plus importante en imbibition qu'en drainage.

La conductivité diminue lorsque $|h|$ augmente. La représentation graphique $\lg K - \lg|h|$ est fréquemment utilisée, du fait de la gamme de variation (figure 5).

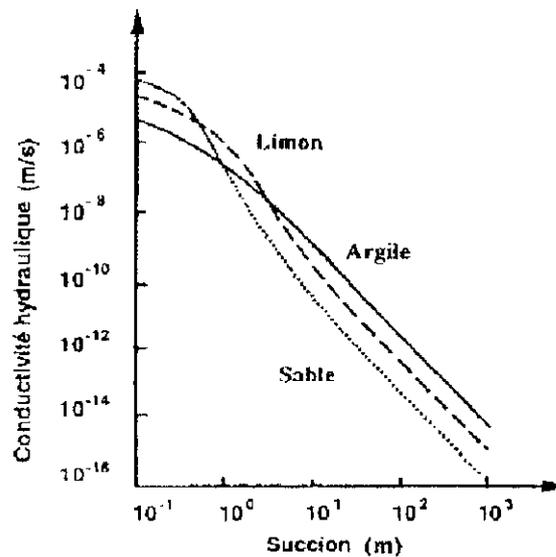


Figure 5 : courbes $\log K - \log h$ pour différents types de sols (hillel, 1977)

- Brooks et Corey (1964) ont établi une relation entre la conductivité hydraulique K et la teneur en eau volumique θ :

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta$$

(éq-25)

Avec β : paramètre de forme dépendant de la nature du sol.

Van Genuchten (1980) a réécrit cette équation en exprimant la conductivité hydraulique en fonction de la succion :

$$K(\psi) = K_s \cdot S_r \left(1 - \left(1 - S_r \frac{1}{r} \right)^m \right)^2 \quad (\text{éq-26})$$

Les paramètres intervenants dans les différentes relations citées ci-dessus, n'ont pas de signification physique, ce sont des paramètres d'ajustement seulement.

Le potentiel de pression représente le potentiel d'écoulement dans un sol non saturé pour lequel une pression h_a est appliquée. Le potentiel résiduel est généralement très faible.

5. Modélisation des écoulements dans les interfaces des étanchéités composites

5.1. Présentation de la géométrie étudiée

L'étanchéité composite repose soit sur un sol très perméable, soit sur le toit d'une nappe libre. Elle est constituée (figure 6) :

- D'une géomembrane endommagée (présence de défauts) ;
- D'une couche de GSB, de rayon R_c , d'épaisseur H_s et de conductivité hydraulique k_s ;

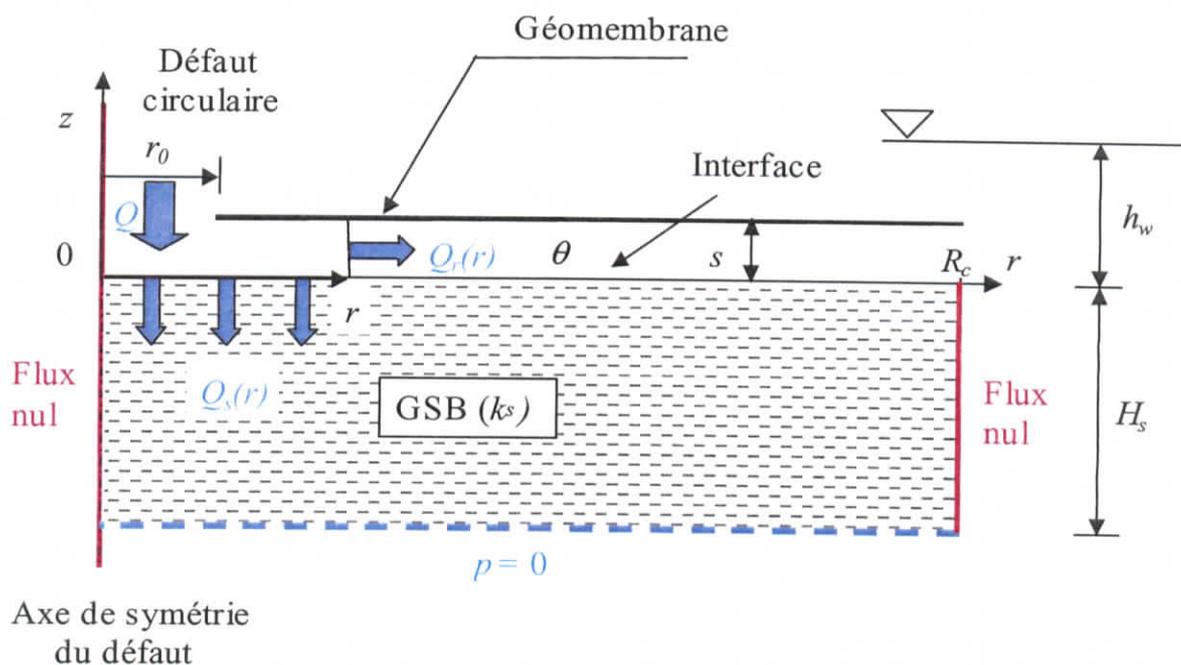


Figure 6 : schéma de la géométrie de l'étanchéité composite dans le cas axisymétrique (d'après Touze-Foltz, 2001)

La condition à la limite sur l'axe de symétrie du défaut, qui est également l'axe de symétrie du cylindre de sol considéré est un flux nul. La condition à la limite au niveau de la base du GSB est à pression effective nulle. L'axe des z est dirigé verticalement vers le haut, son origine est située à la surface du GSB. Différentes expérimentations (Brown, fukuoka, Touze-Foltz) ont montré qu'il existe entre la géomembrane et le GSB un espace, appelé *interface*.

L'interface d'une étanchéité composite est classiquement représentée comme un espace d'épaisseur uniforme, s (Brown et al., 1987, Rowe, 1998, Touze-Foltz, 1999). L'équation de Navier-stokes, peut dans ce cas de géométries simples, y être intégrée sans difficultés sous les hypothèses suivantes :

- Régime d'écoulement permanent ;
- Ecoulement laminaire ;(les lignes de courant sont par symétrie parallèles aux plans délimitant l'interface);
- L'interface est plane et horizontale ;
- La vitesse du liquide est nulle au niveau des deux plans délimitant l'interface, que sont les surfaces de la géomembrane et de la surface du GSB.

Dans le cas d'un défaut circulaire de rayon r_0 dans la géomembrane, Brown et al. (1987) supposent que l'écoulement dans l'interface est radial. Le problème à résoudre est alors axisymétrique.

5.2.Hypothèses

Pour la résolution du problème, on suppose que :

- L'écoulement a lieu en régime permanent ;
- L'interface et le GSB sont saturés ;
- L'écoulement à travers le GSB est monodimensionnel vertical ; ce qui amène à une condition de flux nul à la limite sur la paroi extérieure du cylindre (interface-GSB) de rayon R_c de type flux nul dans la direction radiale.

5.3.Solutions analytiques du modèle d'écoulement

Dans ce qui va suivre, l'équation de Navier-Stokes va être intégrée pour une géométrie axisymétrique. En effet, dans le cas d'un défaut circulaire dans la géomembrane, sous les hypothèses précédentes, la géométrie est axisymétrique (figure 7). La solution analytique qui va être présentée servira de base de comparaison au code SEEP/W qui a été utilisé au cours de ce stage pour simuler les écoulements dans les étanchéités composites saturées et partiellement saturées.

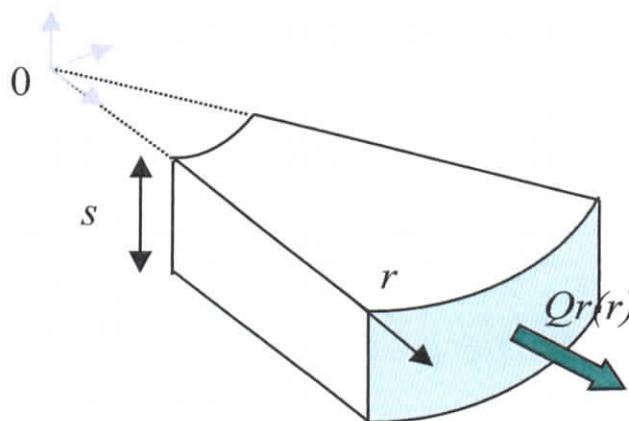


Figure 7 : schéma de la géométrie radiale

5.3.1. Ecoulement radial entre deux plaques parallèles

Brown et al., (1987) ont obtenu, par intégration de l'équation de Navier-stokes sur un disque complet, l'expression du débit radial $Q_r(r)$ à l'interface à la distance r de l'axe de symétrie du système considéré sous la forme :

$$Q_r(r) = -\pi r \frac{s^3}{6\mu} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (\text{éq-27})$$

avec $\frac{dp}{dr}$: gradient de pression dans l'interface en r .

Cette relation est connue sous le nom *de loi cubique*. Sa forme est identique à celle de la loi de Darcy (Brown, 1989) moyennant la définition d'une conductivité hydraulique de l'interface sous la forme :

$$k = \frac{gs^2}{12\nu} \quad (\text{éq-28})$$

avec :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ Viscosité cinématique du liquide.}$$

Dans le cas des étanchéités composites, on utilise la notion de transmissivité hydraulique θ définie par Brown et al. (1987) :

$$\theta = ks = \frac{gs^3}{12\nu} \quad (\text{éq-29})$$

Dans le cas où un géotextile est placé à l'interface entre l'argile et la géomembrane, la transmissivité de l'interface est celle du géotextile, égale à :

$$\theta = k_p s \quad (\text{éq-30})$$

avec k_p : la conductivité hydraulique du géotextile dans son plan.

Le débit radial à l'interface s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_r(r) = \frac{-2\pi r \theta}{\rho g} \left(\frac{dp}{dr} \right) \quad (\text{éq-31})$$

5.3.2. Principe de résolution

La méthode de résolution des écoulements en milieux saturés, utilisée par Brown et al. (1987) pour les étanchéités composites, est basée sur le principe de la conservation de la masse : le

débit qui passe par le défaut dans la géomembrane est égal à la somme du débit qui s'infiltré dans le GSB, $Q_s(r)$ et du débit radial à l'interface, $Q_r(r)$, pour les différentes valeurs de r :

$$Q = Q_s(r) + Q_r(r) \quad (\text{éq-32})$$

Comme le régime est supposé permanent, on aura :

$$dQ_s(r) + dQ_r(r) = 0 \quad (\text{éq-33})$$

En reprenant la définition du débit radial à l'interface (éq-31), dans l'équation (éq-33), on obtient :

$$dQ_s(r) - \frac{2\pi\theta}{\rho g} \left[\frac{dp}{dr} + r \frac{d^2p}{dr^2} \right] dr = 0 \quad (\text{éq-34})$$

Le débit élémentaire d'infiltration dans le sol sur la couronne de sol comprise entre les rayons r et $r+dr$, $dQ_s(r)$, s'écrit par application de la loi de Darcy, dans le cas d'un gradient hydraulique unitaire dans le sol, sous la forme (Brown et al., 1987) :

$$dQ_s(r) = 2\pi r k_s \cdot dr \quad (\text{éq-35})$$

et pour prendre en compte la non uniformité du gradient hydraulique dans le sol, l'expression (éq-35) devient :

$$dQ_s(r) = 2\pi r k_s \left(1 + \frac{p}{\rho g H_s} \right) dr \quad (\text{éq-36})$$

5.3.3. Equation différentielle obtenue

Par application de la loi de Darcy, avec H_s , l'épaisseur de sol saturée considérée et le principe de conservation de la masse contenu dans les équations (éq-32) et (éq-33) on obtient l'équation différentielle en p :

$$\frac{d^2p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} - \frac{k_s}{\theta H_s} p = \frac{\rho g k_s}{\theta} \quad (\text{éq-37})$$

ou :

$$\frac{d^2p}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp}{dr} - \alpha^2 p = \rho g \alpha^2 C \quad (\text{éq-38})$$

avec α et C donnés par les équations :

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_s}{\theta H_s}} \quad (\text{éq-39})$$

$$C = H_s - h_a \quad (\text{éq-40})$$

5.3.4. Solutions générales (Touze-Foltz)

Par analogie aux équations de Brown et al, Touze-Foltz (2001) donne :

$$p(r) = \rho g [A I_0(\alpha r) + B K_0(\alpha r) - C] \quad (\text{éq-41})$$

5.3.5. conditions aux limites

5.3.5.1. condition à la limite aval de l'interface

Elle peut-être soit de type flux nul, soit une condition de terrain qui représente la limite de validité de l'hypothèse de saturation ou enfin une pression effective nulle que l'on adoptera pour la suite et qui est exprimée par :

$$\begin{cases} Q_r(R_c) \geq 0 \\ p(R_c) = 0 \end{cases} \quad (\text{éq-42})$$

En effet, c'est ce type de condition à la limite aval qui a été observé dans les essais de mesure de transmissivité d'interface réalisés par Touze-Foltz et al. (2002), c'est-à-dire qu'il y avait systématiquement pour tous les essais réalisés un écoulement à l'aval de l'étanchéité composite testée.

Nous nous sommes basées sur ces résultats d'essais pour tenter de les modéliser, dans la suite. Les essais seront présentés au chapitre III.

5.3.5.2. condition à la limite amont de l'interface

Elle correspond à la charge hydraulique appliquée sur l'étanchéité :

$$p(r_0) = \rho g h_w \quad (\text{éq-43})$$

On considère que les pertes de charge hydraulique à la traversée du défaut sont négligeables, comme l'ont suggéré Giroud et al. (1989).

5.3.6. Solutions analytiques obtenues (Touze-Foltz)

L'expression du profil de pression effective à l'interface pour une condition à la limite aval de l'interface de type pression effective nulle, est donné sous la forme suivante :

$$p(r) = \rho g [A_p I_0(\alpha r) + B_p K_0(\alpha r) - C] \quad (\text{éq-44})$$

avec :

$$A_p = -\frac{h_w K_0(\alpha R_c) + C(K_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0)I_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha R_c)I_0(\alpha r_0)} \quad (\text{éq-45})$$

$$B_p = \frac{h_w I_0(\alpha R_c) + C(I_0(\alpha R_c) - I_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0)I_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha R_c)I_0(\alpha r_0)} \quad (\text{éq-46})$$

En remplaçant A_p et B_p par leur expressions dans l'équation (éq-44), la pression s'écrit encore :

$$\frac{p(r)}{\rho g} = (h_w + C) \frac{\Omega_{\alpha,0,0}(r, R_c)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} - C \left(1 + \frac{\Omega_{\alpha,0,0}(r, r_0)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} \right) \quad (\text{éq-47})$$

avec :

$$\begin{cases} \Omega_{\alpha,n,m}(x, y) = I_n(\alpha x)K_m(\alpha y) - I_m(\alpha y)K_n(\alpha x) & \text{si } n + m \text{ est pair} \\ \Omega_{\alpha,n,m}(x, y) = I_n(\alpha x)K_m(\alpha y) + I_m(\alpha y)K_n(\alpha x) & \text{si } n + m \text{ est impair} \end{cases} \quad (\text{éq-48})$$

La conservation de la masse donnée par l'équation (éq-32) permet d'obtenir le débit total entrant dans l'étanchéité composite comme étant le débit s'infiltrant dans le sol au droit du défaut auquel on ajoute le débit radial entrant dans l'interface en r_0 . Le débit Q est supérieur au débit Q_s s'infiltrant dans le sol de l'étanchéité composite, car le débit en R_c est positif. Le débit s'infiltrant dans le sol, Q_s , est obtenu par différence entre le débit total et le débit de suintement $Q_r(R_c)$.

Les expressions des débits Q , $Q_r(R_c)$ et Q_s sont données par les équations suivantes :

$$Q = \pi r_0^2 k_s i_s + 2\pi r_0 \theta \alpha \left[- (h_w + C) \frac{\Omega_{\alpha,1,0}(r_0, R_c)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} + C \frac{\Omega_{\alpha,1,0}(r_0, r_0)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} \right] \quad (\text{éq-49})$$

$$Q_r(R_c) = +2\pi \theta \alpha R_c \left[- (h_w + C) \frac{\Omega_{\alpha,1,0}(R_c, R_c)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} + C \frac{\Omega_{\alpha,1,0}(R_c, r_0)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} \right] \quad (\text{éq-50})$$

$$Q_s = \pi r_0^2 k_s i_s + 2\pi \theta \alpha \left[(h_w + C) \frac{R_c \Omega_{\alpha,1,0}(R_c, R_c) - r_0 \Omega_{\alpha,1,0}(r_0, R_c)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} + C \frac{r_0 \Omega_{\alpha,1,0}(r_0, r_0) - R_c \Omega_{\alpha,1,0}(R_c, r_0)}{\Omega_{\alpha,0,0}(r_0, R_c)} \right] \quad (\text{éq-51})$$

La notion de conductivité hydraulique k est un paramètre essentiel, comme l'ont montré les équations précédentes pour, connaissant le débit Q , déterminer θ , la transmissivité d'interface.

Cependant, dans le cadre du stage, la mesure de k n'a pas été envisagée, ce qui a nécessité de conduire une synthèse bibliographique sur ce point afin de disposer de paramètres qui serviront pour la simulation numérique. Ces paramètres seront présentés au chapitre III.

-Chapitre III-

Comportement hydraulique des GSB

La conductivité hydraulique des GSB dépend de plusieurs paramètres (Rowe, 1998) :

- De la nature et de la masse par unité de surface de la bentonite dans le GSB ;
- Des conditions d'hydratation et nature du liquide de percolation ;
- Du taux d'infiltration à travers le GSB.

Ces facteurs ont été examinés en détail par Petrov et al. (1997a, b) et Rowe (1997). Ils ont montré que la conductivité hydraulique diminuait avec la diminution du taux de gonflement du GSB, et était fortement corrélée avec la contrainte effective appliquée : une contrainte importante implique une faible conductivité hydraulique.

Il est important de comparer les résultats obtenus pour différents types de GSB, conditions d'application de la contrainte de confinement, conditions d'hydratation et liquides de percolation.

1. Influence du liquide d'hydratation/percolation

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer l'effet du liquide d'hydratation contenu dans les pores sur les propriétés du GSB. Elles se sont toutes intéressées à la variation de la conductivité hydraulique :

- Schubert (1987), Shan et Daniel (1991) Daniel et al., (1993) et Ruhl et Daniel (1997) ont utilisé des solutions chimiques réelles ou du lixiviat synthétique à travers le GSB. Les cations, la concentration et/ou la constante diélectrique du liquide de percolation et du liquide d'hydratation, ont une influence sur la conductivité hydraulique.
- Shan et Daniel (1991) ont fait percoler de l'eau du robinet avec une solution de $CaCl_2$ 0,25M, dans un échantillon de GSB, sous une contrainte effective de 35 kPa : la conductivité hydraulique du GSB augmente d'un facteur 10.
- Gleason et al., (1997) ont obtenu d'après leurs essais que la conductivité hydraulique d'une mixture compactée de «sable-bentonite), augmente d'un facteur 100 lorsque le liquide de perméation est une solution de $CaCl_2$ 0,25M.
- Dobras et Elzea (1993) ont montré que le remplacement de la bentonite sodique par de la bentonite calcique dans un GSB, causait une large augmentation de la conductivité hydraulique.
- Ruhl et Daniel (1997) ont conclu que le facteur le plus important qui influence les performances du GSB à empêcher l'infiltration des solutions chimiques est le liquide

hydratant. Lorsque le GSB est hydraté au préalable avec de l'eau avant sa percolation par d'autres liquides la conductivité hydraulique du GSB reste faible de l'ordre de $10^{-11} - 10^{-10}$ m/s. Si le lixiviat contenait des quantités approximativement égales de cations monovalents et polyvalents, les cations monovalents compenseraient l'effet de celui des cations polyvalents.

- Petrov et Rowe (1997) ; ont montré que pour des échantillons de GSB préhydratés avec de l'eau distillée la conductivité hydraulique augmentait de 1,5 à 2 ordres de grandeur avec une augmentation de concentration du NaCl de 0,1 à 2,0 M. Aussi, ont-ils remarqué, une valeur de conductivité hydraulique peu supérieure pour des GSB à grand indice des vides e. ils concluent, que l'effet de l'épaisseur adsorbée est plus important que l'indice des vides, quand le GSB est directement préhydraté avec une solution de NaCl par rapport à l'eau distillée.
- Shackelford et al.(2000), ont discuté et testé les différents facteurs pouvant affecter la conductivité hydraulique du GSB préhydraté avec des liquides non-standards. Les liquides non-standards sont des liquides qui contiennent de grandes concentrations de cations monovalents et de faibles concentrations de cations divalents et peuvent causer une augmentation significative de la conductivité hydraulique.
- Jo et al.(2001) ont effectué des tests de gonflement et des tests de conductivité hydraulique sur des GSB avec différentes solutions salines. Leurs résultats ont montré, que la préhydratation du GSB avec des solutions contenant des cations divalents ou trivalents, leur confèrent une plus grande conductivité hydraulique et un faible taux de gonflement que celle avec des solutions à cations monovalents ou avec de l'eau ionisée. Seul le pH influençait le gonflement et la conductivité hydraulique quand il est très faible (<3) ou très grand (>12).

2. Influence de la contrainte mécanique

H-Y Shan (2002) a conduit des tests de conductivité hydraulique sur deux types de GSB par des perméamètres à parois flexibles suivant la norme ASTM D5887-95, sous une contrainte de confinement de 34,5 kPa en utilisant différents liquides d'hydratation. Il a déduit que la conductivité hydraulique des deux GSB dépend de la chimie du liquide d'hydratation ainsi que de celle du perméant ; aussi longtemps que le GSB soit hydraté ou perméabilisé avec une solution aqueuse sa conductivité hydraulique restera faible et sera contrôlée par le dernier perméant.

Le tableau 2 résume les valeurs publiées dans la littérature de conductivité hydraulique, pour les différents types de GSB de lixiviat de contrainte de confinement et pour différentes conditions d'hydratation.

Les références des produits sont celles qui ont été indiquées dans le tableau 1.

Symbole du produit	Contrainte d'hydratation (kPa)	Contrainte de confinement finale (kPa)	Fluide hydratant	Fluide perméant	Conductivité hydraulique (m/s)	référence
BF1	3-4	3-4	DW	DW	$5,2 \times 10^{-11}$	(a)
	35-37	35-37	DW	DW	$1,3 \times 10^{-11}$	
	109-117	109-117	DW	DW	$7,5 \times 10^{-12}$	
	34-35	34-35	TW	TW	$1,6 \times 10^{-11}$	
	3-4	3-4	DW	0,01 N	$5,3 \times 10^{-11}$	(b)
	3-4	14	DW	0,01 N	$5,1 \times 10^{-11}$	
	3-4	37	DW	0,01 N	$3,8 \times 10^{-11}$	
	3-4	69	DW	0,01 N	$2,1 \times 10^{-11}$	
	35	35	DW	0,01N NaCl	$1,5 \times 10^{-11}$	
	107	107	DW	0,01N NaCl	$4,8 \times 10^{-12}$	
	3-4	3-4	DW	0,1N NaCl	$1,0 \times 10^{-10}$	
	3-4	12	DW	0,1N NaCl	$7,6 \times 10^{-11}$	
	3-4	34	DW	0,1N NaCl	$5,3 \times 10^{-11}$	
	3-4	73	DW	0,1N NaCl	$2,7 \times 10^{-11}$	
	3-4	112	DW	0,1N NaCl	$1,5 \times 10^{-11}$	
	36	36			$2,0 \times 10^{-11}$	
	108	108			$7,3 \times 10^{-12}$	
	4	4	0,1N	0,1N NaCl	$6,4 \times 10^{-11}$	
	35	35			$2,1 \times 10^{-11}$	
	3-4	3-4	DW	0,6N NaCl	$9,2 \times 10^{-12}$	
3-4	12			$6,3 \times 10^{-10}$		
3-4	37			$5,5 \times 10^{-10}$		
3-4	74			$2,2 \times 10^{-10}$		
3-4	74			$6,8 \times 10^{-11}$		
	3-4	109			$2,7 \times 10^{-11}$	
	35	35			$9,3 \times 10^{-11}$	
	105	105			$2,1 \times 10^{-11}$	
	3-4	3-4	0,6N	0,6N NaCl	4×10^{-9}	
	35	35			$7,6 \times 10^{-10}$	
	111	111			$2,3 \times 10^{-10}$	
	3-4	3-4	DW	2N NaCl	$2,6 \times 10^{-9}$	

	3-4	12			2×10^{-9}	
	3-4	35			2×10^{-9}	
	3-4	75			$3,6 \times 10^{-10}$	
	3-4	114			$1,6 \times 10^{-10}$	
	33	33			$4,7 \times 10^{-10}$	
	101	101			$6,2 \times 10^{-11}$	
	3-4	3-4	2N	2N NaCl	$2,7 \times 10^{-8}$	
	34	34			$1,2 \times 10^{-8}$	
	107	107			$2,6 \times 10^{-9}$	
	3-4	3-4	DW	SL1	$5,5 \times 10^{-10}$	
	3-4	15			$3,6 \times 10^{-10}$	
	3-4	34			$2,1 \times 10^{-10}$	
	3-4	72			$8,8 \times 10^{-11}$	
	3-4	124			$3,1 \times 10^{-11}$	
	31	31			$8,7 \times 10^{-11}$	
	33	33	SL1	SL1	$7,3 \times 10^{-11}$	
	34	34	TW	E1	$7,3 \times 10^{-12}$	(a)
	33	33	TW	E2	$6,0 \times 10^{-12}$	
	33	33	TW	E3	$4,1 \times 10^{-11}$	
	32	32	TW	E4	$2,0 \times 10^{-9}$	
BF2	35	35	TW	TW	$7,0 \times 10^{-12}$	(c)
	35	35	RL	RL	$<1,0 \times 10^{-12}$	
	35	35	SHWL	SHWL	1×10^{-11}	
	35	35	SL2	SL2	2×10^{-8}	
BM	35	35	TW	TW	5×10^{-12}	
	35	35	RL	RL	2×10^{-10}	
	35	55	SHWL	SHWL	8×10^{-10}	
	35	35	SL2	SL2	1×10^{-9}	
CL	35	35	TW	TW	1×10^{-11}	
	35	35	RL	RL	7×10^{-12}	
	35	35	SHWL	SHWL	1×10^{-10}	
	35	35	SL2	SL2	3×10^{-10}	
GS	35	35	TW	TW	1×10^{-11}	
	35	35	RL	RL	3×10^{-12}	
	35	35	SHWL	SHWL	2×10^{-11}	
	35	35	SL2	SL2	4×10^{-7}	
	35	35	TW	SL2	2×10^{-11}	
GSC	35	35	TW	TW	1×10^{-11}	
	35	35	RL	RL	6×10^{-12}	
	35	35	SHWL	SHWL	3×10^{-12}	
	35	35	SL2	SL2	2×10^{-7}	
	35	35	TW	SL2	3×10^{-12}	

CL	14	14	TW	TW	2×10^{-11}	(d)
	14	14	TW	B	4×10^{-11}	
	5	14	TW	TW	4×10^{-11}	
	5	14	TW	E4	2×10^{-11}	
	5	35	TW	TW	2×10^{-11}	
	5	35	TW	SL3	3×10^{-11}	

Références :

(a) Petrov et al. (1997) ; (b) Petrov et Rowe (1997) ; (c) Ruhl et Daniel (1997) ; (d) Rad et al. (1994)

Tableau 2 : conductivité hydraulique des GSB sous différentes conditions de test

Notations :

Symbole	caractéristiques
TW	Eau du robinet
DW	Eau distillée
SL1	Lixiviat synthétique de type 1
SL2	Lixiviat synthétique de type 2
RL1	lixiviat réel
RL2	Lixiviat réel de composition inconnue
E1	Ethanol 25%, eau 75% (par masse)
E2	Ethanol 50%, eau 50%
E3	Ethanol 75% eau 25%
E4	Ethanol 100% eau 0%
B	Benzène
SHWL	Lixiviat simulé

Tableau 3 : notations

Toutes les références citées dans le tableau de synthèse III-1, donnent la même gamme de valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-11} m/s pour différents types de GSB, préhydratés et percolés avec de l'eau du robinet, sous une contrainte d'hydratation et de confinement égale à 34-35 kPa. Nous retiendrons cette valeur pour les simulations numériques qui seront présentées dans la partie 3 du mémoire.

3. Estimation de la transmissivité d'interface au laboratoire

Un paramètre essentiel pour la quantification des débits de fuite dans les étanchéités composites est la transmissivité d'interface. Nous allons présenter les dispositifs expérimentaux qui ont été développés pour quantifier au laboratoire, cette notion de transmissivité dans différentes étanchéités composites. Les résultats obtenus tendent à montrer que même pour des surfaces de sol et de géomembranes qui peuvent être considérés comme deux plans parallèles, les écoulements à l'interface ne sont pas nécessairement radiaux pour un défaut circulaire.

Les études de Fukuoka (1985), Brown et al. (1987) et Touze-Foltz (2001) ont montré l'existence d'une interface conductrice entre les deux composants de l'étanchéité composite, en présence ou non de géotextiles entre le sol et la géomembrane. Ainsi, le débit de fuite résultant d'un défaut dans la géomembrane peut s'écouler dans cette interface avant de s'infiltrer dans le sol, et est conditionné par la valeur de transmissivité à l'interface. Afin de déterminer ce débit de fuite, il est impératif d'estimer cette valeur de transmissivité.

Six études font état de la mesure de la transmissivité d'interface au laboratoire. Fukuoka (1986) et Liu (1998) ont utilisé des cellules de grande dimension avec un limon compacté et une géomembrane ou un film en PVC-P. Brown et al. (1987) ont déduit de leurs expérimentations, des valeurs de transmissivité d'interface, pour des géomembranes PEHD, PVC-P, EPDM et PECS, avec des sols sablo-limoneux et sablo-argileux.

Quant à Harpur et al., (1993) et Touze-Foltz et al. (2002), ils ont déterminé ce paramètre dans le cas d'une étanchéité composite GSB/géomembrane PEHD. Touze-Foltz (2002) a mesuré ce paramètre dans le cas d'une étanchéité composite argile/géomembrane en PEHD ou PP.

En premier lieu, nous rappelons les résultats des études recensées ci-dessus pour les GSB. Puis, nous présenterons les dispositifs utilisés par Harpur et al., (1993) et Touze-Foltz et al., (2002) pour la détermination de la transmissivité d'interface. Enfin, une comparaison sera faite sur la base des résultats obtenus par Touze-Foltz et al. (2002) pour lesquels on dispose de tous les points de mesure et qui nous serviront de référence pour les simulations numériques.

4. Résultats expérimentaux de la bibliographie

On présente uniquement dans cette partie, les dispositifs et les résultats d'essais effectués sur des GSB. Les résultats d'Harpur et al. (1993) ne sont pas détaillés car nous ne disposons pas de tous les points de mesure, ce qui les rend inexploitable.

Nous porterons un intérêt tout particulier aux résultats de Touze-Foltz et al (2002) pour lesquels nous possédons le dispositif qui a servi pour les essais ainsi que les valeurs exactes des points de mesure pour tous les essais réalisés à ce jour.

4.1. Harpur et al. (1993)

Harpur et al ont réalisé des mesures de transmissivité à l'interface GSB/géomembrane PEHD dans une cellule cylindrique en aluminium de 0,108 m de diamètre. Le défaut dans la géomembrane a un diamètre égal à $7,6 \times 10^{-3}$ m. cinq GSB différents ont été testés. La charge hydraulique imposée est de 0,3 m. des contraintes mécaniques de 7 et 70 kPa ont été appliquées sur l'étanchéité composite via une plaque plane et lisse.

Les valeurs de transmissivité d'interface obtenues en régime permanent sont comprises entre 3×10^{-12} et 2×10^{-10} m²/s, en fonction des GSB testés et des contraintes mécaniques appliquées. La durée maximale des tests était de 15 jours, cette durée permettant, selon ces auteurs, d'atteindre le régime permanent.

Harpur et al ont quantifié l'évolution de la transmissivité d'interface dans le temps : ils ont constaté sa décroissance avec le temps mais également avec la contrainte mécanique appliquée. Leur dispositif expérimental est présenté dans la suite.

4.2. Touze-Foltz et al (2002)

Ils ont conduit des tests de transmissivité d'interface au laboratoire, pour étudier l'influence de la préhydratation des GSB sur les transferts dans l'étanchéité composite à travers un défaut dans la géomembrane.

Les premiers résultats obtenus ont montré que la transmissivité d'interface dépendait de la teneur en eau initiale de l'échantillon étudié ainsi que de la contrainte mécanique appliquée. Le type du géotextile (tissé ou non-tissé) semble également avoir une grande influence.

4.2.1. Dispositif

4.2.1.1. Cellule de mesure

La cellule est présentée à la figure 7, elle se compose de trois parties :

- Un socle de 19,6 cm de diamètre et de 6 cm de haut, qui sert de support au sol de l'étanchéité composite testée ;
- Une partie inférieure de 20 cm de diamètre intérieur et de 10 cm de haut. C'est dans le cylindre inférieur de cette partie que le sol de l'étanchéité composite est compactée. Une rigole placée en périphérie permet de récupérer l'eau qui s'écoule à l'interface ;
- Une partie supérieure de 6 cm de haut qui constitue une plaque granulaire où sont placés des granulats siliceux 10/20 mm enrobés avec de l'araldite. Elle joue un double rôle : d'une part, elle permet l'application de la charge hydraulique sur l'étanchéité composite et d'autre part, elle permet la transmission d'une contrainte mécanique sans que la géomembrane ne se déforme pour accompagner le tassement du sol.

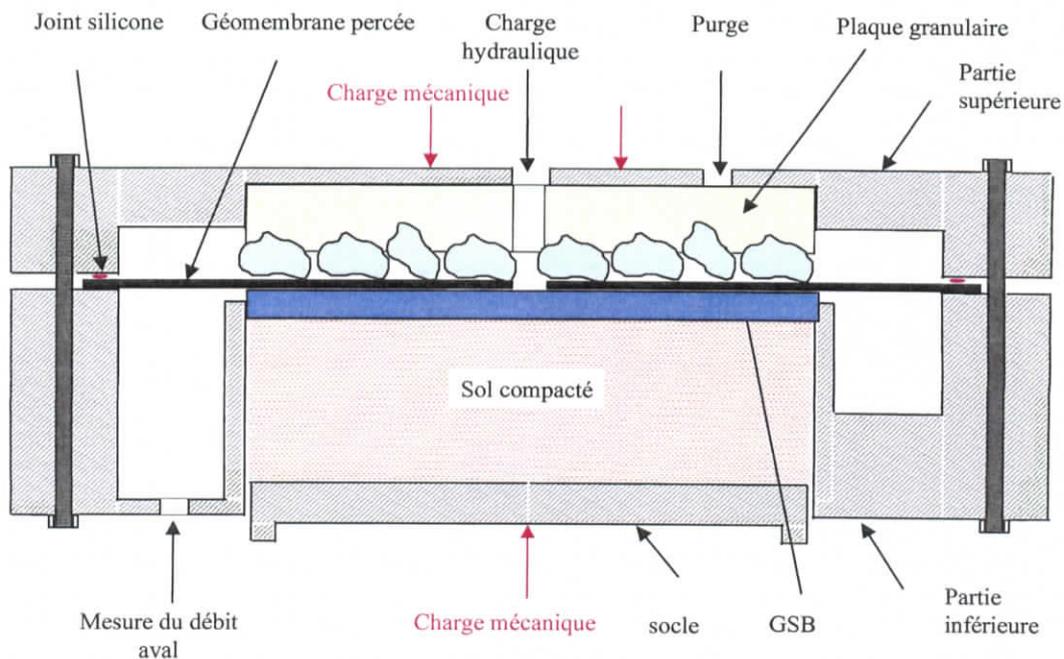


Figure 7: Schéma de la cellule de mesure de transmissivité d'interface (Touze-Foltz et al 2002)

4.2.1.2. Presse et anneau dynamométrique

La cellule est posée sur une presse Wykeham Farrance, modèle n°157, série n°484. un dynamomètre a été utilisé pour l'application d'une contrainte mécanique maximale égale à 40 kPa.

4.2.1.3. Application de la charge hydraulique et mesure du débit de fuite

Une même charge hydraulique a été appliquée pour tous les essais, celle qui détermine le niveau maximal de lixiviat autorisé, c'est-à-dire 0,3 m selon l'arrêté du 09/09/97.

La charge hydraulique est appliquée soit par un bac à niveau constant soit par un tube piézométrique d'un diamètre d'environ 4 mm, suivant les débits de fuite obtenus. Quand le débit de fuite à l'aval est trop faible, une mesure à charge variable est effectuée, ce qui permet d'obtenir un débit de fuite à l'amont. Lorsque l'on utilise le bac à niveau constant, la charge hydraulique appliquée dans la cellule est égale à la différence de niveau entre le trop plein du bac à niveau constant et la face supérieure de la géomembrane. Pour le tube piézométrique, la charge hydraulique est égale à l'instant t à la différence de hauteurs entre le bas du ménisque dans le tube et la cote de la face supérieure de la géomembrane. Les hauteurs sont mesurées à l'aide d'un cathétomètre.

L'utilisation du tube piézométrique pour la mesure conduit à l'obtention du débit de fuite total, et non plus du débit à l'aval de l'interface. La valeur du débit de fuite volumique total est alors calculée en multipliant la différence de niveau entre les dates de début et de fin de mesure par la section du tube, et en divisant par la durée de mesure.

4.2.1.4. Application de la contrainte mécanique

Pour permettre une comparaison avec l'expérience d'Harpur et al. (1993), la première contrainte appliquée a été de 7 kPa. Pour les autres essais, une contrainte de 50 kPa a été appliquée. Ces deux contraintes permettent de simuler respectivement des hauteurs de déchets égales à 0,7 m et 5 m (pour une densité de déchets égale à 1).

4.2.2. Matériels testé

4.2.2.1. Sol

Le sol support est un limon amené à 2% au-dessus de son optimum proctor, de $4,5 \times 10^{-2}$ m d'épaisseur et présente une conductivité hydraulique égale à 10^{-10} m/s.

4.2.2.2. GSB

Deux différents GSB ont été testés. Ils sont décrits dans le tableau 4.

4.2.2.3. Géomembrane

Deux géomembranes très rigides en PEHD de 2 mm d'épaisseur ont été utilisées.

4.2.3. Tests conduits avant la préhydratation

Afin d'assurer une bonne absorption d'eau, les GSB sont préhydratés après leur installation. Selon le comité Français des Géosynthétiques (1998), la préhydratation doit permettre une teneur en eau d'au moins 100%. L'eau nécessaire pour atteindre cette teneur en eau est ajoutée soit en la vaporisant sur le GSB soit elle est absorbée par le sol support. Basés sur les résultats de Soltani (1997), trois méthodes ont été comparées pour le GSB au laboratoire afin de permettre le calage du dispositif adéquat pour l'essai de transmissivité d'interface.

Ils ont adopté la méthode associant la préhydratation avec l'eau du robinet et par le sol support. Après la préhydratation du GSB, ce dernier est placé dans la cellule de mesure pendant une semaine avant d'entamer les tests de transmissivité sous la contrainte mécanique appliquée durant le test. Cette combinaison permet au GSB d'atteindre une teneur en eau égale à 100% mais également son homogénéisation.

4.2.4. Résultats obtenus

Le tableau 4 synthétise les différents résultats obtenus, en terme de débit et de transmissivité. Nous présentons uniquement les résultats obtenus pour le Bentomat, qui a fait l'objet de notre étude. D'autres essais sur l'influence de la contrainte mécanique appliquée et celle de la nature des géotextile ont été également testés sur le Bentomat.

N° test	Contrainte mécanique (kPa)	Teneur en eau initiale (%)	Temps d'immersion (mm)	Teneur en eau après immersion (%)	Débit final (m ³ /s)	Transmissivité effective finale (m ² /s)
1	7	31,5	30	79,8	3,18 × 10 ⁻¹⁰	7,05 × 10 ⁻¹⁰
2	50	28,9	30	110,7	2,08 × 10 ⁻¹¹	4,54 × 10 ⁻¹¹
3	50	31,5	-----	-----	3,87 × 10 ⁻¹¹	8,50 × 10 ⁻¹¹
4	50	22,3	30	83,1	5,80 × 10 ⁻¹¹	1,28 × 10 ⁻¹⁰

Tableau 4 : résultats en fin d'essai de Touze-Foltz et al (2002)

La transmissivité d'interface a été estimée de deux façons. Une transmissivité apparente a été déterminée par Harpur et al. (1993) négligeant les transferts au sein du GSB et en supposant que l'écoulement à l'interface est axisymétrique. Pour des tests à charge hydraulique constante, Harpur et al. (1993) donnent l'équation de transmissivité suivante :

$$\theta = \frac{Q_r(R_c) \times \ln\left(\frac{R_c}{r_0}\right)}{2\pi h} \quad (\text{éq-52})$$

Dans le cas d'une méthode à charge variable, on utilisera l'équation :

$$\theta = \frac{a \times \ln\left(\frac{R_c}{r_0}\right) \times \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}{2\pi t} \quad (\text{éq-53})$$

où :

h : charge hydraulique appliquée au niveau du défaut dans la géomembrane

h₀ : charge hydraulique appliquée au début de l'essai au niveau du défaut

h₁ : charge hydraulique appliquée en fin d'essai au niveau du défaut

t : durée du test

Les valeurs de transmissivité données dans le tableau 4 ont été calculées à partir de l'équation de débit obtenue par les développements de Touze-Foltz et al. (1999) (chapitre II):

$$Q = \pi r_0^2 k_s i_s - 2\pi r_0 \theta \alpha [A_p I_1(\alpha r_0) - B_p k_1(\alpha r_0)] \quad (\text{éq-54})$$

où A_p , B_p , α et C sont des paramètres définis dans le chapitre II.

5. Conclusion

Les essais de Touze-Foltz et al (2002) ont confirmé les résultats d'Harpur et al. (1993). La diminution de la transmissivité au cours du temps a été observée, également la diminution de celle-ci avec l'augmentation de la contrainte mécanique. Aussi ont-ils remarqué que sous une faible contrainte mécanique, la transmissivité d'interface semble être guidée par celle du géotextile supérieur du GSB.

Harpur et al (1993) donnent des valeurs de transmissivité apparente pour le GSB entre $3,0 \times 10^{-12}$ et $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ alors que Touze-Foltz et al (2001-2002) présentent des gammes de transmissivité entre $4,54 \times 10^{-11}$ et $1,16 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. La différence entre ces deux gammes peut s'expliquer par le fait, que la contrainte mécanique dans les essais d'Harpur et al., était appliquée d'une manière uniforme alors que pour les essais de N.Touze-Foltz la contrainte a été appliquée sur un nombre de points limité vu la présence d'une plaque granulaire sur la géomembrane.

Parmi les valeurs de transmissivité d'interface données par Touze-Foltz et al., nous avons adopté celle égale à $4,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la suite de notre étude, c'est une valeur qui correspond à notre matériau d'étude le Bentomat.

Le GSB est initialement non saturé et l'interface est un vide rempli d'air. Cependant, il est impératif de déterminer les paramètres non saturés pour pouvoir modéliser les écoulements d'interface. Etant donné, que l'interface ne constitue pas un matériau, nous ne pouvons pas parler dans ce cas de figure de courbes de rétention.

La question s'est posée de savoir comment allions nous considérer cette interface ? et dans le cas où elle serait associée à un matériau, que serait ce matériau ?

F.Cartaud (2002) pour des étanchéités composites GSB/argile a adopté à la place de l'interface un sable fin dont la courbe de rétention est connue. En s'inspirant de son idée, nous avons adopté quant à nous un géotextile à la place de l'interface, étant donné la présence de ce dernier entre la géomembrane et le sol. Les paramètres ainsi adoptés pour le cas non saturé, seront présentés dans le chapitre IV.

-Chapitre IV-

Méthodes de mesure des relations teneur en eau-succion

La compréhension du processus d'écoulement dans un milieu non saturé dépend de la fiabilité des mesures de ses propriétés hydrauliques.

Quelques études se sont intéressés à l'influence de la succion matricielle sur les propriétés hydrauliques des géotextiles en présence d'une charge mécanique spécifique, mais rares sont celles menées pour des GSB.

L'objectif de notre travail, était de déterminer les courbes de rétention d'eau des GSB étudiés (le Gundseal et le Bentomat) non saturé; ce qui revient donc à déterminer des couples (θ, ψ) .

Des questions se posent à ce stade de l'étude. Il s'agit de savoir, par lequel des composants du GSB, sa courbe de rétention est influencée? en d'autres termes, allons-nous considérer le GSB comme tel ou faudra-t-il prendre en compte comme données de départ, les paramètres hydrodynamiques du géotextile ou ceux de la bentonite qui constituent le GSB, ie, dissocier le GSB?

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter une synthèse bibliographique des différentes méthodes utilisées et on essaiera d'apporter des réponses aux questions posées.

1. Synthèse bibliographique

1.1. pour les géotextiles

Stormont et al. (1997) ont mesuré des fonctions de rétention d'eau pour quatre géotextiles non tissés en polypropylène. Chacun des géotextiles a été testé dans deux conditions : à l'état naturel (tel qu'il est reçu) et à l'état lavé (mouillé, rincé puis séché).

La norme ASTM D 3152 a été utilisée pour mesurer la fonction de rétention d'eau, qui nécessite un certains nombre de paramètres afin de modéliser l'écoulement dans les sols non saturés. Les courbes de rétention sont déterminées par l'établissement d'une série d'équilibre entre l'eau des pores du sol et le corps de l'eau à une succion connue (Klute, 1986). Cette fonction est une hystérésis pour la plupart des sols, cependant la teneur en eau à une valeur donnée de succion est plus faible lors du mouillage que lors du séchage.

Stormont et al. (1998) ont déduit de leur tests que les échantillons à l'état naturel contenaient plus d'eau que les échantillons mouillés à une succion comparable pour un même type de géotextile. A la succion zéro, la valeur à saturation des échantillons naturels était typiquement entre 0,7 et 1,0 alors que celle des échantillons lavés est inférieure à 0,2.

Les fonctions de rétention d'eau sont influencées à la fois par le taille des pores, et par l'angle de contact géotextile-eau, ainsi que par l'influence relative de chacun des facteurs.

L'estimation de la charge d'entrée d'eau dans le géotextile est comparable à celle d'un sol uniforme, tels que les graviers et les sables grossiers (10 à 20 mm).

- ❖ J.Lafleur et al. (1998) ont effectué des tests pour déterminer les propriétés hydrauliques des géotextiles non saturés constitués de fibres en polyester sous une contrainte mécanique spécifique. Les mesures de rétention d'eau ont été effectuées par submersion de l'extrémité d'un échantillon de géotextile dans de l'eau et ainsi les teneurs en eau seront mesurées à différentes positions au-dessus de la surface mouillée. Les valeurs de conductivité hydraulique ont été déterminées par des méthodes de contrôle du flux à charge constante.

La fonction de rétention d'eau n'est pas unique et est influencée par la contrainte normale et peut également être affectée par la température et par le liquide hydratant. Par conséquent, elle n'est pas singulière mais dépend de l'histoire du mouillage et du séchage du matériau.

Cette non-singularité (hystérésis) est attribuée à différents facteurs :

- L'irrégularité géométrique des espaces interfoliaires ;
- La dépendance de l'angle de contact sur la direction du déplacement de la solution ;
- La présence d'air emprisonné ;
- Le comportement de gonflement et contraction de certains matériaux selon les variations de la matrice de succion.

Lafleur et al. (1998) ont conclu d'après leurs résultats, que le comportement de rétention d'eau des matériaux étudiés est fortement sensible aux facteurs qui influencent la taille des pores et leur distribution, i.e., les propriétés des fibres ainsi que le processus de fabrication. Aussi, les tests ont démontré la variabilité de l'amplitude de l'effet d'hystérésis qui est intimement liée aux facteurs précédents. La conductivité hydraulique décroît rapidement avec la succion. Par application de grandes contraintes de confinement ce qui implique une décroissance de la taille des pores, la conductivité hydraulique était égale à sa valeur à saturation à travers une large gamme de succions matricielles.

Conclusion

La synthèse bibliographique, nous a permis de recenser les différentes courbes de rétention établies pour des géotextiles.

Il est à noter que l'on dispose certes de courbes mais non des valeurs exactes des points expérimentaux présentés par les différents auteurs cités plus haut.

On observe cependant, qu'on retrouve la même allure de courbe en imbibition avec comme caractéristiques communes (Lafleur et al., 1998) :

$$\begin{cases} S_r = 100\% & \Rightarrow & \psi = 0 \\ S_r = 0\% & \Rightarrow & \psi \neq 2 \text{ kPa} \end{cases}$$

L'équation de la courbe de rétention pour l'imbibition est sous la forme : $S_r = \frac{a}{\psi} + b$ où a et b sont des paramètres de la courbe.

Comme notre géotextile (celui du Bentomat) n'est malheureusement pas de ceux testés dans les études précédentes, nous allons tout de même faire l'hypothèse que sa courbe de rétention aurait une même allure que celle des différents géotextiles testés, et ainsi on donnera une première courbe fictive qui sera introduite comme donnée pour la simulation numérique.

A partir de cette courbe, on calera l'équation de Van Genuchten afin d'obtenir les paramètres α et n . Connaissant la valeur de la conductivité hydraulique à saturation à l'interface, on estimera celle de Van Genuchten la liant aux valeurs de succion mesurées :

$$K(\psi) = K_s \cdot S_r \left(1 - \left(1 - S_r^m \right)^2 \right)$$

où :

$$S_r = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \left\{ \frac{1}{1 + ((\alpha\psi)^n)} \right\}^m$$

1.2.pour le GSB/bentonite

Quelques études seulement se sont intéressées aux GSB afin de déterminer leurs paramètres hydrodynamiques.

- ❖ Daniel et al. 1993 ont mesuré la succion d'un GSB (Gundseal) de 0,5 mm d'épaisseur avec un géofilm de type PEHD et de la bentonite dont la masse surfacique est égale à 42 kg/m² en utilisant deux méthodes. La première consiste à découper des pièces de GSB (175×25) mm² qui ont été préhydratés à l'aide d'un vaporisateur avec une masse d'eau connue. L'ensemble a été placé dans un tube dans lequel ils ont introduit un micropsychromètre. La seconde technique consiste à placer un carré de GSB de 25 mm de coté dans un récipient placé sur un bac contenant une solution saline dont la pression de vapeur est connue.

Les solutions salines utilisées et les valeurs de succion à l'équilibre correspondantes sont les suivantes :

Solution saline	Succion à l'équilibre (bars)
0,0218 M NaCl	1
0,0110 M NaCl	5
0,357 M NaCl	16
1,13 M NaCl	52

Tableau 5 : valeurs de succions correspondant aux différentes solutions salines

Le tableau 6 résume les valeurs de teneur en eau et succion obtenues par les deux techniques. Pour les essais à pression de vapeur, les échantillons ont été exposés durant 66 jours.

Teneur en eau %	Succion (bars)	Technique de mesure
		Teneur en eau du GSB à sa réception
17	--	
17	43	TM
18	44	TM
24	49	TM
28	43	TM
29	52	EV
31	25	TM
46	14	TM
54	16	EV
56	8	TM
66	7	TM
79	6	TM
89	5	EV
96	4	TM
101	1	EV
145	0	Directement trempé sous 14 kPa

Notations :

TM : micropsychromètre à thermocouple, EV : équilibre de vapeurs

1 bar \approx 1 atm \approx 10 m de CE

Tableau 6 : résultats teneur en eau-succion de Daniel et al. 1993

Daniel et al., (1993) déduisent qu'il existe une relation entre la teneur en eau à l'équilibre de la bentonite qui constitue le GSB et le potentiel en eau du sol (succion). Si la bentonite est placée contre un sol dont la succion est égale à 15 bars (ce qui correspond au point de flétrissement de certaines plantes) et le GSB enterré sous le sol, la bentonite va absorber l'humidité à travers le sol et s'équilibrera à une teneur en eau approximative de 50 %. Dans le cas, où la bentonite est placée dans un sol dont la succion est inférieure à 1 bar, la teneur en eau de la bentonite va atteindre la valeur de 100 % ou plus. Le temps requis pour que la bentonite absorbe l'eau et atteigne l'équilibre est d'une à trois semaines.

- ❖ Bouazza et al. (2002) ont effectué des essais avec trois types de GSB (on ne s'intéressera qu'au Bentomat) initialement préhydraté par immersion dans de l'eau dé-ionisée pour un temps déterminé puis les a stockés dans des sacs en plastique pour une période d'équilibre de 7 à 10 jours.

Ils ont trouvé que la perméabilité intrinsèque du GSB décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Ainsi, la présence d'une surcharge mécanique durant l'hydratation et la structure du GSB, contribuent également à la performance de la perméabilité. Des études récentes ont montré que la perméabilité du GSB variait largement avec la variation de la teneur en eau et avec le processus de fabrication (Didier et al. 2000, Bouazza et Vangpaisal 2000, Vangpaisal et Bouazza 2001).

Il a été remarqué que la perméabilité du Bentomat apparaissait plus sensible à la variation de la teneur que les deux autres GSB. Un très grand changement de la perméabilité intrinsèque du Bentomat a été atteint avec juste de faibles variations de teneur en eau. Ceci est dû à la forme de la bentonite, qui varie du granulé sec à un gel de bentonite.

Nous n'avons malheureusement pas pu nous procurer les valeurs des points expérimentaux, donnés par Bouazza.

- ❖ Babu et al., (2002) ont examiné le comportement de dessiccation du GSB ainsi que les facteurs responsables de ce dernier.

A cause d'un manque de données, Babu a utilisé les valeurs de Madsen et Nüesch (1995) et Al-Mukhtar et al. (1999). Les premiers ont présenté l'adoption isothermique des vapeurs d'eau pour différentes bentonites pour lesquelles la relation teneur en eau-succion est établie. Les autres, ont obtenu les caractéristiques des courbes de rétention d'eau pour des smectites pour lesquelles ils ont appliqué différents degrés d'humidité relative correspondant à différentes pressions de succion et ils ont reporté par la suite les teneurs en eau permettant et prévoyant un changement de volume.

Ces données sont analysées et ajustées afin d'obtenir les paramètres α , n et θ_s utilisant le programme de Van Genuchten et al. (1991) pour décrire les propriétés des sols non saturés. Le tableau 7 résume ces résultats.

Sol	Surface spécifique (m ² /gm)	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	observation
STx-1	560	0,736	0,00001	1,848	Données de Madsen et Nüesch (1995)
Montigel		0,611	0,00001	1,963	
Illite MC	490	0,508	0,00001	2,513	
Illite SA		0,231	0,00001	3,093	
Na-laponite	373		0,00001	2,000	Changement de volume permis
			0,00001	2,020	Changement de volume permis
			0,00001	2,083	Changement de volume non permis (Al-Mukhtar et al. 1999)

Tableau 7: paramètres de Van Genuchten pour la bentonite

1.3. Conclusion

En l'absence de données concernant les paramètres d'ajustement de Van Genuchten, et du fait du peu d'études établies sur la détermination des courbes de rétention des GSB, nous retiendrons pour la suite comme base de comparaison avec nos résultats expérimentaux, les paramètres de Babu, ajustés pour des GSB tel que :

$$\theta_s = 0,736 ; \quad \alpha = 0,00010 \text{ (cm}^{-1}\text{)} ; \quad n = 1,848$$

et $k_s = 5,0 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$

Les résultats de Daniel nous serviront à comparer nos valeurs expérimentales obtenues pour le Gundseal, par la technique du papier filtre, ce qui nous permettra de tenter la validation de cette mesure.

Les résultats obtenus par Bouazza sont très intéressants notamment ceux concernant le Bentomat et peuvent donner des interprétations plus compréhensives sur les mécanismes de transfert dans les étanchéités composites, seulement nous n'avons pas pu comparer ces données avec les nôtres.

Après avoir présenté les différents travaux effectués pour la détermination des courbes de rétention des GSB, nous présenterons dans ce qui va suivre les différentes techniques de mesure de la succion pour choisir celles qu'on adoptera pour notre expérimentation.

On a choisi, puisque la mesure peut s'effectuer sur l'ensemble, de considérer le GSB dans son entier.

2. Techniques de contrôle et de mesure de la succion

La succion est une grandeur physique difficile à mesurer, et diverses approches sont nécessaires pour couvrir toute la gamme des succions rencontrées dans les sols et qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mégapascals (Mpa). Cette difficulté technique est probablement l'une des causes du manque de données expérimentales relatives au comportement des sols non saturés, tant en termes mécanique que de transfert d'eau et d'air. Corney et al. (1958) ont cependant fourni très tôt une description très complète de la plupart des techniques de contrôle et de mesure de la succion dans les sols. De nombreuses techniques reposent sur l'utilisation de pierres poreuses céramiques de très fine porosité, qui ne peuvent être désaturées que sous des succions beaucoup plus fortes que celles appliquées aux sols : ces pierres restent donc toujours saturées, même lorsqu'elles sont soumises à des pressions d'air, et permettent d'assurer la continuité de l'eau entre le système de contrôle et de mesure, et le sol.

2.1. Contrôle par plaque tensiométrique

La plaque tensiométrique (figure 9) fait partie des premières techniques utilisées, elle consiste à mettre l'eau d'un échantillon sous tension en le mettant au contact d'une pierre poreuse céramique saturée d'eau, connectée à un récipient d'altitude variable par le biais d'un tube en U. un récipient placé plus bas que l'échantillon permet d'exercer une dépression égale à la hauteur d'eau. Ce système permet d'avoir une excellente précision aux très faibles succions, entre 0 et 10 kPa (1 m d'eau).

Dans des conditions normales, l'eau ne peut être mise sous tension que jusqu'à la limite imposée par la cavitation, qui est de 80 kPa pour une eau naturelle, ce qui définit la gamme tensiométrique (0-80 kPa). Cette gamme peut-être couverte avec un procédé analogue, en plaçant du mercure dans le tube en U (100 kPa \approx 76 mm de mercure).

Sur le système de la figure 10, la succion est imposée par une pompe à vide et le tube en U rempli de mercure sert de manomètre. Ce système peut permettre également de mesurer la succion d'un échantillon non saturé dans la gamme tensiométrique, en appliquant le vide nécessaire pour n'obtenir aucun mouvement du ménisque d'eau dans le tube horizontal.

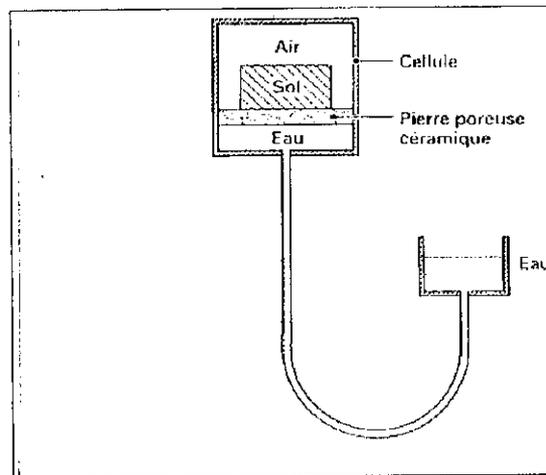


Figure 9 : principe de la plaque tensiométrique

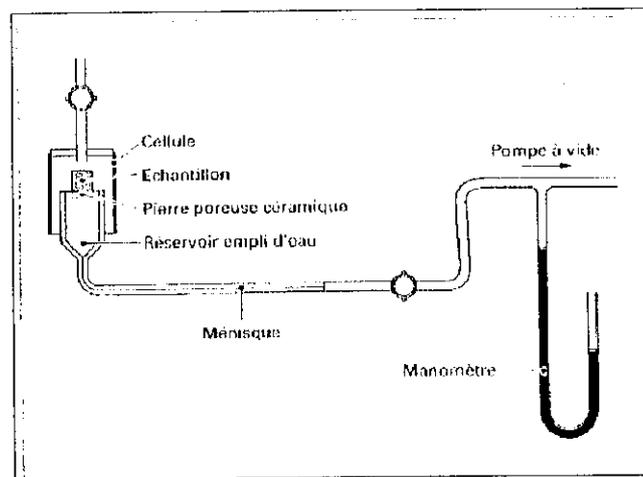


Figure 10 : plaque tensiométrique

2.2. Contrôle par « translation d'axes »

Cette technique a été mise en œuvre par Ridley et Wray (1995) à l'aide du dispositif présenté en figure 11 : il s'agit d'une cellule étanche à l'air dont la base, sur laquelle repose l'échantillon, est constituée d'une pierre poreuse céramique de fine porosité immergée dans un récipient d'eau à la pression atmosphérique ; comme on l'a vu, les pores de la pierre poreuse sont suffisamment petits pour qu'elle ne soit pas désaturée par la pression maximale d'air appliquée dans la cellule. La loi de Jurin montre qu'une céramique capable de contenir une pression maximale de 500 kPa devra avoir des rayons de pore inférieurs à $0,29\ \mu\text{m}$.

On peut également utiliser des membranes semi-perméables cellulosiques, posées sur une pierre poreuse normale ; ces membranes, qui sont à la base de la technique osmotique de contrôle de succion décrite plus loin, constituent une sorte de grillage avec une maille de l'ordre de 5 nm.

Il est nécessaire que le contact entre l'échantillon de sol à tester et l'élément poreux soit de très bonne qualité, pour faciliter la continuité de la phase liquide entre l'échantillon et la

Pierre poreuse fine. Il en résulte que la pression d'eau est maintenue nulle au sein de l'échantillon ($p_w = 0$).

La pression d'air étant fixée à une valeur positive supérieure à la pression d'eau, on impose artificiellement une valeur de succion positive :

$$h = p_a - p_w$$

(éq-55)

L'expérimentation consiste à placer l'échantillon sous pression jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint, ce qui se produit en quelques jours pour des échantillons de quelques centimètres tels que celui de la figure 11. une fois l'équilibre atteint, on relâche la pression et on extrait rapidement l'échantillon de la cellule, afin de déterminer par pesée sa teneur en eau sous la succion imposée.

Le principe de la translation d'axes a été adapté par les géotechniciens sur des appareils de mécanique des sols (oedomètres, essais triaxiaux, boîte de cisaillement). L'ordre de grandeur des succions maximales imposées avec cette technique est de 1,5 Mpa, ce qui impose la réalisation de cellules métalliques de confinement extrêmement fiables, vu l'énergie élastique emmagasinée par les volumes de gaz comprimé. Des extensions à plusieurs dizaines de MPa ont été réalisées dans le cadre d'études de la rétention de matériaux très plastiques pour l'étude des barrières ouvragées pour le stockage des déchets nucléaires, (Vilar, 1995).

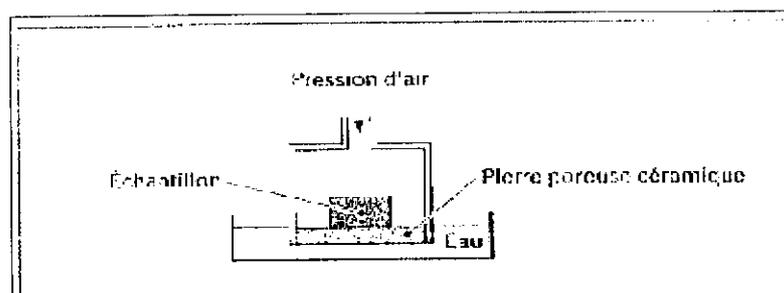


Figure 11: cellule de Richards pour le contrôle de succion par translation d'axes

2.3. Technique de contrôle osmotique

Cette technique découle directement de la biologie, où elle est utilisée en particulier pour les dialyses. Elle est basée sur l'utilisation de membranes semi-perméables et d'une solution aqueuse de molécules organiques de polyéthylène glycol (PEG) de grande taille, constituées de longues chaînes de radicaux éthyle (C_2H_4), ce qui leur confèrent une masse molaire considérable, pouvant aller de 1000 à 20000 (en grammes).

Comme l'eau peut traverser la membrane alors que les molécules de PEG en solution ne le peuvent pas du fait de leur grande taille, un échantillon mis au contact d'une membrane semi-perméable derrière laquelle circule une solution de PEG est soumis à une succion osmotique, d'autant plus forte que la concentration en PEG est élevée. Le diagramme de la figure 12 regroupe les différents essais effectués par divers chercheurs sur des PEG de 6000 et 20000, (Williams et Shaykewich, 1969), et les essais d'extension à fortes succions (12 MPa) sur des PEG de 1500, 4000, 6000 et 20000 (Delage et al., 1998). On observe une excellente compatibilité entre toutes les données et une relation unique, indépendante de la masse molaire, entre la concentration et la succion. Pour des succions inférieures à 6,25 MPa, la relation est linéaire et prend la forme simple :

$$h = 11.C^2$$

(éq-56)

De 6,25 à 12 MPa, la courbe s'infléchit légèrement.

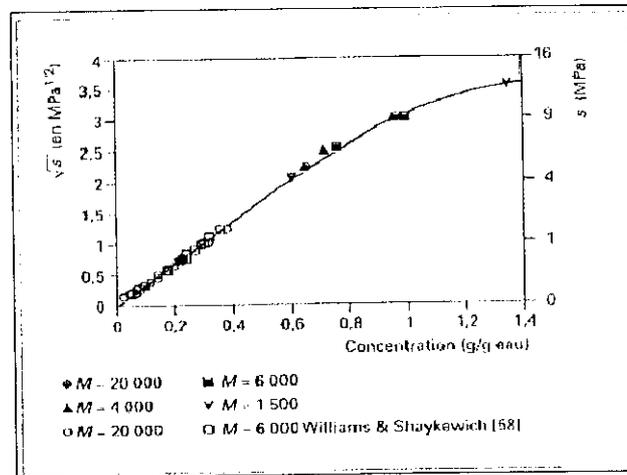


Figure 12 : technique osmométrique – relation succion et concentration

La mise en œuvre de cette méthode pour la détermination de la rétention d'eau se fait suivant le principe de la figure 13 :

un échantillon entouré d'une membrane osmométrique cylindrique est placé dans un bain de solution de PEG posé sur un agitateur magnétique. Des élastiques sont placés autour de l'échantillon de sol pour assurer un bon contact entre le sol et la membrane, et les transferts d'eau interviennent au travers de la membrane jusqu'à l'équilibre, au bout de quelques jours.

On extrait alors l'échantillon pour déterminer la teneur en eau. Du fait des échanges, la concentration de la solution varie légèrement, et on détermine sa valeur finale par réfractométrie, sachant que le degré Brix de la solution est très sensible aux variations de concentrations, Delage et al (1998).

L'intérêt majeur de cette technique est que la génération d'une succion positive ne se fait pas artificiellement par application d'une surpression d'air au sein de l'échantillon. La pression d'air reste égale à la pression atmosphérique, et c'est réellement le terme P_w qui est négatif, comme dans la réalité. Des succions atteignant 12 MPa peuvent être atteintes sans précautions particulières, à la différence de la technique de la surpression d'air, qui requiert à ces pressions d'importantes dispositions de sécurité.

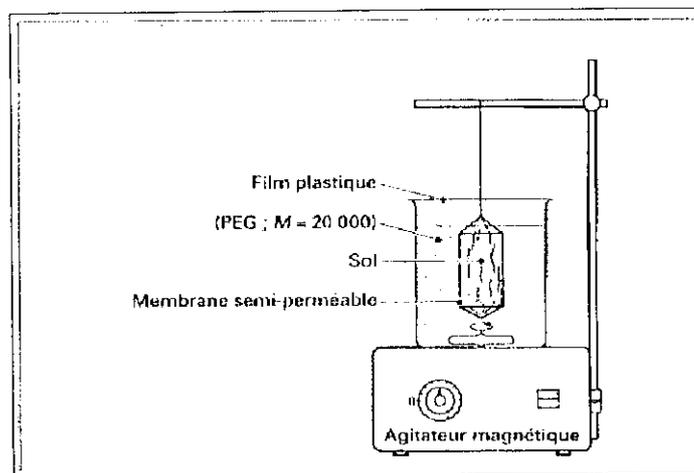


Figure 13 : Mise en œuvre de la technique osmométrique

2.4. Technique de contrôle par phase vapeur

Elle est basée sur la loi de Kelvin (Chapman, 1913). Elle consiste à placer un échantillon dans une atmosphère confinée à humidité contrôlée dans un dessiccateur, et à laisser les transferts d'eau s'effectuer sous phase vapeur jusqu'à l'équilibre, ce qui est assez long et peut durer jusqu'à une dizaine de jours, voire plus selon la taille de l'échantillon et la valeur de la succion. L'humidité relative peut être imposée en plaçant dans le dessiccateur une solution d'acide sulfurique à concentration donnée, ou une solution saline saturée (figure 14). Cette dernière méthode est plus simple d'emploi et moins dangereuse. Le tableau 8 donne les succions obtenues avec différents sels. On ne constate pas de limite supérieure en succion. Il est à noter cependant que les différentes références utilisées pour l'élaboration de ce tableau (Spencer et al (1926), Schneider (1960), Weast (1968), Tessier (1975) et Delage et al (1998)) donnent parfois plusieurs valeurs d'humidité relatives pour le même sel. Il est possible de préciser la valeur d'un sel donné en l'étalonnant à différentes concentrations vis-à-vis d'un sel dont la courbe concentration-humidité relative est bien établie. Il est préférable d'utiliser cette technique en conditions de température contrôlée à 20°C. L'inconvénient principal est la lenteur des échanges par phase vapeur.

Sel	Succion (MPa)	Humidité relative (%)
K_2SO_4	4,2	97
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	12,6	91,3
$(NH_4)_2SO_4$	29	81
NaCl	37,8	76
$NaNO_2$	57,3	66
$Mg(NO_3)_2$	82,4	55
K_2CO_3	137,8	44
KCH_3CO_2	182,1	20
KOH	331,9	9

Tableau 8 : relation humidité relative – succion – nature du sel (en solution aqueuse saturée)

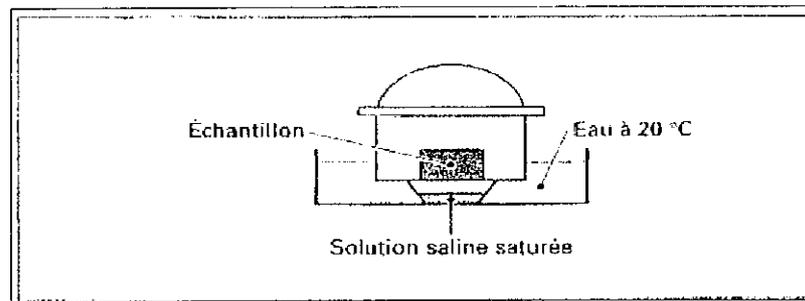


Figure 14 : contrôle de succion par phase pratique

2.5. Mesure tensiométrique de la succion

C'est la technique la plus répandue et la plus simple, elle illustrée dans la figure 15. c'est une mesure de la pression négative de l'eau sous tension, analogue, dans son principe, à celle des pressions positives ; il est cependant nécessaire d'utiliser une pierre poreuse céramique fine, qui doit rester saturée à tout niveau de succion, et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur, qui doit rester pleine d'eau. La parfaite saturation de la pierre céramique par l'eau désaérée est une condition essentielle au bon fonctionnement d'un tensiomètre. Dans le cas d'un capteur de pression électronique, la déformation de la membrane instrumentée se fera dans l'autre sens, que pour une pression positive. Il existe des tensiomètres à jauges de pression mécaniques avec cadran visuels, qui sont couramment employés pour la mesure *in situ* de succions inférieures à 80 kPa.

La limite classique de 80 kPa, due à l'apparition de la cavitation, a pu être repousser à une valeur étonnamment élevée de 1500 kPa dans le système tensiométrique récemment mis au point par Ridley et al (1993), présenté dans sur la figure 16. le principe de ce capteur est de réduire l'épaisseur de la chambre d'eau à une valeur proche du millimètre ; il semble que cette petite épaisseur d'eau réduise la probabilité de trouver un noyau (impureté, sel...) permettant l'initiation de la cavitation. L'intérêt majeur de cette extension est de combler le trou qui existait entre la tensiométrie classique (0 – 80 kPa) et la psychrométrie (> 1MPa).

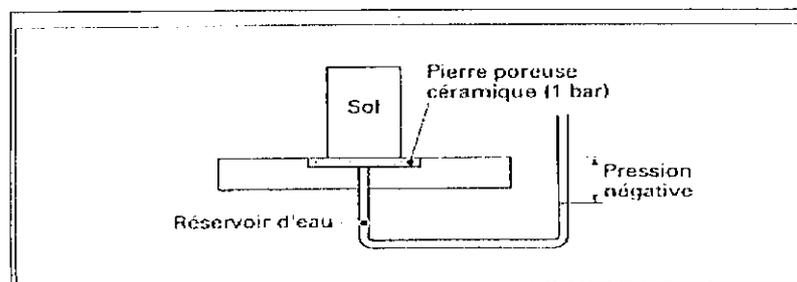


Figure 15 : principe de la mesure de la succion par tensiométrie

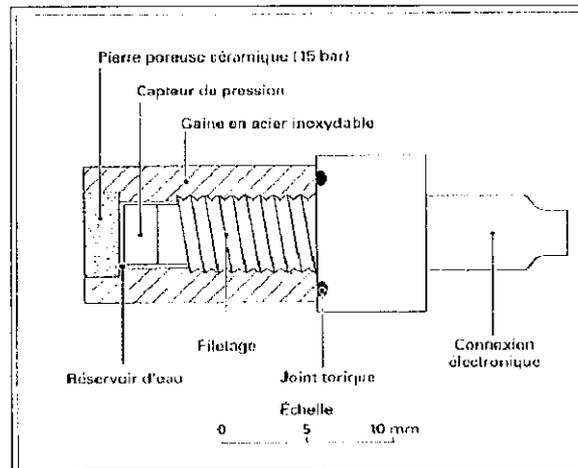


Figure 16 : tensiomètre de Ridley et al.

2.6. Mesure psychrométrique de la succion

Avec cette technique, on mesure l'humidité relative à proximité de l'eau interstitielle du sol non saturé, et on en déduit la succion par la loi de Kelvin. L'humidité relative est déterminée par la mesure de la température du point de rosée de l'atmosphère considérée, qui est d'autant plus faible que l'air est sec. Le psychromètre à thermocouple, (Spanner, 1951), fonctionne de la façon suivante : dans un premier temps, la jonction (chrome-constantan) du thermocouple est refroidie par effet Peltier en dessous du point de rosée, et il y a condensation d'une goutte d'eau liquide ; on laisse ensuite l'évaporation se produire, ce qui entraîne un abaissement de la température au niveau de la jonction et une force électromotrice due à l'effet Seebeck qui permet d'accéder à la valeur de l'humidité relative. Il s'agit d'une méthode assez sophistiquée dont les applications pratiques en mécanique des sols sont encore assez rares (Edil et al., 1981, Verbrugge, 1978, Zerhouni, 1995), limitée à une succion maximale de 7 MPa (95% d'humidité relative) au-delà de laquelle les molécules de vapeur d'eau sont trop rares pour parvenir à la condensation.

Dans le cas de micropsychromètre à miroir (Delage et al., 1998), la détection de la condensation se fait sur un miroir à température contrôlée. Un rayon optique est projeté sur ce miroir. La réflexion est ensuite analysée. Le refroidissement du miroir est géré par un système électronique qui identifie l'instant où des gouttes microscopiques perturbent le rayon optique. Des succions de plusieurs dizaines de MPa peuvent être ainsi mesurées.

2.7. Méthode du papier filtre

C'est une méthode simple et pratique, (Gardner, 1956, Collins et al., 1974, Mitchell, 1993, Fleureau et al., 1995) de mesure de succion, utilisable dans n'importe quel laboratoire disposant d'un système de pesée précis au $1/10000^{\text{e}}$ de gramme. Son principe est représenté sur la figure 17. La méthode est basée sur l'emploi d'un papier filtre dont la courbe de rétention d'eau a été préalablement déterminée au laboratoire ; elle consiste à insérer une triple épaisseur de papier filtre dans l'éprouvette dont on veut déterminer la succion et à attendre (au moins 24 h) l'équilibre des succions entre le sol et le papier filtre, en évitant toute évaporation : on peut paraffiner l'éprouvette ou l'envelopper soigneusement d'un film plastique. On extrait ensuite les papiers filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée par les particules de sol, par pesée au $1/10000^{\text{e}}$. La

connaissance de la teneur en eau et de la courbe de rétention d'eau permet d'accéder à la succion du papier filtre et donc du sol.

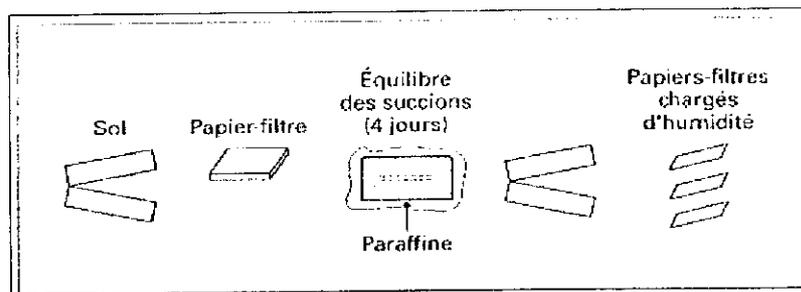


Figure 17 : Méthode du papier-filtre

2.8. Mesures de succion par d'autres systèmes

D'autres systèmes de mesure de succion ont été décrits par certains chercheurs (Ridley et al., 1995). Une méthode ancienne consiste à mettre en contact le sol à tester avec des corps poreux, dont la variation de résistivité en fonction de la teneur en eau a été étalonnée, et à mesurer la résistivité du corps, une fois l'équilibre hydrique avec sol atteint. La connaissance de la courbe de rétention d'eau du corps permet d'obtenir la succion à partir de la teneur en eau. Ce système, applicable pour des succions comprises entre 50 kPa et 3 MPa, est très sensible à la salinité de l'eau interstitielle, et son utilisation est de plus en plus rare.

Une autre propriété du corps poreux dépendante de la teneur en eau, utilisée pour obtenir une mesure de succion, est la conductivité thermique (Sattler et al., 1989). Ces capteurs ne sont pas très performants à l'usage.

3. Conclusion

Dans le cadre du stage, trois techniques ont été retenues pour la mesure de la succion des GSB:

- La méthode du papier filtre qui est une méthode normalisée, nécessitant très peu de matériels et de compétences au laboratoire pour sa mise en œuvre ;
- La méthode des micropsychromètres à thermocouple ; étant donné l'existence de l'appareillage au laboratoire et en plus du fait qu'elle a été utilisée par de quelques chercheurs dans le cadre de la détermination des courbes de rétention d'eau des GSB. (Daniel et al., 1993, Bouazza, 2002) ;
- La méthode de contrôle par phase vapeur, qui est également une technique normalisée, facile à mettre en œuvre et déjà utilisée pour le même objectif que le nôtre par Daniel et al.(1993).

Remarques :

Lors de notre stage, nous n'avons effectué des mesures de succion qu'avec la méthode du papier filtre.

En effet, l'ancienneté de l'appareillage des michropsychromètres à thermocouple (1986) a rendu certaines de ses composantes défailtantes et a fait que nous n'avions pas pu obtenir la réponse psychrométrique attendue.

La technique de contrôle par phase vapeur, n'a pas été testée car nous n'y sommes pris en retard vue la durée d'exposition des échantillons (66 jours), seulement il serait intéressant par la suite de tenter de valider cette technique avec les résultats donnés par Daniel (1993).

Il est également à noter, que les seuls dispositifs existants au laboratoire, ne pouvaient pas s'adapter aux GSB. De plus, on ne disposait pas de moyens expérimentaux lourds permettant la détermination de la succion et leur acquisition n'était pas prévue dans le cadre du stage.

Les protocoles des différentes méthodes sont présentés dans la partie II du mémoire, consacrée aux résultats des expérimentations.

-Partie II-
EXPERIMENTATIONS

-Partie II-

Expérimentations

Dans cette seconde partie on présente les différents protocoles de mesure établis au cours de ce stage. Y sont également présentés les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leurs interprétations.

Le choix des procédés de mesure s'est basé sur la possibilité des différentes techniques citées en chapitre 4 de la première partie à s'adapter à notre matériau d'étude. Seules la méthode du papier filtre, celle des micropsychromètres et enfin la technique du contrôle de succion par phase vapeur ont été retenues pour la détermination de la succion du GSB.

Nous n'avons pas pu mettre en œuvre tous les dispositifs de mesure. Le seul qui a conduit à l'obtention de mesures est celui de la méthode du papier filtre qui est la plus simple et qui ne nous a pas demandé de moyens expérimentaux lourds.

1. Présentation des matériaux étudiés

Nous avons testé deux types de GSB : le Gundseal et le Bentomat. Ils ont été présentés dans le tableau 1 (cf. partie I, chapitre 1).

1.1. Le Bentomat

La bentonite de sodium naturelle est conditionnée entre un géotextile de polypropylène non tissé (220 g/m^2) et un géotextile de polypropylène tissé (110 gr/m^2). Ce « Sandwich » aiguilleté à haute densité confine de manière compacte et homogène les granulés de bentonite (minimum 5 kg au m^2 – maximum $6,8 \text{ kg au m}^2$). Le conditionnement d'une telle bentonite rend le géocomposite BENTOMAT extrêmement robuste, flexible, et facile d'application pour un grand nombre d'emplois. Le BENTOMAT saturé sous une contrainte de 40 kPa possède après gonflement un coefficient de perméabilité de $1 \times 10^{-12} \text{ m/s}$. Son épaisseur est de 6 mm .

1.2. Le Gundseal

Le complexe Gundseal est l'unique géosynthétique bentonitique qui associe les propriétés d'expansion et d'étanchéité de la bentonite et celle de faible perméabilité d'un géofilm en polyéthylène. Cette combinaison de caractéristiques ne se retrouve dans aucun autre géosynthétique. Le Gundseal se constitue d'une couche de bentonite de sodium de haute qualité (49 kg/m^2) collée sur une géomembrane. La perméabilité effective de la bentonite est égale à $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$.

2. Protocoles élaborés pendant le stage

Deux protocoles ont été élaborés durant le stage celui du papier filtre et celui du microspectromètre à thermocouple.

Une étape préliminaire commune aux deux protocoles consiste à déterminer la teneur en eau initiale du GSB ainsi que la masse d'eau nécessaire à la préhydratation du GSB.

2.1. Procédures préliminaires

2.1.1. Détermination de la teneur en eau initiale du GSB

- Couper trois pièces circulaires d'un même GSB de 5 cm de diamètre à l'aide d'une presse et d'un emporte pièce ;
- Peser chacune des pièces en notant leur masse ;
- Placer les petites pièces dans des piluliers en verre et les passer à l'étuve à 105°C pendant 24 heures ;
- Repeser le lendemain les petites pièces de GSB directement sorties de l'étuve en notant leur masse ;
- Reporter les résultats obtenus sur une feuille de calcul et en déduire la teneur en eau moyenne du GSB.

2.1.2. Détermination de la masse d'eau nécessaire à la préhydratation du GSB

- Pour chaque teneur en eau étudiée, découper deux pièces circulaires de GSB de 10 cm de diamètre à l'aide d'une presse et d'un emporte pièce ;
- Peser les différentes pièces et noter leur masse ;
- Déterminer la masse d'eau à ajouter à la masse d'eau initiale (existante) pour atteindre la teneur en eau requise ;
- Préhydrater les échantillons à grande teneur en eau par immersion et les autres par vaporisation d'eau du robinet à l'aide d'un spray (il est conseillé de commencer avec les grandes teneurs en eau car celle-ci mettent du temps à être atteintes) ;
- Vérifier que chaque échantillon a bien atteint la teneur en eau requise, en pesant le GSB (pour les grandes teneur en eau ; pour les faibles teneur en eau, les GSB sont préhydratés tout en étant sur la balance) ;
- Etiqueter tous les GSB (n°, W%, date) ;
- Placer les GSB dans des sacs plastiques hermétiques pour une durée d'une semaine afin d'assurer une bonne homogénéisation de la teneur en eau. Les échantillons n'étaient pas sous contrainte lors de cette phase d'homogénéisation.

2.2. Technique du papier filtre

Le principe de la méthode consiste à placer trois papiers filtre entre deux pièces de GSB et l'ensemble doit être bien confiné ensuite, placé dans un container hermétique pendant 7 jours afin de permettre aux différentes pressions de vapeur (pression de vapeur du pore d'eau dans l'échantillon, pression de vapeur du pore d'eau dans le papier filtre, et la pression de vapeur partielle de l'eau dans l'air à l'intérieur du container) d'atteindre leur équilibre.

On détaille dans la suite, le protocole de mesure, adapté de la norme ASTM D5298-92 qui a été utilisé.

Procédure :

Préparation du papier filtre (Whatman-42)

- Trois papiers filtres empilés seront utilisés pour chaque teneur en eau. Le papier filtre central doit avoir un diamètre inférieur de 3 à 4 mm (66-67 mm, selon la norme) à celui des deux autres (70 mm). Nous avons pris dans notre cas un diamètre de 55 mm pour éviter tout risque de contamination par les particules du sol ;
- Découper le papier filtre central soit aux ciseaux soit à l'aide d'un emporte pièce, en utilisant des gants afin d'éviter toute contamination ;
- Mettre tous les papiers filtre à l'étuve (105 °C) et les laisser au moins 16 heures ;
- Enlever les papiers filtres de l'étuve et les placer rapidement (quelques secondes) dans un dessiccateur jusqu'à leur utilisation.

Procédure de mesure de la succion matricielle

- Placer rapidement les trois papiers filtres empilés entre deux pièces de GSB de même teneur en eau en s'assurant qu'ils sont en contact direct avec le GSB ;
- Emballer le sandwich obtenu dans du film plastique de type cellophane en le compactant avec la paume de la main ;
- Le placer ensuite dans une boîte hermétique fermée et étiquetée (w%, n°échantillon, date) ;
- Placer les boîtes dans une caisse isolante dans un laboratoire climatisé à $\pm 1^\circ\text{C}$;
- Laisser les échantillons dans la caisse pendant 7 jours afin que la succion atteigne l'équilibre ;
- Mesurer l'épaisseur ainsi que le diamètre des différents échantillons ;
- Peser la tare ou le récipient dans lequel sera récupéré le papier filtre central puis effectuer le transfert rapide du papier filtre à l'aide d'une pince, vers le récipient. Fermer le récipient, le peser puis l'étiqueter ;
- La pesée du papier filtre doit être effectuée sur une balance au $1/10000^{\text{ème}}$ de gramme ;
- Placer le papier filtre ensuite dans l'étuve à 105°C et le laisser toute la nuit ;
- Une fois sorti de l'étuve, le placer directement dans le dessiccateur. Le peser rapidement ;
- Noter toutes les masses sur la fiche de calcul.

Théorie et calculs :

- Déterminer la teneur en eau du papier filtre recueilli des différents sandwiches, tout en suivant les étapes de calculs présentées dans la fiche d'évaluation ;

La teneur en eau du papier filtre w_f en (%), est calculée comme suit :

$$w_f = \frac{M_w}{M_f} \cdot 100$$

(éq-57)

où :

M_w : masse de l'eau dans le papier filtre

M_f : masse du papier filtre sec

- Convertir la teneur en eau en succion en utilisant l'une des courbes de calibration du papier filtre Whatman-42. Pour un même rang de potentiel en eau ($2,9 < pF < 4,8$), des chercheurs ont établi les relations suivantes :

➤ Fawcett et Collis-George (1967) ont donné l'équation suivante :

$$pF = 5,777 - 0,060.w_f \quad (\text{éq-58})$$

➤ Hamblin (1981) a présenté la relation suivante :

$$pF = 6,281 - 0,0822.w_f \quad (\text{éq-59})$$

➤ Chandler et al (1986) ont donné une équation formulée à partir des tests oedométriques :

$$pF = 5,802 - 0,061.w_f \quad (\text{éq-60})$$

où :

pF : potentiel en eau, $pF = \log_{10}(\text{hauteur d'une colonne d'eau en cm})$

w : teneur en eau du papier filtre (%)

- Afin d'obtenir la valeur de la succion matricielle, on utilisera la relation suivante qui lie le potentiel en eau à la succion matricielle :

$$pF = \log_{10}(\text{hauteur de colonne d'eau en cm}) \quad (\text{éq-61})$$

Nous avons choisi d'utiliser la relation proposée par Hamblin (1981). C'est la plus utilisée dans la littérature et elle couvre une large gamme de succions.



Figure 18 : Matériels utilisés pour la technique du papier filtre

La figure 18 présente le matériels utilisés pour la technique du papier filtre :

- Des tares en verre ;
- Des sacs en plastique ;
- Etiquettes ;
- Pince.

En plus d'un dessiccateur et d'un vaporisateur d'eau.

2.3. Technique du micropsychromètre

Les psychromètres ont récemment reçu une étendue d'utilisation dans la mesure de la succion du sol en laboratoire. Selon Edil et al (1998), l'utilisation des psychromètres est limitée aux succions de sol supérieures à 100 kPa. Le micropsychromètre le plus utilisé est celui fabriqué par WESCOR Inc référence HR-33T précis pour des valeurs pouvant atteindre 100000 kPa.

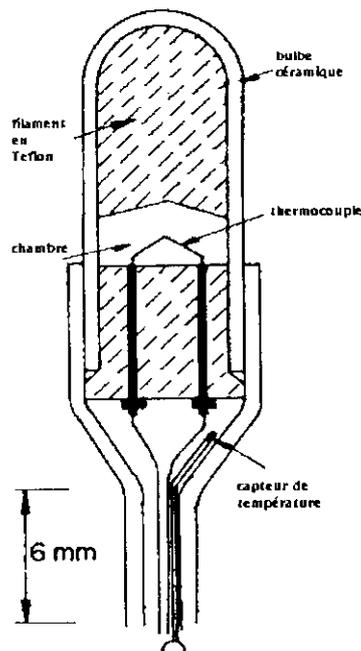


Figure 19 : schéma d'un capteur micropsychromètre

Les thermocouples utilisés dans l'ingénierie technique sont des thermocouples miniatures enfermés dans des bulbes en céramique ou à grilles (figure 19). Ils mesurent l'humidité relative en utilisant la technique de refroidissement par effet Peltier (partie I : chap IV).

La technique des micropsychromètres n'a pas pu être réalisée au cours du stage, à cause de l'ancienneté de l'appareillage (1986). Nous avons tenté avec l'équipe de métrologie et instrumentation de le remettre en marche, seulement nous n'avons pas obtenu les résultats attendus. Nous avons également essayé de contacter : les revendeurs (WESCOR) pour une éventuelle révision ainsi que les personnes l'ayant utilisé, mais ceci nous a pas avancer dans nos mesures.

Nous avons d'abord procédé à une révision électronique du HR-33T, grâce à laquelle nous avons pu remettre en fonctionnement la batterie.

J'ai malgré tout mis au point le protocole de mesure qui serait à utiliser pour mettre cette méthode en application, méthode dont le protocole est présenté dans la suite de ce paragraphe.

Procédure :

Equipements

- L'appareil utilisé est fabriqué par WESCOR Inc (Wescor HR-33 T Dew-point microvoltmeter), précis pour une gamme de 155-7000 kPa. Il est constitué d'un microvoltmètre et de mini-capteurs ;
- Des tubes à essais dans lesquels seront placés les échantillons de GSB à tester ;
- Des bouchons en plastique perforés qui assureront la bonne fermeture des tubes et par lesquels on fait passer les mini-capteurs ;
- De la boue (colle) plastique qui va sceller les petites ouvertures entre les fils des capteurs et le bouchon ;
- Boîtes hermétiques qu'on remplira de mousse en plastique/caoutchouc afin de minimiser les variations de température dans les tubes à essais ;
- Une pincette ;
- Des solutions de NaCl à différentes molarités serviront à étalonner les capteurs (voir tableau ci-dessous).

Molarité (M)	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
0,1 M	-0,447 MPa	-0,454 MPa	-0,462 MPa	-0,470 MPa	-0,477 MPa
0,2 M	-0,884 MPa	-0,900 MPa	-0,915 MPa	-0,930 MPa	-0,946 MPa
0,5 M	-2,220 MPa	-2,241 MPa	-2,281 MPa	-2,322 MPa	-2,362 MPa
1,0 M	-4,459 MPa	-4,550 MPa	-4,640 MPa	-4,729 MPa	-4,815 MPa

Tableau 9 : relation potentiel en eau-concentration de NaCl adapté par Lang (1967)

Calibration

- Nous choisissons trois solutions de NaCl de molarités différentes pour calibrer les psychromètres ;
- On remplit quatre récipients de solution de NaCl de même molarité ;
- Les récipients sont fermés avec les bouchons en plastique à travers lesquels on va introduire les micropsychromètres ;
- Les ouvertures entre les fils du capteur et le bouchon seront fermées par de la colle plastique ;
- Les récipients seront ensuite placés dans des boîtes hermétiques remplies de mousse (figure 20) ;
- Après deux heures, on prend la lecture sur le potentiel de sortie du micropsychromètre une fois que l'équilibre des vapeurs est atteint ;

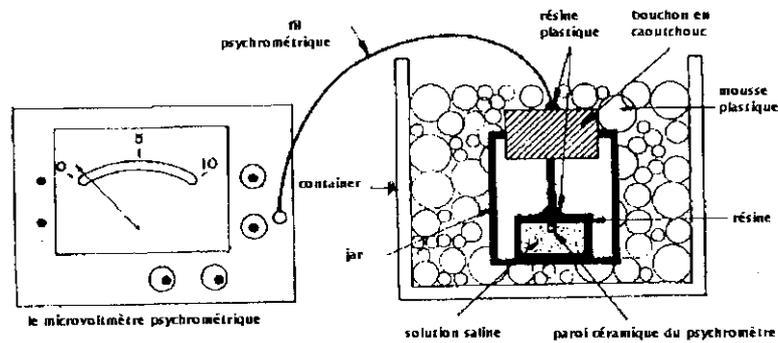


Figure 20 : l'équipement utilisé pour la calibration du micropsychromètre

- Une fois l'équilibre atteint, les potentiels de sortie E_T (en microvolts) du micropsychromètre sont convertis en un potentiel équivalent de sortie à la température de calibration de 25°C , E_{25} en utilisant l'équation suivante :

$$E_{25} = \frac{E_T}{(0,325 + 0,027.T)} \quad (\text{éq-62})$$

où T est la température ($^\circ\text{C}$)

- Le potentiel E_{25} est ensuite tracé en fonction de la succion et ainsi répété pour les deux autres molarités afin d'obtenir la courbe de calibration pour les différents psychromètres (figure 21).

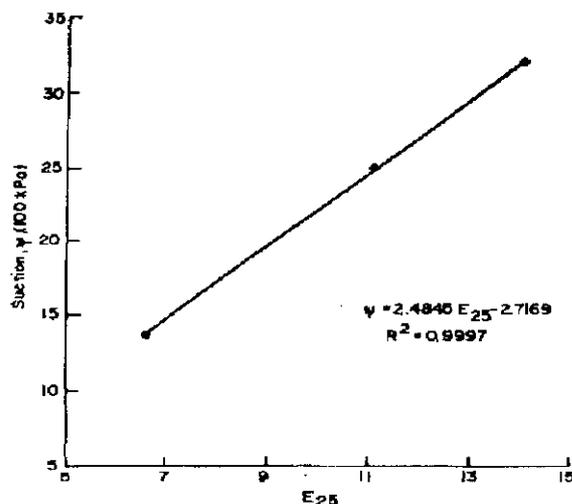


Figure 21: courbe de calibration du micropsychromètre

Procédure de mesure

- Découper des échantillons de GSB de dimensions $175 \times 25 \text{ mm}^2$ (selon les tests de Daniel, 1993);
- Déterminer la teneur en eau initiale des GSB afin de déterminer la masse d'eau à rajouter pour les porter à la teneur en eau voulue ;
- Préhydrater les GSB à l'aide d'un spray ou par immersion ;

- Introduire le GSB à l'intérieur du tube à essai, en s'assurant que la bentonite est bien orientée vers l'intérieur ;
- Fermer les tubes avec les bouchons puis introduire les psychromètres à l'intérieur du tube, de manière à ce qu'ils soient parallèles à l'axe du tube et non en contact direct avec la bentonite du GSB ;
- Vérifier qu'il n'y a pas d'ouvertures, qui risquent de modifier la teneur en eau de l'ensemble ;
- Les tubes sont ensuite placés dans un container hermétique ;
- Les lectures seront faites sur une période de 2 semaines jusqu'à ce que le point d'équilibre soit atteint ;
- Des lectures de potentiel micropsychrométrique et de température seront notées et la procédure ainsi répétée au moins trois fois par jour jusqu'à ce que les lectures successives se stabilisent, indiquant ainsi que l'équilibre des différentes pressions de vapeur est atteint.
- Les lectures s'effectuent par deux méthodes : par le mode psychrométrique et/ou par le mode du point de rosée. Les deux modes donnent la même valeur de potentiel en eau, seulement le premier est le plus affecté lors de changements importants d'ambiance de température. Pour cette raison, la mesure par le point de rosée est préférable.

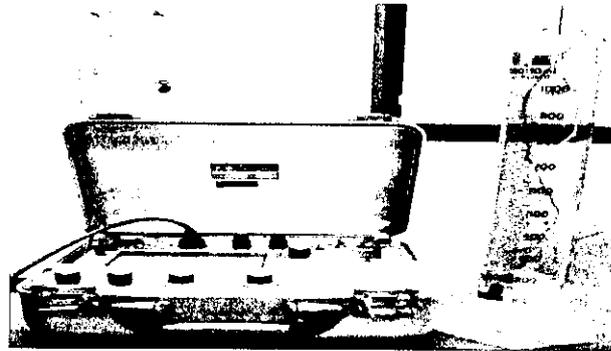


Figure 22: le microvoltmètre

Théorie et calculs

- La succion totale a été exprimée par Snethen (1980) comme suit :

$$\psi = \frac{1,058.RT}{V} \cdot \text{Log}_e \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

(éq-63)

où :

ψ : succion totale

R : constante relative des gaz

T : température absolue

V : le volume occupé par une mole de vapeur d'eau

P : pression de vapeur de l'eau

P_0 : pression de vapeur d'eau à l'état de référence

$\frac{P}{P_0}$: humidité relative de l'eau du sol sous des conditions d'équilibre

- Convertir le potentiel de sortie du micropsychromètre à une température donnée à un potentiel équivalent, en utilisant l'équation (éq-62) ;
- Ce dernier potentiel est à son tour converti en une succion de sol utilisant l'équation de calibration spécifique au micropsychromètre, donnée par la relation (Cokca, 2000):

$$\psi = 2,4845.E_{25} - 2,7169 \quad (\text{éq-64})$$

- La teneur en eau du GSB est déterminée une fois les tests finis en effectuant des pesées avant essai puis après séchage de l'échantillon à la fin d'essai ;
- Les valeur de succion obtenues sont ensuite tracées en fonction des teneurs en eau du GSB sur un graphique semi-logarithmique afin d'établir la courbe de rétention du GSB (figure 23).

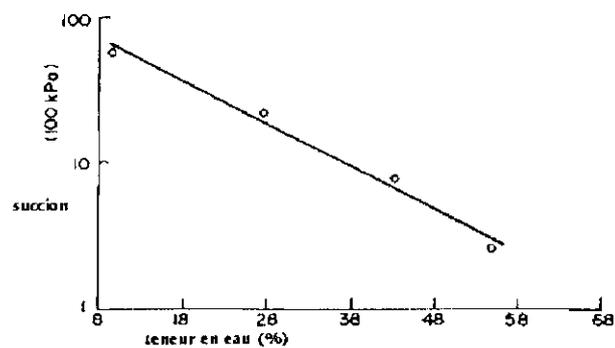


Figure 23: relation typique teneur en eau-succion

La relation est telle que :

$$\log_{10} \psi = A - B.w \quad (\text{éq-65})$$

où :

- ψ : est la succion totale sans aucune contrainte mécanique
- A : est la valeur de succion à la teneur en eau 0
- B : pente de la courbe
- w : teneur en eau du GSB

la figure 24 présente un micropsychromètre à thermocouple :

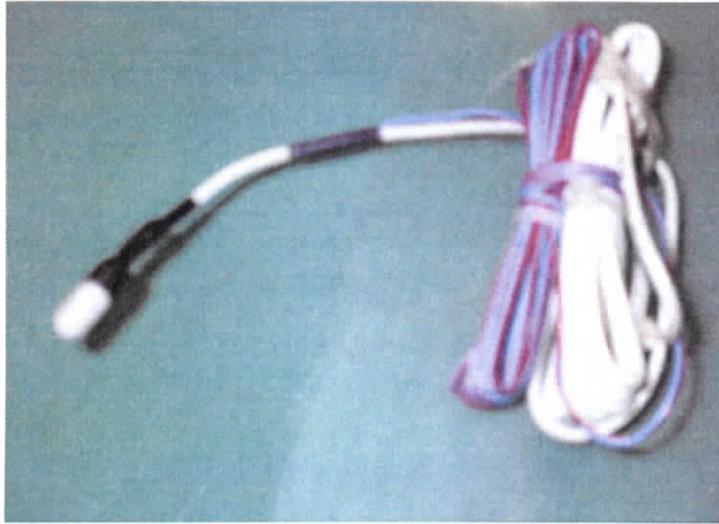


Figure 24: capteurs

Observations :

Avant de passer à la phase de calibration, on a dû vérifier pour chaque capteur que la jonction était en bon état et qu'elle ne présentait aucune discontinuité.

Une fois le tri des bons capteurs effectué, on a étalonné les micropsychromètres avec des solutions de NaCl de différentes molarités en vérifiant la réponse en π_v (mode de point de rosée) et/ou en mode psychrométrique.

Seule la lecture sur la température a été obtenue et du fait que la mesure du potentiel n'a pu être lue, nous avons préféré arrêter les investigations menées sur l'utilisation de cette technique.

L'intérêt de l'utilisation des micropsychromètres est qu'ils permettent de mesurer des succions supérieures à 100 kPa (également utilisés pour des valeurs de succions supérieures à 100000 kPa, (Wray, 1984)).

3. Résultats et interprétations des expérimentations réalisés par la méthode du papier filtre

Deux séries de mesures ont été effectuées au cours du stage, la première a permis le calage du protocole, la seconde série a permis d'obtenir les résultats qui sont présentés dans la suite.

Nous présentons d'abord les résultats obtenus pour le Gundseal, ce qui nous a permis d'une part de les comparer avec ceux de Daniel, et d'autre part de valider la méthode de mesure avec le papier filtre.

3.1. Résultats du Gundseal

Avant de mesurer la succion, des calculs préliminaires ont été effectués. La fiche de ces calculs est présentée par le tableau A-1 ; elle concerne :

- La détermination de la teneur en eau massique initiale du GSB ;

- La détermination de la masse d'eau à ajouter au GSB pour leur préhydratation ;

Le tableau A-2 représente la fiche d'évaluation de la succion du GSB, par l'utilisation des différentes relations citées dans la procédure de mesure du papier filtre. Nous nous sommes basés sur la relation de Hamblin (1981) pour nos interprétations car elle couvre une large gamme de succions de plus c'est l'une des plus utilisées. Dans ce qui va suivre, les graphes notés Hamblin correspondent à nos résultats expérimentaux.

La relation teneur en eau-succion du Gundseal est présentée sur la figure 25. la succion varie entre $3,98.10^{-3}$ et $8,03$ kPa pour des teneurs en eau allant de 17 à 145%. La comparaison entre nos résultats et ceux de Daniel montre que les courbes ont relativement la même allure. Et pour les mêmes valeurs de teneurs en eau, les valeurs de succion obtenues ne diffèrent pas beaucoup de celles données par Daniel, elles sont du même ordre de grandeur. Ce qui permet de valider la technique du papier filtre.

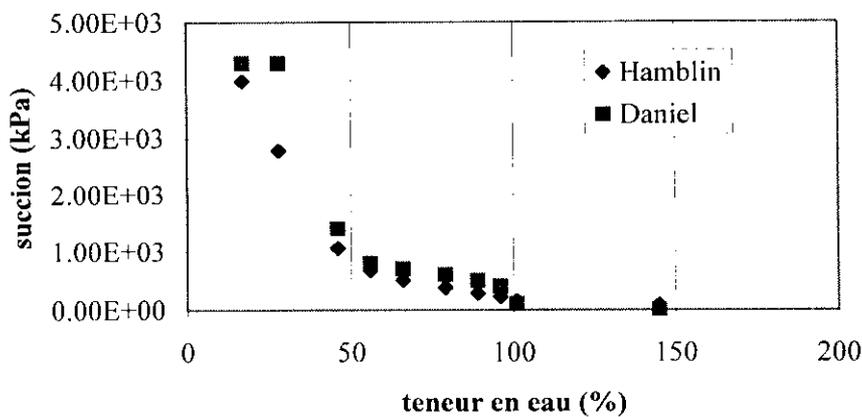


Figure 25 : comparaison des résultats obtenus avec ceux de Daniel

On peut résumer les résultats sur le tableau suivant :

Type de sol-succion	Teneur en eau approximative de la bentonite dans le Gundseal (%)
Sol extrêmement sec (succion $> 1,5.10^3$ kPa)	< 50 %
Sol humide (10^2 kPa \leq succion $\leq 1,5.10^3$ kPa)	50%-100%
0 kPa \leq succion $\leq 10^2$ kPa	100%-140%
Sol mouillé (\approx saturé), succion ≈ 0	> 140 %

Tableau 10 : résumé des résultats du Gundseal

Pour le passage aux relations de Van Genuchten, il nous a fallu transformer les valeurs de teneurs en eau massique en teneur en eau volumique. La relation qui lie la teneur en eau volumique à la teneur en eau massique est donnée par l'expression (éq-6):

$$\theta_v = w \frac{\gamma_d}{\rho_w}$$

Nous avons considéré qu'à saturation, la teneur en eau volumique à saturation est égale à la porosité du GSB, ceci en faisant l'hypothèse que le GSB est un matériau poreux. Ce qui nous a mené à déterminer la valeur du volume des vides pour le GSB, un paramètre qui n'était pas évident à déterminer.

C'est pour cette raison qu'il était important d'évaluer l'épaisseur et le diamètre de tous les échantillons à la fin de la période de mesure.

On s'est référé au rapport du BRGM (2002) sur lequel est définie une expression de volume des vides :

$$V_v = \text{epf} \cdot S \cdot \left[\frac{(M_{st} - MS_g \cdot S)}{\gamma_{sb}} \right] + \left(\frac{MS_g \cdot S}{\gamma_{sg}} \right) \quad (\text{éq-66})$$

où :

epf : épaisseur du GSB

S : surface du GSB

M_{st} : masse sèche totale

MS_g : masse surfacique des géotextiles g/m^2

γ_{sb} : poids volumique des grains solides de la bentonite

γ_{sg} : poids volumique des grains solides des géotextiles

Les calculs sont donnés en annexe dans le tableau A-3.

La figure 26 permet la comparaison des courbes obtenues avec les différentes équations données pour la détermination de la succion. On constate bien que l'écart n'est pas très important entre les différentes courbes. Celles de Fawcett-Collis et Chandler sont presque confondues, elles ont la même pente. Aussi, nous remarquons qu'elles ont toutes la même forme et qu'elles couvrent bien la même gamme de succion (pF).

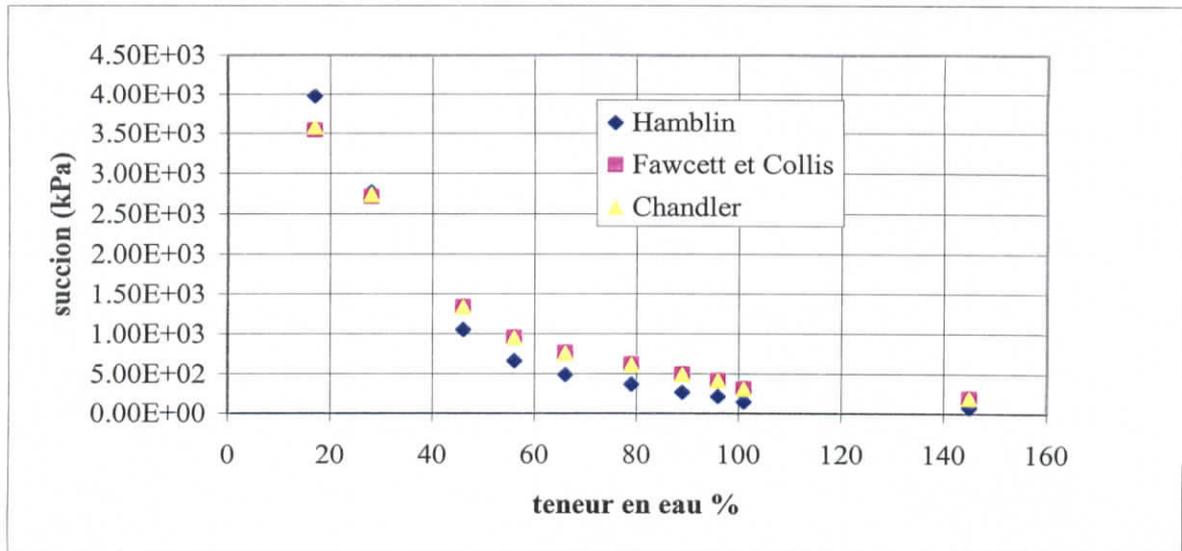


Figure 26: comparaison des valeurs de succion avec les différentes équations proposées

La figure 27 permet de comparer les résultats obtenus en utilisant la relation de Hamblin (1981) avec ceux du calage des résultats avec les paramètres de Babu ($\alpha = 1,00 \cdot 10^{-4} \text{kPa}^{-1}$ et $n = 1,484$) et notamment avec le calage que nous avons effectué avec les paramètres de Van Genuchten en adoptant la courbe donnée par Babu (2002). On constate qu'il n'y a pas un grand écart entre les différentes courbes.

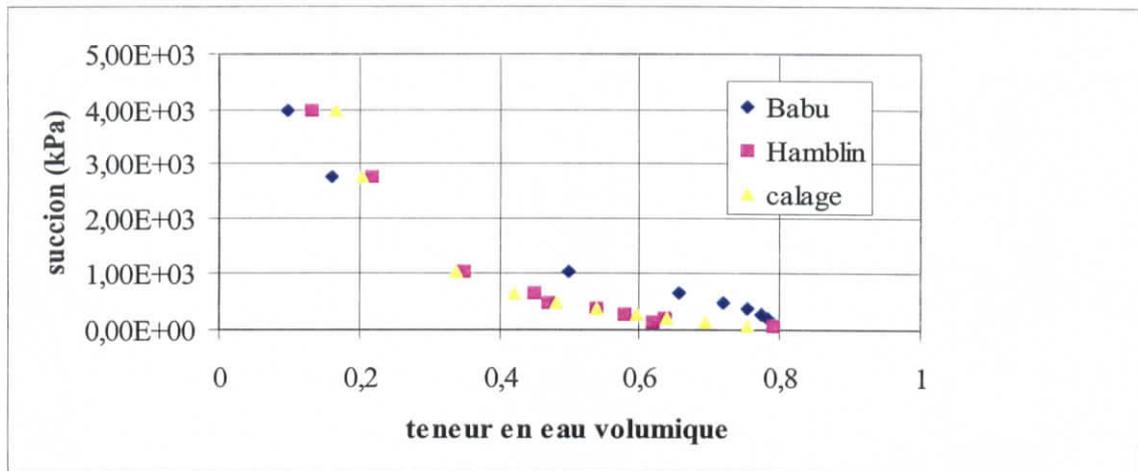


Figure 27: comparaison des différentes courbes de rétention obtenues

Avec notre ajustement (tableau A-4 et A-5), nous avons obtenu les paramètres suivants :

$$\alpha = 4,23 \cdot 10^{-3} (\text{kPa}^{-1}) \text{ et } n = 1,55$$

Ce qui nous a permis d'avoir la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la succion.

3.2. Résultats du Bentomat

La figure 28 donne la relation liant teneur en eau massique-succion du Bentomat. Cette courbe de rétention est comparée à celle donnée par Daniel (1993) pour le Gundseal. Cette dernière courbe nous a servi comme comparaison pour voir la gamme de variation du potentiel en eau ainsi que l'allure qu'avait la courbe. Les deux courbes n'ont pas la même allure du fait qu'elles concernent deux produits différents.

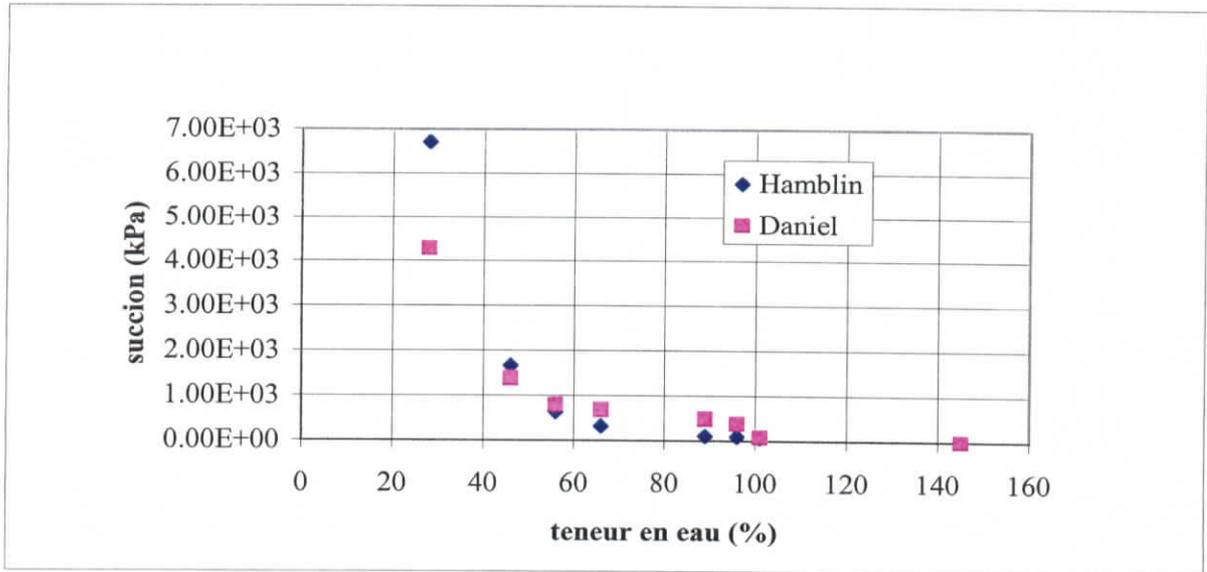


Figure 28: comparaison de la courbe de Daniel (Gundseal) avec celle du Bentomat

Le potentiel en eau du Bentomat varie entre $6,72 \cdot 10^3$ kPa et 5,08 kPa pour une teneur en eau massique allant de 28% à 145% comme présenté sur la figure 28.

Au voisinage de $7,81 \cdot 10^1$ -5,08 kPa, la succión diminue pour des teneurs en eau très grandes, supérieures à 100%.

Nous avons comparé les différentes courbes obtenues avec les trois relations citées dans la procédure de calibration du papier filtre (figure 29) :

- Les courbes données par Fawcett et Collis-Goerge (1967) et Chandler et al (1986) sont presque confondues : elles possèdent une même pente. La courbe de Hamblin quant à elle, est au-dessus des deux autres avec une pente plus grande ;
- On constate que les trois courbes couvrent bien la même gamme de potentiel en eau : $2,9 < pF < 4,8$.

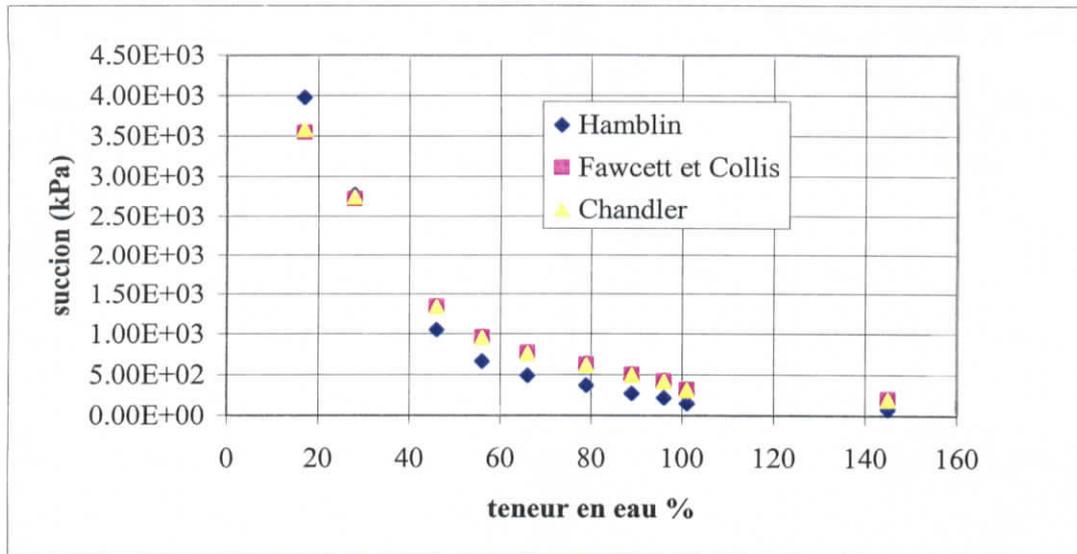


Figure 29: comparaison des courbes de rétention obtenues avec les différentes équations proposées

De même que pour le Gundseal, il a fallu déterminer la teneur en eau volumique pour passer au calage de la courbe avec les équations de Van Genuchten. Nous avons procédé de la même façon que précédemment (tableau A-6 jusqu'à A-8).

La figure 30 permet de comparer les résultats obtenus en utilisant la relation de Hamblin avec ceux du calage des résultats avec les paramètres de Babu, mais également avec les paramètres de Van Genuchten (tableau A-9 et A-10) en adoptant l'allure de la courbe donnée par Babu (2002).

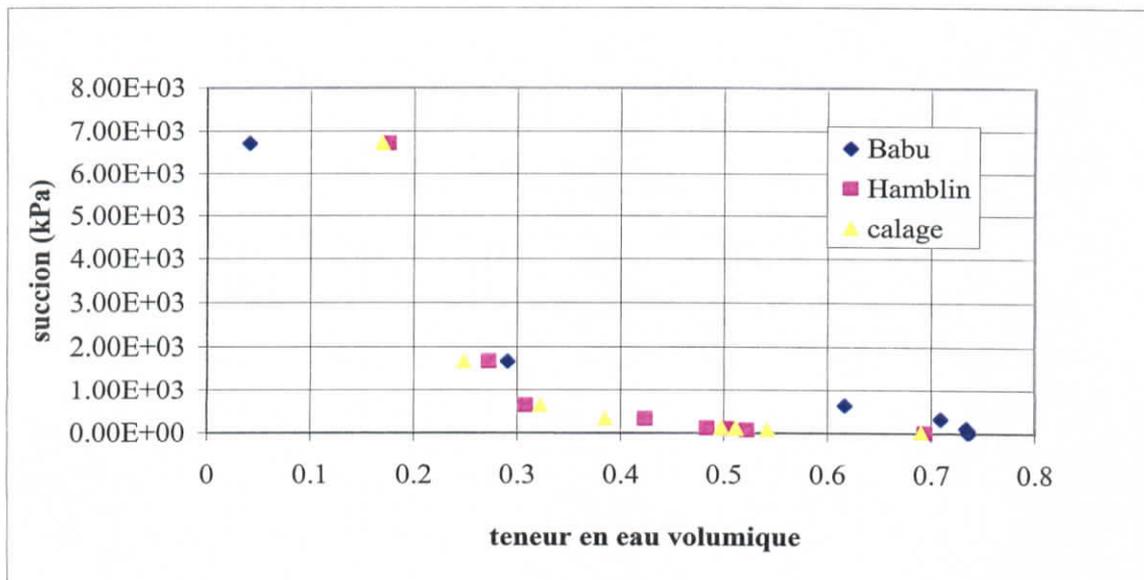


Figure 30: comparaison des différentes courbes de rétention obtenues pour le Bentomat

On constate qu'il y a un écart plus ou moins important entre la courbe (Hamblin) et celle de Babu, ce qui signifie que les paramètres donnés par ce dernier ne pourront pas être utilisés pour la détermination de la courbe de rétention du Bentomat.

Avec notre ajustement, nous avons obtenu les paramètres suivants :

$$\alpha = 2,39.10^{-2} \text{ (kPa}^{-1}\text{)} \text{ et } n = 1,28$$

Avec ces valeurs, on obtient un très bon ajustement, ce qui nous a permis d'adopter cette courbe pour le calage du modèle numérique du Bentomat (Partie III).

4. Conclusion

D'après les résultats des essais avec la méthode du papier filtre sur le Bentomat et le Gundseal, on a constaté que le potentiel en eau était compris entre 2,9 et 4,8, ce qui nous a permis de valider nos résultats par rapport aux différentes relations de calibration utilisées dans nos calculs.

Pour les deux GSB testés, la relation liant teneur en eau-succion suit la même allure : le pF de la bentonite augmente avec la diminution de la teneur en eau. Il est clairement montré que le pF augmente considérablement avec de faibles teneurs en eau, c'est-à-dire inférieures à 56%, et l'augmentation est plus prononcée lorsque la bentonite est sèche. A l'opposé, il est au voisinage de $7,81.10^1$ - $5,08$ kPa pour le Bentomat et $8,03.10^1$ - $1,49.10^2$ kPa pour le Gundseal, pour des teneurs en eau supérieures à 100%.

Lorsqu'on compare les résultats des deux types de GSB testés, on constate que pour une même teneur en eau, le pF de la bentonite du Gundseal apparaît être supérieur à celui de la bentonite du Bentomat (sauf pour $w = 17\%$). Cela signifie que si les deux GSB sont placés sur un sol humide, la bentonite du Gundseal adsorbera l'eau et atteindra l'équilibre avec une teneur en eau supérieure à celle du Bentomat.

En d'autres termes, si le Gundseal est placé en face du Bentomat, sa bentonite tendra à adsorber l'eau à travers celle du Bentomat jusqu'à atteindre l'équilibre du potentiel en eau.

La partie expérimentale nous a permis de valider la technique du papier filtre. On a retenu les résultats obtenus pour la courbe de calibration du Bentomat pour la partie numérique.

Pour la suite, il serait à envisager de faire une comparaison de nos résultats obtenus sur le Bentomat à ceux de Bouazza afin d'obtenir une validation complète de la méthode, dès qu'on aura en notre possession les valeurs exactes de Bouazza.

Aussi serait-il intéressant de tester d'autres produits, soit par la méthode du papier filtre, soit par les méthodes qui n'ont pas pu être utilisées : la méthode des micropsychromètres à thermocouple et celle du contrôle par phase vapeur.

On a pu effectuer un calage de Van Genuchten sur les données expérimentales ainsi les paramètres obtenus par ce calage vont être utilisés pour prédire l'évolution de la conductivité hydraulique avec la succion dans la suite.

En effet, il n'entrait pas dans le cadre du stage de réaliser la détermination de la courbe conductivité hydraulique-succion. On fait l'hypothèse que les paramètres vont rester les mêmes que pour la courbe teneur en eau-succion.

Partie III
SIMULATIONS NUMERIQUES

-Partie III-

Simulations numériques

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'équation de Richards n'admet pas dans le cas général de solutions analytiques. C'est pourquoi, pour simuler l'infiltration dans une étanchéité composite dont la géomembrane est endommagée, nous avons fait appel à un code de calcul aux éléments finis SEEP/W.

Ce code de calcul s'est avéré limitant car il ne permet pas de représenter deux milieux à épaisseurs aussi contrastées que l'interface et le géosynthétique bentonitique.

C'est pourquoi une première étape du travail a consisté à comparer les résultats de calcul avec SEEP/W en régime permanent, pour un GSB et une interface saturés avec les résultats des solutions analytiques données par les équations (éq-44) à (éq-51), dans l'objectif de déterminer l'épaisseur équivalente de l'interface à adopter.

Une seconde étape nous a servi à partir de l'épaisseur équivalente adoptée, à vérifier si cette épaisseur permet de trouver des résultats comparables à ceux de la solution analytique pour différentes charges hydrauliques et transmissivités.

Enfin, les résultats obtenus pour le cas saturé nous ont permis de valider le code de calcul et ainsi nous sommes passées à la résolution en régime transitoire, pour un GSB et une interface non-saturés.

Nous présentons dans la suite tout d'abord le code de calcul SEEP/W puis la détermination de l'épaisseur équivalente de l'interface et enfin nous présentons les résultats obtenus pour les simulations du cas non saturé.

1. Présentation de SEEP/W

SEEP/W est un code de résolution par élément finis, destiné à simuler le mouvement de l'eau et la répartition de sa pression dans les milieux poreux ; ce logiciel s'interface avec Windows.

Le logiciel simule les écoulements en milieux poreux, saturés ou non, en régime stationnaire ou transitoire, en deux dimensions. L'équation résolue est l'équation de Richards.

SEEP/W est formulé pour des éléments triangulaires ou quadrilatéraux. Les éléments les plus simples sont le triangle à trois nœuds et le quadrilatère à quatre nœuds. Des ordres d'élément plus grands peuvent être aussi utilisés par définition de seconds nœuds.

2. But des simulations

L'objectif des simulations est d'étudier la validité du code SEEP/W pour quantifier le débit de fuite ainsi que la distribution du potentiel de pression à l'interface entre la géomembrane et le GSB. Cette validation est faite en comparant les résultats numériques à ceux obtenus utilisant les solutions analytiques données par Touze-Foltz (2002). Les simulations numériques et analytiques ont été conduites en supposant que le GSB ainsi que l'interface sont saturés.

3. Géométrie du problème

On s'intéresse à l'écoulement de l'eau dans le GSB à partir d'un défaut circulaire dans la géomembrane de 2mm de rayon, dans la cellule de mesure de transmissivité d'interface de Touze-Foltz et al., (2002).

Le domaine étudié est défini en deux dimensions et correspond à la coupe verticale considérée. Le domaine géométrique admet un axe de symétrie. La symétrie du problème permet de ne représenter qu'un demi-espace. Le domaine est donc constitué d'une étanchéité composite : d'un GSB surmonté d'une géomembrane et entre les deux existe un vide appelé interface. Le problème est résolu de façon *axisymétrique*.

4. Caractéristiques des matériaux testés

Les matériaux du problème sont le GSB considéré comme étant le matériau 1 et l'interface numérotée 2. La géomembrane est considérée comme imperméable, cette hypothèse est faite non pas sur le milieu mais elle est considérée comme une condition à la limite.

Le GSB testé est le Bentomat dont les propriétés ont été présentées dans la partie II.

L'interface a les caractéristiques suivantes :

- Transmissivité $\theta = 4,5 \cdot 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$, cette valeur a été obtenue d'après les tests de Touze-Foltz et al (2002).

Cette transmissivité va être décomposée, d'après l'équation (éq-30) en produit ($k \times S$). L'épaisseur de l'interface étant variable. La valeur minimale acceptée par SEEP/W dans notre cas de configuration était de 0,01 mm.

Pour le GSB :

- Épaisseur = 6 mm ;
- Rayon $R_c = 100$ mm, valeur fixée d'après l'expérimentation de mesure de transmissivité d'interface.
- Conductivité hydraulique $k_{\text{GSB}} = 1 \cdot 10^{-11} \text{m/s}$, valeur adoptée d'après la synthèse bibliographique (chapitre 3).

Le défaut:

- Rayon $r_0 = 2\text{mm}$.

5. Maillage du domaine

Le maillage choisi initialement est un maillage :

- Quadrilatéral régulier à 4 nœuds ;
- 100 divisions horizontales ;
- 30 divisions verticales.

6. Conditions aux limites du problème

Différentes conditions aux limites ont été imposées (figure 31) :

Une condition de charge :

- Une charge hydraulique non nulle au niveau du défaut ;
- A la sortie aval de l'interface, nous avons considéré une condition de pression effective nulle, c'est-à-dire que la pression à la sortie est égale à la pression atmosphérique, également au niveau de la base du GSB.

Une condition de flux :

- Une condition de flux nul est imposée partout ailleurs. En particulier lorsque la géomembrane n'est pas endommagée, on la considère comme imperméable.

Nous avons également défini trois sections de mesure de flux :

- Section 1, correspond à la zone d'entrée du débit de fuite, située au niveau du défaut ;
- Section 2, correspond à la zone située en aval de l'interface qui permet de quantifier le débit radial qui s'écoule à travers l'interface.
- Section 3, correspond à la zone située juste au-dessus de la base (nappe), elle permet la quantification du débit infiltré ;

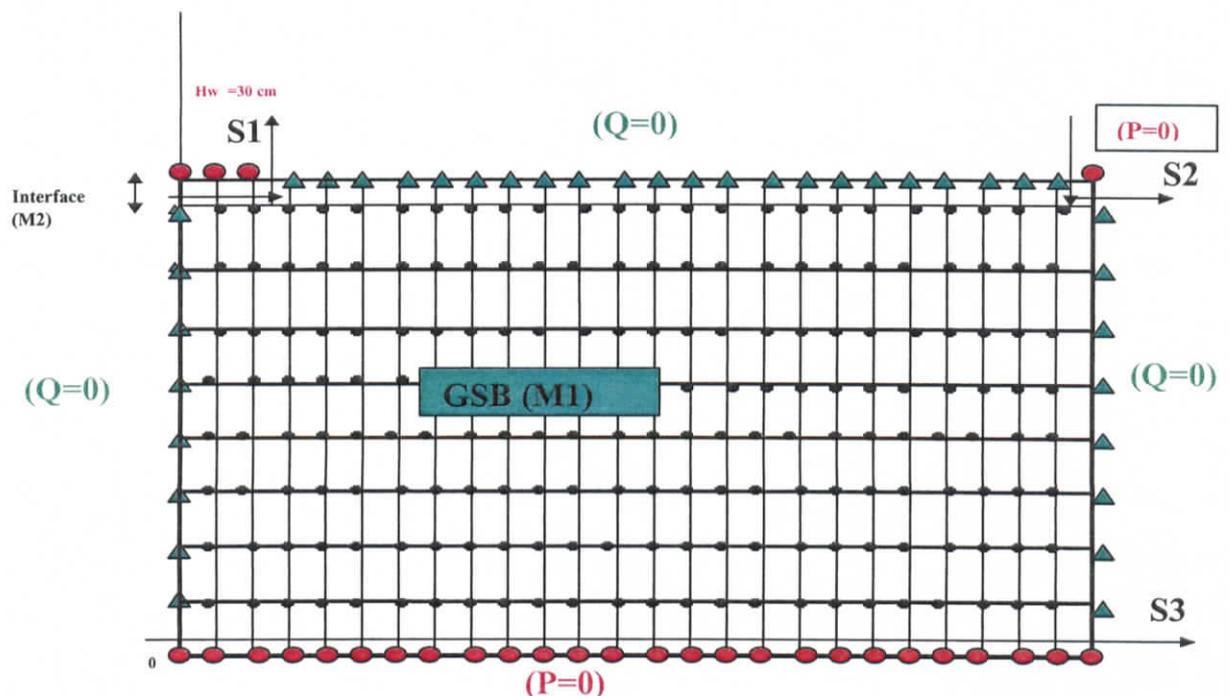


Figure 31 : schéma de principe du maillage et des conditions aux limites imposées

7. Analyse du cas saturé

Dans un premier temps, on a effectué des simulations pour valider l'épaisseur de l'interface. En d'autres termes, nous avons fait varier l'épaisseur d'interface en maintenant la même charge hydraulique de 30 cm au niveau du défaut (selon la réglementation concernant les I.S.D, cette charge ne doit pas dépasser cette valeur, mais nous devons considérer que des charges hydrauliques plus grandes peuvent être rencontrées lors d'un dysfonctionnement des systèmes de collecte des lixiviats par exemple).

7.1. Détermination de l'épaisseur équivalente de l'interface

Trois épaisseurs ont été testées : 0,01 mm ; 0,02 mm et 0,05 mm. Pour ces trois épaisseurs, on a vérifié :

1. si l'équation de la conservation de la masse était vérifiée ;
2. si le profil de pression était identique ou non à celui donné par la solution analytique ;
3. si les débits étaient ou non identiques à ceux de la solutions analytique.

Le calcul de la conservation de la masse se fait par comparaison entre le débit de fuite au défaut (flux entrant) et la somme des débits sortants du système (le flux radial et le flux infiltré).

Les résultats obtenus sont ensuite comparés à des solutions analytiques qui donnent la solution exacte du calcul pour le cas saturé :

L'étude paramétrique a montré que les solutions numériques et analytiques de la distribution de l'eau sont confondues pour une épaisseur d'interface égale à 0,05mm comme le montre la figure 32. pour cette même épaisseur les résultats entre solutions analytique et numérique sont également cohérents en terme de flux.

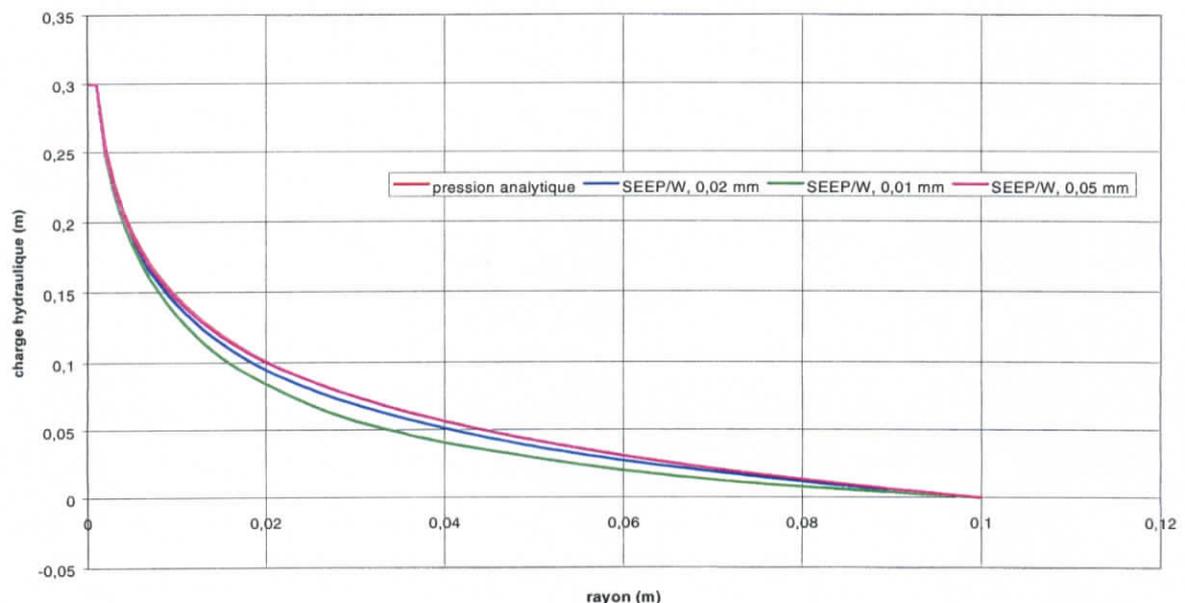


Figure 32 : résultats de SEEP/W de la variation de l'épaisseur d'interface

En se basant sur ce premier résultat on a adopté une épaisseur d'interface de 0,05 mm pour toutes les simulations numériques.

7.2. Détermination de l'influence de la variation de la charge hydraulique

Dans une seconde partie, et après avoir déterminé la bonne épaisseur d'interface, nous avons étudié l'influence de la variation de la charge hydraulique sur les débits et volumes infiltrés dans l'étanchéité composite, en maintenant une épaisseur constante égale à 0,05 mm :

- Six valeurs de charge hydraulique ont été testées : 0,3 m ; 0,5 m ; 0,7 m ; 1 m ; 1,2 m et 1,5 m pour une interface d'épaisseur égale à 0,05 mm et de transmissivité de $4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ constantes.

Pour l'étude de l'influence de la charge hydraulique, les résultats des simulations numériques en comparaison avec les solutions analytiques présentent de grandes similitudes. Le régime permanent est bien atteint, cela se vérifie avec le bilan de conservation de la masse. Les paramètres analytiques de l'étude sont donnés en annexe.

Les paramètres des solutions analytiques sont donnés dans le tableau 11. La figure 33, présente les résultats obtenus pour cette partie de résolution.

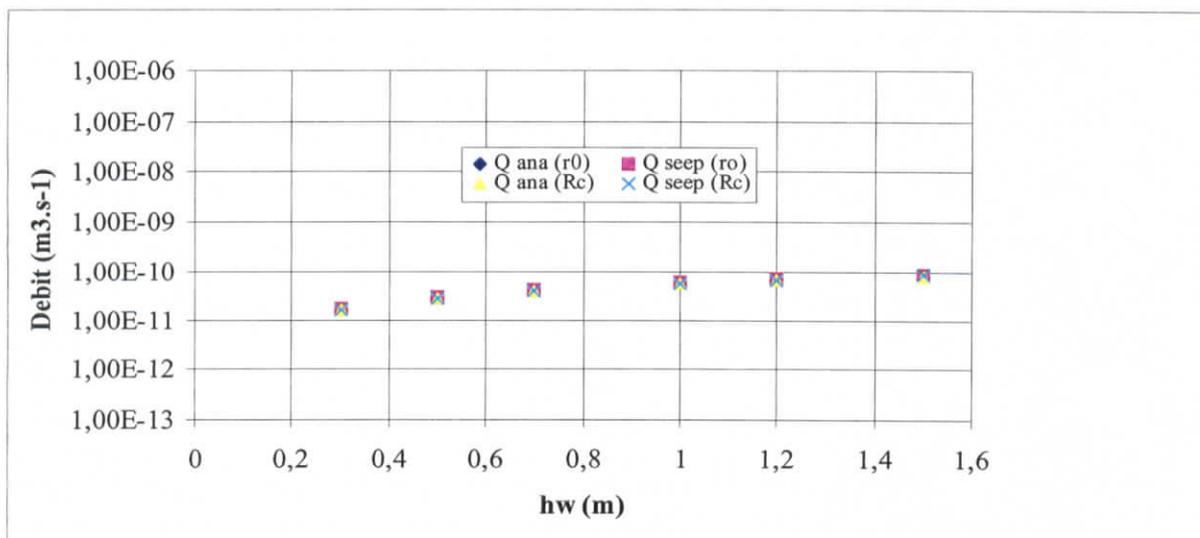


Figure 33 : résultats de SEEP/W de l'influence de la variation de la charge hydraulique

Nous avons comparé pour chaque valeur de charge hydraulique le débit entrant $Q(r_0)$ et sortant $Q(R_c)$ respectivement donnés par SEEP/W et par la solution analytique. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 11. A partir de ces valeurs, nous avons tracé la courbe transmissivité en fonction du rayon. Ainsi nous avons étudié l'influence de la charge hydraulique sur la transmissivité d'interface.

h_w (m)	Q ana (r_0)	Qseep (r_0)	Q ana (R_c)	Qseep (R_c)
0.3	$1,88.10^{-11}$	$1,88.10^{-11}$	$1,69.10^{-11}$	$1,69.10^{-11}$
0.5	$3,13.10^{-11}$	$3,13.10^{-11}$	$2,83.10^{-11}$	$2,86.10^{-11}$
0.7	$4,38.10^{-11}$	$4,38.10^{-11}$	$3,97.10^{-11}$	$4,03.10^{-11}$
1	$6,26.10^{-11}$	$6,26.10^{-11}$	$5,69.10^{-11}$	$5,79.10^{-11}$
1.2	$7,51.10^{-11}$	$7,51.10^{-11}$	$6,83.10^{-11}$	$6,96.10^{-11}$
1.5	$9,39.10^{-11}$	$9,39.10^{-11}$	$8,55.10^{-11}$	$8,71.10^{-11}$

Tableau 11: résultats de la variation de la charge hydraulique

Les résultats numériques correspondent parfaitement aux résultats analytiques, ce qui permet de conforter le choix de l'épaisseur d'interface équivalente adoptée.

7.3. Détermination de l'influence de la variation de transmissivité

En définitive, nous nous sommes également intéressées à l'influence de la variation de la transmissivité d'interface sur les transferts dans l'étanchéité composite :

- Une même valeur de transmissivité avec six ordres de grandeur différents ont été testés : $4,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$; $4,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; $4,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; $4,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$; $4,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4,5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ pour une épaisseur de 0,05 mm et sous des charges hydrauliques égales respectivement à 0,3 m et 1,2 m.

En terme de flux la comparaison entre les solutions analytiques et numériques, soit avec une charge de 0,3 m ou avec celle de 1,2 m (figure 34), montre que pour des valeurs de transmissivité entre 10^{-10} et $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, les résultats sont similaires. Par contre, pour des transmissivités inférieures à $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, la solution analytique n'est plus utilisable car la supposition faite concernant la saturation de l'interface n'est plus réaliste.

Pour une charge de 0,3 m, on obtient :

θ (m^2/s)	Q ana (r_0)	Qseep (r_0)	Q ana (R_c)	Qseep (R_c)
$4,50.10^{-8}$	$2,168.10^{-8}$	$2,1268.10^{-8}$	$2,1681.10^{-8}$	$2,1388.10^{-8}$
$4,50.10^{-9}$	$2,1688.10^{-9}$	$2,12918.10^{-9}$	$2,1665.10^{-9}$	$2,1212.10^{-9}$
$4,50.10^{-10}$	$2,1738.10^{-10}$	$2,14652.10^{-10}$	$2,1507.10^{-10}$	$2,07691.10^{-10}$
$4,50.10^{-11}$	$2,2216.10^{-11}$	$2,1748.10^{-11}$	$1,9993.10^{-11}$	$1,99479.10^{-11}$
$4,50.10^{-12}$	$2,5837.10^{-12}$	$2,55028.10^{-12}$	$9,7094.10^{-12}$	$9,5008.10^{-13}$
$4,50.10^{-13}$	$3,8577.10^{-13}$	$3,91141.10^{-13}$	$-8,9006.10^{-14}$	$9,04653.10^{-14}$

Tableau 12 : résultats de la variation de la transmissivité d'interface

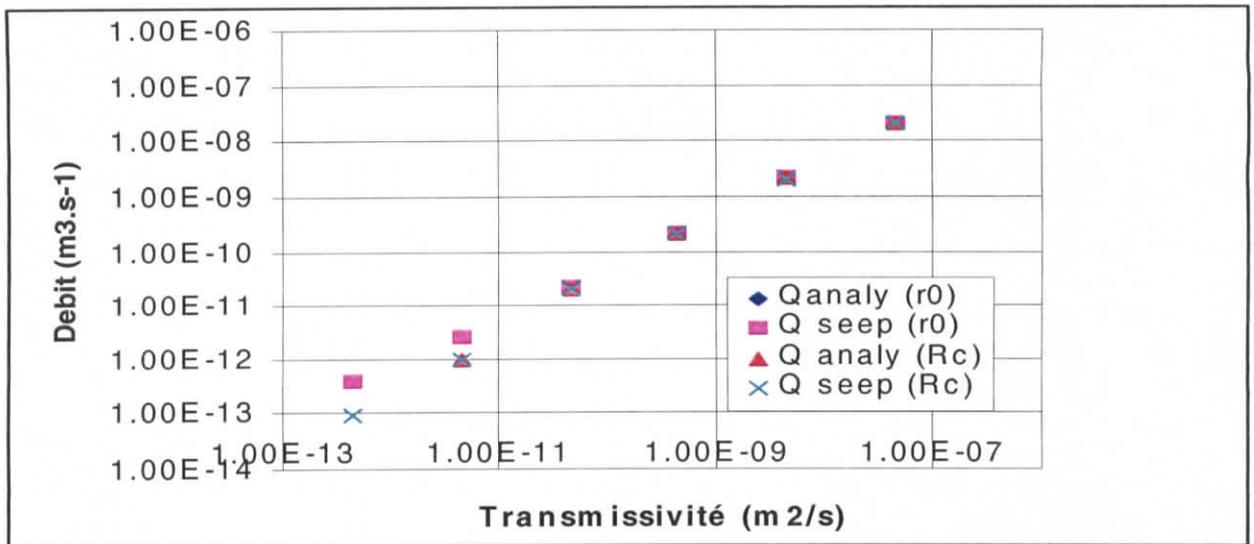


Figure 34 : variation de la transmissivité d'interface

Pour une charge hydraulique de 1,2 m, le code donne les résultats suivants :

θ (m^2/s)	Q ana (r_0)	Qseep (r_0)	Q ana (R_c)	Qseep (R_c)
$4,50 \cdot 10^{-8}$	$8,6733 \cdot 10^{-8}$	$8,63875 \cdot 10^{-8}$	$8,6724 \cdot 10^{-8}$	$8,68211 \cdot 10^{-8}$
$4,50 \cdot 10^{-9}$	$8,6751 \cdot 10^{-9}$	$8,64692 \cdot 10^{-9}$	$8,6668 \cdot 10^{-9}$	$8,62556 \cdot 10^{-9}$
$4,50 \cdot 10^{-10}$	$8,6938 \cdot 10^{-10}$	$8,71541 \cdot 10^{-10}$	$8,6108 \cdot 10^{-10}$	$8,45842 \cdot 10^{-10}$
$4,50 \cdot 10^{-11}$	$8,8747 \cdot 10^{-11}$	$8,82 \cdot 10^{-11}$	$8,0768 \cdot 10^{-11}$	$8,17 \cdot 10^{-11}$
$4,50 \cdot 10^{-12}$	$1,0252 \cdot 10^{-12}$	$1,0273 \cdot 10^{-12}$	$4,5165 \cdot 10^{-12}$	$4,50674 \cdot 10^{-12}$
$4,50 \cdot 10^{-13}$	$1,5207 \cdot 10^{-12}$	$1,56483 \cdot 10^{-12}$	$-7,334 \cdot 10^{-14}$	$7,24326 \cdot 10^{-14}$

Tableau 13: résultats de la variation de transmissivité d'interface

La figure 35 représente les différents résultats obtenus par SEEP/W pour la charge de 1,2 m.

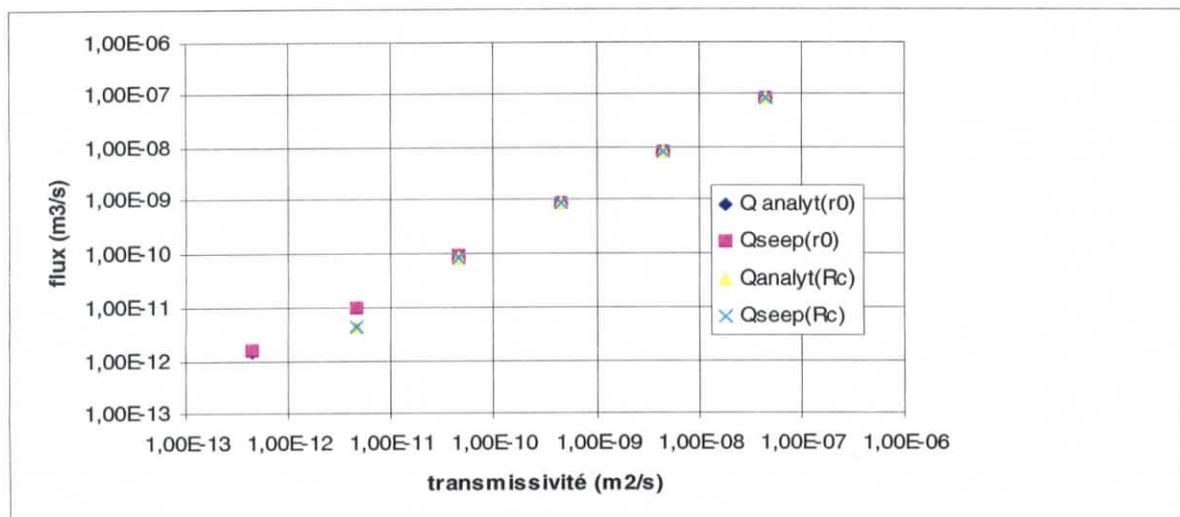


Figure 35 : variation de la transmissivité d'interface

7.4.Conclusion

On peut conclure que les résultats obtenus numériquement réalisés pour la quantification du débit de fuite à travers l'interface GSB/GMB pour le cas saturé, en présence de défaut dans la géomembrane peuvent être considérés comme cohérents avec ceux donnés par les solutions analytiques de N.Touze-Foltz (2002), pour une épaisseur d'interface égale à 0,05 mm.

En se basant sur ces résultats, le code de calcul SEEP/W pourra également être utilisé pour des simulations numériques du même problème sous un régime d'écoulement transitoire, considérant ainsi que le GSB et l'interface sont non saturés, en conservant cette même épaisseur d'interface.

8.Analyse du cas non saturé

Afin de simuler les écoulements en milieu non saturé (qui est l'état initial du GSB), on doit fournir au code les paramètres hydrauliques/hydrodynamiques propres à nos matériaux. Dans le cas non saturé, la conductivité hydraulique (transmissivité) varie dans le temps mais également avec les variations de la teneur en eau. Ce qui signifie que l'on se doit de déterminer les relations teneur en eau-succion pour chaque matériau de l'étude.

Nous avons gardé le même maillage et les mêmes matériaux que celui utilisé pour le cas saturé. Il a fallu par contre introduire les courbes de rétention du GSB et de l'interface, qui a été assimilée à un géotextile.

8.1.détermination des courbes de rétention

- Paramètres hydrauliques du GSB :

Nous avons introduit la courbe de rétention du Bentomat obtenue expérimentalement par la méthode du papier filtre dans le code SEEP/W.

Cette courbe a été obtenue à partir du calage des résultats obtenus expérimentalement pour le Bentomat (voir partie II) avec l'équation de Van Genuchten. Nous avons obtenu les paramètres suivants :

$$\alpha = 2,39.10^{-2} \text{ kPa}^{-1}, n = 1,28 \text{ et } \theta_{\text{sat}} = 0,7$$

- Paramètres hydrauliques de l'interface :

L'interface a été considérée comme étant un second milieu poreux, autre que le GSB, dans notre cas nous avons considéré qu'elle se comportait comme le géotextile. Il a fallu donc lui attribuer une porosité et une loi d'écoulement non saturé, afin de pouvoir la modéliser.

Il a été retenu la limite supérieure de la gamme de porosités relevées pour obtenir une interface la plus conductrice que possible.

La synthèse bibliographique menée sur la détermination de courbes de rétention des géotextiles (chapitre IV), a montré que l'équation de la courbe de rétention pour l'imbibition était sous la forme :

$$S_r = \frac{a}{\psi} + b \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des paramètres de la courbe.}$$

Pour une gamme de variation (Lafleur et al., 1998) :

$$\begin{cases} S_r = 100\% & \Rightarrow \psi = 0 \\ S_r = 0\% & \Rightarrow \psi \neq 2 \text{ kPa} \end{cases}$$

Nous avons pris les couples (k, w) obtenu par les simulations faites en régime permanent, c'est-à-dire en fin d'essai, et on lui a appliqué une courbe de rétention de type géotextile. L'ajustement de la courbe obtenue avec l'équation de Van Genuchten a donné une courbe fictive, qui a pour équation :

$$\psi = \frac{2}{\sqrt{S_r}} - 0,2$$

Les paramètres ainsi obtenus après le calage sont : $\alpha = 192,64 \text{ (kPa)}^{-1}$ et $n = 2,02$

La teneur en eau à saturation a été assimilée à la valeur de porosité du géotextile.

8.2. Les constantes du problème

- La géométrie du problème est restée la même ;
- Les conditions aux limites sont identiques à ceux définies pour le cas saturé

8.3. Les modifications apportées par rapport au cas saturé

- Le régime d'écoulement devient transitoire ;
- Nous avons imposé comme conditions initiales une teneur en eau uniforme dans le matériau. Une succion égale à 78,1 kPa (-7,81 m) a été appliquée au sein du GSB et égale à $3,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ au niveau du géotextile;
- Nous avons imposé une durée de simulation de 14 jours découpée en 40 pas de temps ;
- Nous avons rajouter une condition de suintement, définie par :

$$\begin{cases} p < 0 & \Rightarrow \psi = 0 \\ p = 0 & \Rightarrow \psi > 0 \end{cases}$$

8.4. Simulations réalisées

8.4.1. Influence du pas de temps

Nous avons d'abord effectué différentes discrétisations temporelles du problème. Pour les premiers pas de temps imposés, nous avons constaté que le GSB ne se saturait pas, ce qui implique que le régime permanent n'a pas encore été atteint. Le GSB tend à s'équilibrer en pompant tout ce qui arrive à travers le géotextile.

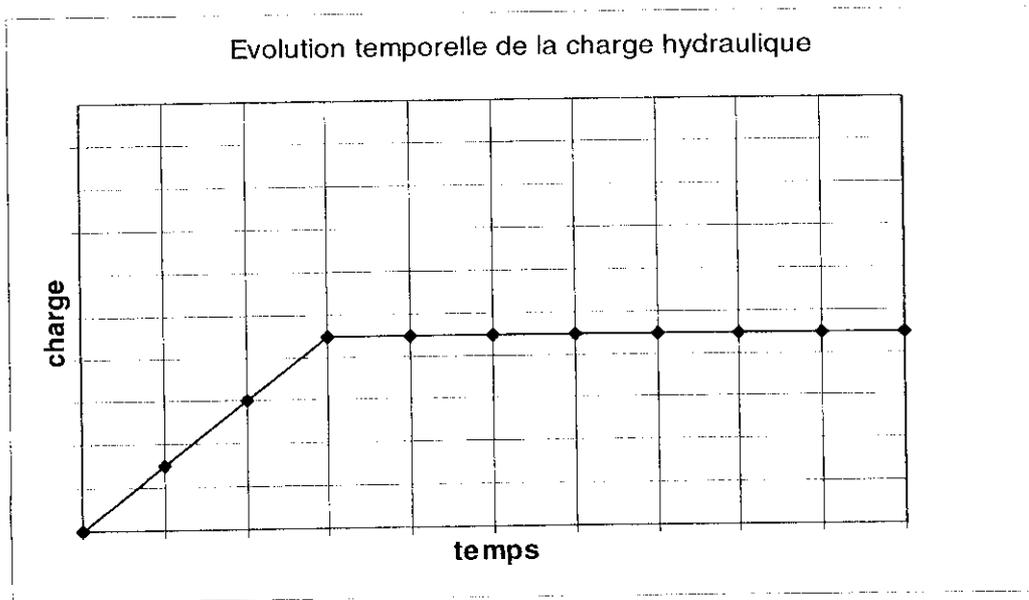
Nous avons réduit par la suite la durée de simulation de 14 jours à un jour avec le même pas de temps : les premiers pas de temps sont plus ou moins égaux puis ils croissent progressivement selon une raison géométrique. Nous avons constaté l'apparition de bulbe

de saturation, mais avec de grandes fluctuations. Le régime permanent est loin d'être atteint par cette discrétisation. Les pas de temps adoptés sont donnés en annexe.

8.4.2. Influence de l'application de la charge

Initialement la charge hydraulique (suction) été appliquée brutalement, ce qui a engendré de très grandes perturbations du flux.

Ainsi nous avons pensé à modifier l'allure de la courbe de charge : en un premier temps, la charge au niveau du défaut est appliquée brusquement, ce qui a permis d'avoir des bulbes de saturation mais avec quelques fluctuations de flux.



Nous avons par la suite appliqué la charge progressivement, on a remarqué que le bulbe de saturation se formait bien progressivement et qu'il ne présentait aucune discontinuité surprenante dans sa forme ni de désaturation mais avec des fluctuations de flux. Aussi avons-nous constaté que les vecteurs d'écoulement des deux matériaux évoluaient de la même façon et dans une même direction, ce qui indique que les deux matériaux agissent de la même façon, ie qu'ils ont une loi de comportement identique.

8.4.3. Influence de la condition initiale

Avec les conditions initiales de charge, le régime permanent n'a pas été atteint. Nous avons diminué les valeurs de suction, seulement nous avons constaté des résultats contradictoire, montrant que le liquide sort au travers du GSB.

9. Conclusion et perspectives

La résolution numérique du problème des transferts dans les étanchéités composites dans le cas où le GSB ainsi que l'interface sont non saturés a été initiée.

Nous avons tenté d'intervenir au niveau de trois paramètres pour ne pas imposer des conditions trop draconiennes au départ. Les simulations ont commencé avec l'essai pour lequel le Bentomat est préhydraté.

La durée des simulations est passée de 14 jours à une journée. La charge hydraulique était initialement appliquée de façon brutale puis progressive afin d'éviter de grandes perturbations de flux. L'autre paramètre qui a été également testé est l'homogénéisation de la condition initiale.

L'étude de ces paramètres ainsi que leur influence sur les transferts en milieu non saturé n'a pas été approfondie, ce qui ne nous permet pas d'émettre des conclusions par rapport à la convergence du code de calcul SEEP/W.

Il serait intéressant par la suite, de tester :

- D'autres produits pour vérifier la convergence du code
- L'influence des conditions initiales, en modifiant la valeur de la succion imposée ainsi que l'application de celle-ci ;
- L'impact des pas de temps adoptés, peut-être qu'une discrétisation plus fine donnerait une meilleure convergence ;
- D'autres valeurs pour les paramètres hydrodynamiques pour un même pas de temps ;
- L'influence de la variation temporelle de la transmissivité d'interface.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de déterminer les paramètres hydrodynamiques des Géosynthétiques Bentonitiques ainsi que leur influence sur les transferts dans les étanchéités composites des installations de stockage de déchets.

La synthèse bibliographique a permis d'une part, de recenser les différents paramètres hydrodynamiques des GSB en terme de conductivité hydraulique et de transmissivité, dont l'acquisition était primordiale pour les simulations numériques. Elle a permis d'autre part, de recenser les différentes techniques de contrôle de la succion des sols, à partir desquelles nous avons retenus celles qu'on a jugé utilisables pour le GSB.

Trois méthodes ont été retenues pour la détermination des courbes de rétention des deux GSB testés (Gundseal, Bentomat) : la technique du papier filtre, la technique des micropsychromètres à thermocouple et enfin la technique de contrôle de la succion par vapeur saline. La technique du papier filtre a été testée et son protocole de mesure a été établi. Cette technique a donné des résultats pour le Gundseal comparables à ceux donnés dans la bibliographie. Nous n'avions pas pu par contre, établir de comparaison avec ceux du Bentomat. Seul les résultats du Gundseal ont servi à valider cette technique.

La seconde technique, celle des micropsychromètres à thermocouple, n'a pas pu être utilisée, malgré les efforts engagés. Cependant le protocole de mesure a été élaboré. La méthode de contrôle par vapeur saline, n'a pas été étudiée à cause des grands délais d'exposition des échantillons.

Les résultats de l'expérimentation ont été utilisés pour des simulations numériques avec le code de calcul SEEP/W pour les deux cas de figure où le GSB et l'interface sont saturés ou non-saturés. Nous rappelons que le GSB est sec à l'état naturel. Les simulations réalisées pour l'étude du cas saturé, ont été un réel succès. En effet les résultats obtenus étaient très cohérents avec les solutions analytiques développées dans la bibliographie pour quantifier les débits de fuite liés aux transferts advectifs dans l'étanchéité composite en présence de défauts dans la géomembrane. Quant aux simulations réalisées pour l'étude du cas non saturé, bien qu'elles n'aient pas permis d'obtenir de résultats qui soient comparables à des mesures de débits réalisées dans l'essai de mesure de transmissivité d'interface, elles semblent prometteuses, car la convergence des calculs a pu être obtenue.

Il serait envisageable de tester la technique du papier filtre pour d'autres types de GSB et tenter d'établir des comparaisons entre les différents résultats.

Les techniques psychrométrique et celle du contrôle par vapeur saline, apporteraient sans doute des résultats intéressants dans la mesure où on peut établir des comparaisons avec la bibliographie étant donné qu'elles ont été utilisées par plusieurs chercheurs pour le même objectif.

Aussi, dans le cadre de la thèse initiée par Madalena Barroso pour la quantification de la transmissivité d'interface, il serait intéressant d'adopter pour les simulations numériques d'autres courbes de rétention d'eau pour l'interface que celle d'un géotextile. Egalement penser à modifier les conditions initiales afin qu'elles ne soient pas trop draconiennes. Penser par exemple à considérer une variation temporelle de la transmissivité d'interface et une variation temporelle progressive de la charge hydraulique.

Ce stage m'a permis d'avoir une réelle ouverture sur la recherche appliquée, et m'a fait découvrir le domaine des géosynthétiques qui m'était inconnu au départ. Un domaine qui promets grand pour le futur.

Il est venu conforter mon choix et ma détermination à vouloir m'investir dans la recherche scientifique.

Je considère ce stage comme une nouvelle étape et non comme une finalité car c'est dans cette voie là que je veux m'orienter.

Références bibliographiques

- Al -Khafaf, S. And Hanks, R. J., 1974, "Evaluation of the Filter Paper Method for Estimating soil Water Potential," *Soil Science*, vol. 117, No. 4, pp. 194-199.
- Al-Mukhtar, M., Qi, Y., Alcover, J.-F & Bergaya. 1999. Oedometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites, *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 375-684.
- BRGM (2002). -*Note Technique BRGM N° 438*. Programme LIXAR : Interactions entre lixivants et matériaux argileux. Rapport d'avancement n° 2.
- Bouazza, A. and T. Vangpaisal & F. Rahman. "Gas migration through needle punched geosynthetic clay liners". *Proceedings of the International symposium Is Nuremberg 2002*, pp. 165-176.
- Brown, S. R. (1989). "Transport of Fluid and Electrical current Through a single Fracture." *Journal of Geosynthetical Research* 94 (B7), 9429-9438.
- Brown, S. R. and H. Scholtz (1985). "Broad Bandwidth Study of the Topography of Natural Rock Surfaces." *Journal of Geophysical Research* 90 (B14), 12575-12582.
- Brown, K. W., Thomas, J.C., Lytton, R.L., Jayawickrama, P. & Bhart, S.1987. Quantification of Leakage Rates through holes in Landfill Liners, U.S. EPA Report CR810940, Cincinnati, 147 p.
- Buckingham E., 1907, U.S. Dept. of Agro. Bur. Of Soils, bull. 38.
- Chapman (D.L.).- a contribution to the theory of electrocapillarity. *Philosophical Magazine*, vol. 25, n° 6, p. 475-481 (1913).
- Colucci P. et Lavagnolo M.C (1995), Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners, Sardinia'95, Fifth International Landfill Symposium, Sardinia.
- Comeaga-Batali L. (1997), Dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques dans les centres de stockage de déchets, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 297 pages.
- Comité Français des Géosynthétiques (1998), *Recommandations générales Pour la réalisation d'étanchéité par Géosynthétiques bentonitiques*, fascicule n°12, Bagneux, 56 pages.
- Daniel (D.E.). -*Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers*, *Soil Science Society of America Journal*, 20, n° 6, p.1125-1129 (1982).
- Delage (P.), Howat (M.) et CUI (Y.J.).-*The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. *Engineering Geology* (50) 1-2, p. 31-48 (1998).

- Delage (P.), CUI (Y.J.), YAHIA-AÏSSA (M.) et De LAURE (E.).-*On the unsaturated hydraulic conductivity of a dense compacted bentonite*. Proc. Of unsat'98, Beijing, vol. 1, p. 344-348 (1998).
- Delage (P.) et CIU (Y.J.). – *L'eau dans les sols non saturés*. C301. traité construction, volume C2 (2000).
- Dobras, T.N. and Elzea, J.M. (1993).-“In-situ Soda Ash Treatment for contaminated Geosynthetic clay Liners”. Proceedings of Geosynthetics '93, Industrial Fabrics Association International, st. Paul, MN, R.J. Bathurst, Ed., pp. 1145-1160.
- Edil, T. B and Motan, S. E., and Toha, F. X., “Mechanical Behavior and Testing Methods of Unsaturated soils,” *Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740*, R. N. Young and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, 1981, pp. 114-129.
- Erdal Cokca, (1999). Comparison of suction and oedometer methods for the measurement of swell pressure. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 33, 141-147.
- Fawcett, R. G. and Collis, G. N., “A Filter-Paper Method for Determining the Moisture Characteristics of Soil,” *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, vol. 7, April 1967, pp. 162-167.
- Fleureau (J.M.) et Taïbi (S.). – Water-air permeabilities for unsaturated soils. Proceedings of the first International conference on Unsaturated soils Unsat'95, Paris, Vol. 2, p. 479-484, Balkema/Presses des ponts (1995).
- Fredlund, D. G., 1992, “How Negative Can Pore-Water Pressures Get?” *Geotechnical News*, Vol. 9, No. 3, pp. 44-46.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1987, “Soil Mechanics Principles for Highway Engineering in Arid Regions,” *Transportation Research Record No. 1137*, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 1-11.
- Fukuoka, M. (1986). *Large Scale Permeability Test for Geomembrane Subgrade System*. Third International conference on Geotextiles, Vienna, Austria, 917-922.
- Gardner (R.). –*Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data*. Proceedings of the Soil Science society of America, 20, p. 317-320 (1956).
- Gardner W. R., 1958., “*Some Steady-state Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table*”. *Soil Sci.*, vol., vol. 85, p. 228-232.
- Giroud, J. P. and R. Bonaparte (1989)a. “Leakage Through Liners Constructed with Geomembranes – Part I. Geomembrane Liners.” *Geotextiles and Geomembranes* 8(2), 27-67.
- Giroud, J. P. and R. Bonaparte (1989)b. “Leakage Through Liners constructed with Geomembranes – Part II. Composite Liners.” *Geotextiles and Geomembranes* 8(2), 71-111.

Hamblin, A. P., 1981, "Filter-paper Method for Routine Measurement of Field Water Potential," *Journal of Hydrology*, Vol. 53, pp. 355-360.

Harpur W. A., Wilson-Fahmy R.F., et al. (1993), « Evaluation of the contact between Geosynthetic Clay Liners and Geomembranes in terms of transmissivity », dans *Geosynthetic Liner Systems : Innovations, Concerns and Design*, Koerner et Wilson-Fahmy, Philadelphia, pages 143-154.

Hillel (D.). – *Fundamentals of soil physics*. Academic press, 413 p. (1980).

Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2001. *Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, ASCE 127 (7), 557-567.

Lambert S. (1997), les géomembranes, dans *Ingénieries-EAT* (11), pages 27-40.

Madsen, F. & Nüesch, R. 1995. Characteristics and sealing effect of bentonite. In *Geosynthetic Clay Liners* (Eds. Koerner, R.M, E. Gartung and Zanzinger, H.), Balkema Publishers, 31-49.

Mc cuen R. H., Rawls W. J., Brakensiek D. L., 1981, Statical analyses of the Brook-Corey and the Green-Ampt parameters across soil textures. *Water Resou. Res.* Vol. 17, p. 1005-1013.

Mitchell (J.K.). – *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 437 p. (1993).

Mualem Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 12, p. 513-522.

Norme: ASTM D 5298-92. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, p. 1312-1317.

Petrov , R.J. and Rowe, R.K. (1997) –“Geosynthetic clay Liner Compatibility by Hydraulic Conductivity Testing: Factors Impacting Performance”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, No. 6.

Petrov, R.J., Rowe, R.K. and Quigley, R.M. (1997 a)-“Comparison of Laboratory Measured GCL Hydraulic conductivity Based on Three Permeameter Types”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 20, No. 1, pp.49-62.

Petrov, R.J., Rowe, R.K. and Quigley, R.M. (1997 b)-“Selected Factors Influencing GCL Hydraulic Conductivity”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 8, pp. 683-695.

Rad, N.S., Jacobsen, B.D. and Bachus, R.C. (1994)-“compatibility of Geosynthetic Clay Liners With Organic and Inorganic Permeants”, *Proceedings of 5th International Conference on Geosynthetics*, Singapore, pp. 1165-1168.

Richards (L.A.). – *A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution*. Soil science, vol. 51, p. 377-386.

Ridley (A.M.) et Burland (J.B.). – *anew instrument for measurment of soil moisture suction*. Géotechnique 43, n° 2, p. 321-324 (1993).

Ridley (A.M.) et Wray (W.K.).- *Suction measurment: a review of current theory and practices*. Proc. Of the first Inter. Conf. On Unsaturated soils, vol. 3, Paris, p. 1293-1322 (1995).

Rollin, A. L., Marcotte, et al. (1999). *Leak Location in Exposed Geomembrane Liners Using an Electrical Leak Detection Technique*. Geosynthetic'99, Boston, Massachussets, USA, Industrial Fabrics Association International, Roseville, USA, volume 2, 615-626.

Rowe, R. K. (1998). *Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste*. Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, GA, USA, volume 1, 27-103.

Ruhl, J.L. and Daniel, D.E. (1997).-“*Geosynthetic Clay Liners Permeated with Chemical solutions and Leachates*”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123 (4), pp. 369-380.

Schneider (A.)/ -*Neue Dagramme zur bestimmung der relativen luftfeuchtigkeit uber gesattigten wasserigen salzlosungen und wasserigen schwefelsaurelosingen bei verschiedenen temperaturen*. Holz als Rohund Werkstoff 18: 269-272 (1960).

Schubert, W. R. (1987). –“*Bentonite Matting in Composite Lining systems*”, *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, R.D. Woods, ed., ASCE, New York, NY, pp. 784-796.

Shan, H.Y. and Daniel, D.E. (1991) “*Results of Laboratory Tests on a Geotextile/Bentonite Liner Material*”, *Proceedings og Geosynthetics '91*, Industrial Fabrics Association International, St;Paul, MN, 2, 517-535.

Shan, H. Y. and Lai, Y. J. (2001) “*Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners*”. *Geotextiles and Geomembranes* 20 (2002) 19-38.

Sivakumar Babu, G.L. and Sporer, H., Zanzinger, H. & Gartung, E. “*Desiccation behavior of selected geosynthetic clay liners*”. *Proceedings of the International symposium Is Nuremberg 2002*, pp. 295-302.

Soltani F. 1997. *Etude de l'écoulement de gaz à travers les géosynthétiques bentonitiques utilisés en couverture des centres de stockage de déchets*, thèse de doctorat, Institut National des sciences Appliquées de Lyon, 235 pages.

Spanner (D.C.). – *The Peltier effect and ist use in the measurment of suction pressure*. J. Exptl. Botany, Vol. 2, p. 145-168 (1951).

Spencer (H.H.). – *Laboratory methods for maintaining constant humidity. International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology*. Published for the National Research Council, McGraw-Hill, New York (1926).

Stormont, J.C. 1998. Geosynthetic unsaturated drain system. *Report prepared for the New Mexico State Highway and Transportation Department.*

Stormont, J.C., Henry, K.S. & Evans, T.M. 1997. water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles. *Geosynthetics International* 4(6): 661-672.

Tessier (D.). – *Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles.* Thèse CNAM, Laboratoire de Géologie Appliquée, Paris (1975).

Touze-Foltz, N. 1999. Large Scale tests for the Evaluation of composite Liners Hydraulic Performance: a preliminary Study. *Sardinia'99*, Sardinia, CISA, 8 pages.

Touze-Foltz, N. 2001. *Modélisation des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets, thèse de doctorat*, Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, 288 pages.

Touze-Foltz, N. 2002. Evaluation of the hydraulic transmissivity in soil liners-geomembrane interfaces, *Submitted to the 7 th International Geosynthetics Conference*, Nice, September 24-27 2002, 4 pages.

Touze-Foltz, N., Rowe, R. K. & Duquennoi, C. 1999. Liquid Flow Through composite Liners due to geomembrane Defects : analytical Solution for axi-symetric and Two-dimensional Problems, *Geosynthetic International*, vol. 6., No. 6, pp. 455-479.

Van Genuchten, M.th. 1980. a closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci Soc. Am.Journal*, 44, 892-898.

Vangpaisal, T. & bouazza, A. 2001. Gas Permability of three needle punched geosynthetic Clay Liners. *Proceedings 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics*, Newcastle, 27—29 November 2001: 373-378.

Verbrugge (J.C.). – Emploi d'une méthode psychrométrique dans des essais triaxiaux sur un limon remanié non saturés. *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol. 15, p. 501-509 (1978).

Visser W. C., 1966, Progress in the Knowledge about the effect of soil moisture content on plant production. *Inst. Land. Water Managment, Wakeningen, Netherlands, Tech. Bull. 45.*

Wang, X. And Benson, C. H., "Hydraulic conductivity Testing of Geosynthetic Clay Liners (GCLs) Using the Constant Volume Method," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 22, No. 4, December 1999, pp. 277-283.

WEAST. – chemical rubber company (1968).

Williams (j.) et Shaykewich (C.F.). –An evaluation of polyethylene glycol PEG 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil water matric potential. *Canadian journal of Soil Science* 102 (6), p. 394-398 (1969).

Zerhouni (M.I).. – Essais triaxiaux utilisant des psychromètres. *Comptes-rendus du 1^{er} congrès International sur les sols non saturés unsat'95*, Paris, vol. 2, p. 673-678 (1995).

Annexes

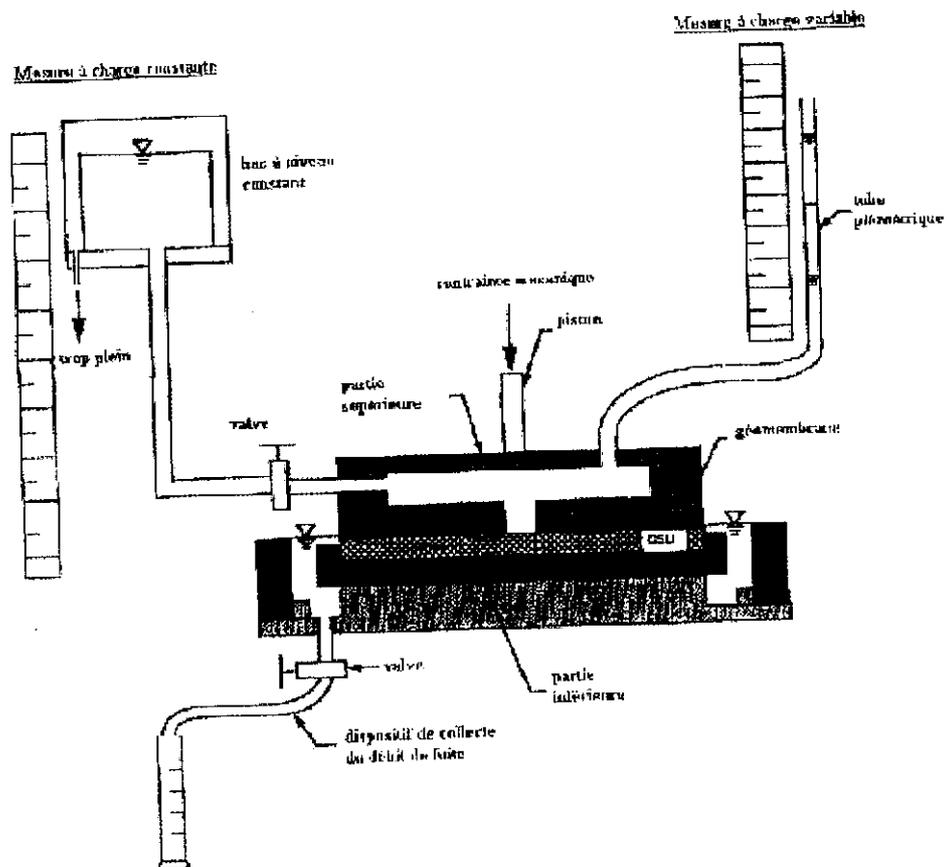
Annexe 1 : schéma du dispositif expérimental de mesure de transmissivité d'interface GSB/GMB, d'après Harpur et al. (1993).

Annexe 2 : résultats des mesures expérimentales.

Annexe 3 : les pas de temps imposés pour les simulations numériques du cas non saturé.

Annexe 4 : fiches techniques du Bentomat et du Gundseal

Schéma du dispositif expérimental de mesure de transmissivité d'interface GSB/GMB, d'après Harpur et al. (1993)



Ench. n°	Masse GSB (g)	Masse en eau correspondante(g)	Mass sèche correspondante (g)	ω requise (%)	Masse d'eau à ajouter (g)	Masse finale (g)
1	42.24	4.49	37.75	17	1.92	44.16
2	28.69	3.05	25.64	17	1.31	30.00
3	35.36	3.76	31.60	28	5.09	40.45
4	34.16	3.63	30.53	28	4.91	39.07
5	39.23	4.17	35.06	46	11.95	51.18
6	33.04	3.52	29.52	46	10.07	43.11
7	43.43	4.62	38.81	56	17.11	60.54
8	43.12	4.59	38.53	56	16.99	60.11
9	30.83	3.28	27.55	66	14.90	45.73
10	31.72	3.38	28.34	66	15.33	47.05
11	34.75	3.70	31.05	79	20.83	55.58
12	31.18	3.32	27.86	79	18.69	49.87
13	30.71	3.27	27.44	89	21.16	51.87
14	34.98	3.72	31.26	89	24.10	59.08
15	30.04	3.20	26.84	96	22.57	52.61
16	35.25	3.75	31.50	96	26.49	61.74
17	32.37	3.44	28.93	101	25.77	58.14
18	30.56	3.25	27.31	101	24.33	54.89
19	35.42	3.77	31.65	145	42.13	77.55
20	35.50	3.78	31.72	145	42.22	77.72

Tableau A-1 : fiche de préhydratation du Gundseal

Teneur en eau initiale du Gundseal $w_0 = 10,64 \%$

Balance: LER TOLEDO Pb 3002-s (1/100^{ème})

Balance : METTLER Type B5 (1/10000^{ème})

Balance : METTLER Type B5 (1/10000^{ème})

Echantillon	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teneur en eau du GSB %	w	17	28	46	56	66	79	89	96	101	145
Masse du pillulier (g)	M_p	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558
Masse du pillulier + masse du papier filtre humide (g)	$M_p + M_{pf}$	55,7218	55,7222	55,7410	55,7418	55,7544	55,7487	55,7564	55,7558	55,7613	55,7731
Masse du papier filtre humide (g)	M_{hum}	0,266	0,2664	0,2852	0,286	0,2986	0,2929	0,3006	0,3	0,3055	0,3173
Masse du papier filtre sec (g)	M_{sec}	0,2209	0,2177	0,2238	0,2202	0,2272	0,2204	0,2234	0,2210	0,2217	0,2249
Masse de l'eau dans le papier filtre (g)	M_w	0,0451	0,0487	0,0614	0,0658	0,0714	0,0725	0,0772	0,0790	0,0838	0,0924
Teneur en eau du papier filtre (%)	w_f	20,44	22,35	27,45	29,87	31,45	32,92	34,54	35,76	37,79	41,07
Hamblin	pF	4,60E+00	4,44E+00	4,02E+00	3,83E+00	3,70E+00	3,57E+00	3,44E+00	3,34E+00	3,17E+00	2,91E+00
Succion (Hamblin) (kPa)	Ψ	3,98E+03	2,78E+03	1,06E+03	6,69E+02	4,96E+02	3,75E+02	2,76E+02	2,19E+02	1,49E+02	8,03E+01
Fawcett et Collis	PF	4.5506	4.436	4.13	3.9848	3.89	3.8018	3.7046	3.6314	3.5096	3.3128
Succion (F-C)	Ψ	3.55E+03	2.73E+03	1.35E+03	9.65E+02	7.75E+02	6.33E+02	5.06E+02	4.28E+02	3.23E+02	2.05E+02
Chandler	PF	4.55516	4.43865	4.12755	3.97993	3.88355	3.79388	3.69506	3.62064	3.49681	3.29673
Succion (Ch)	Ψ	3.59E+03	2.74E+03	1.34E+03	9.54E+02	7.64E+02	6.22E+02	4.95E+02	4.17E+02	3.14E+02	1.98E+02
Succion (Daniel) (kPa)	Ψ	4,30E+03	4,30E+03	1,40E+03	8,00E+02	7,00E+02	6,00E+02	5,00E+02	4,00E+02	1,00E+02	0,00E+00

Tableau A-2 : détermination des succions du Gundseal par la méthode du papier filtre

Mass sèche correspondante (g)	masse sèche totale	ω requise (%)	épaisseur (m)	surface (m ²)	Vt(m ³)	Vv	masse volumique sèche	teneur en eau volumique	psi(kPa)	e	n
42,24	70,93	17	1,17E-01	0,00785398	9,19E-04	9,00E-04	77,1887871	0,01312209	3,98E+03	9,79E-01	4,95E-01
28,69											
35,36	69,52	28	1,14E-01	0,00785398	8,93E-04	8,74E-04	77,8501435	0,02179804	2,78E+03	9,79E-01	4,95E-01
34,16											
39,23	72,27	46	1,21E-01	0,00785398	9,48E-04	9,28E-04	76,2361408	0,03506862	1,06E+03	9,79E-01	4,95E-01
33,04											
43,43	86,55	56	1,37E-01	0,00785398	1,08E-03	1,05E-03	80,3784702	0,04501194	6,69E+02	9,77E-01	4,94E-01
43,12											
30,83	62,55	66	1,12E-01	0,00785398	8,77E-04	8,61E-04	71,3630229	0,0470996	4,96E+02	9,82E-01	4,95E-01
31,72											
34,75	65,93	79	1,23E-01	0,00785398	9,68E-04	9,50E-04	68,1369182	0,05382817	3,75E+02	9,82E-01	4,96E-01
31,18											
30,71	65,69	89	1,28E-01	0,00785398	1,01E-03	9,91E-04	65,1902616	0,05801933	2,76E+02	9,83E-01	4,96E-01
34,98											
30,04	65,29	96	1,26E-01	0,00785398	9,86E-04	9,69E-04	66,2388923	0,06358934	2,19E+02	9,83E-01	4,96E-01
35,25											
32,37	62,93	101	1,31E-01	0,00785398	1,02E-03	1,01E-03	61,3984403	0,06201242	1,49E+02	9,84E-01	4,96E-01
30,56											
35,42	70,92	145	1,65E-01	0,00785398	1,30E-03	1,28E-03	54,6268291	0,0792089	8,03E+01	9,85E-01	4,96E-01
35,5											

Tableau A-3: fiche de calcul de la teneur en eau volumique

L'épaisseur du géofilm est de $4,00 \cdot 10^{-4}$ m
Masse du géofilm = $2,83 \cdot 10^{-3}$ kg

succion(kPa)	teneur en eau volumique	alpha(kPa-1)	n	Sr	van Genuchten	moindre carre	somme	conductivite hyd
3.98E+03	0.13122094	4.23E-03	1.55192451	0.20941898	0.16753519	0.00131872	0.00284805	4.0561E-17
2.78E+03	0.2179804			0.2548258	0.20386064	0.00019937		1.4969E-16
1.06E+03	0.35068625		m	0.42320196	0.33856157	0.00014701		4.5106E-15
6.69E+02	0.45011943		0.35563876	0.52808575	0.4224686	0.00076457		2.0658E-14
4.96E+02	0.47099595			0.60246997	0.48197597	0.00012056		5.2359E-14
3.75E+02	0.53828165			0.67260971	0.53808777	3.7592E-08		1.1678E-13
2.76E+02	0.58019333			0.7466649	0.59733192	0.00029373		2.5895E-13
2.19E+02	0.63589337			0.79738298	0.63790638	4.0522E-06		4.4014E-13
1.49E+02	0.62012425			0.8677059	0.69416472	0.00548199		9.253E-13
8.03E+01	0.79208902			0.94082579	0.75266064	0.0015546		2.1825E-12

Tableau A-4: calage Van Genuchten du Gundseal

succion(kPa)	succion(cm)	tetha	alpha	n
3.98E+03	3.98E+04	0.23954931	1.00E-04	1.84
2.78E+03	2.78E+04	0.31483223		
1.06E+03	1.06E+04	0.56348824		
6.69E+02	6.69E+03	0.66283816		
4.96E+02	4.96E+03	0.7088297		
3.75E+02	3.75E+03	0.73869835		
2.76E+02	2.76E+03	0.76024198		
2.19E+02	2.19E+03	0.77077124		
1.49E+02	1.49E+03	0.78130132		
8.03E+01	8.03E+02	0.78853556		

Tableau A-5 : résultats obtenus avec les données de Babu pour le Gundseal

Ench. n°	Masse GSB (g)	Masse en eau correspondante(g)	Mass sèche correspondante (g)	ω requise (%)	Masse d'eau à ajouter (g)	Masse finale (g)
1	49.04	9.89	39.15	28	1.08	50.12
2	47.52	9.58	37.94	28	1.04	48.56
3	46.62	9.40	37.22	46	7.72	54.34
4	48.71	9.82	38.89	46	8.07	56.78
5	46.80	9.43	37.37	56	11.49	58.29
6	47.05	9.49	37.56	56	11.55	58.60
7	47.00	9.48	37.52	66	15.29	62.29
8	64.00	12.90	51.10	66	20.82	84.82
9	48.22	9.72	38.50	89	24.54	72.76
10	44.73	9.02	35.71	89	22.77	67.50
11	45.74	9.22	36.52	96	25.84	71.58
12	44.31	8.93	35.38	96	25.03	69.34
13	46.54	9.38	37.16	101	28.15	74.69
14	47.83	9.64	38.19	101	28.93	76.76
15	45.85	9.24	36.61	145	43.84	89.69
16	46.30	9.33	36.97	145	44.27	90.57

Tableau A-6 : fiche de préhydratation du Bentomat

Teneur en eau initiale du Bentomat $w_0 = 20,16 \%$

Balance: LER TOLEDO Pb 3002-s (1/100^{ème})

Balance : METTLER Type B5 (1/10000^{ème})

Echantillon	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
Teneur en eau du GSB %	w	28	46	56	66	89	96	101	145
Masse du pillulier (g)	M_p	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558	55,4558
Masse du pillulier +masse du papier filtre humide (g)	$M_p + M_{pf}$	55,7160	55,7403	55,7464	55,7522	55,7667	55,7712	55,7785	55,7830
Masse du papier filtre humide (g)	M_{hum}	0,2602	0,2845	0,2906	0,2964	0,3109	0,3154	0,3227	0,3272
Masse du papier filtre sec (g)	M_{sec}	0,2211	0,2276	0,2235	0,2220	0,2236	0,2257	0,2285	0,2280
Masse de l'eau dans le papier filtre (g)	M_w	0,2280	0,0569	0,0671	0,0744	0,0873	0,0897	0,0942	0,0992
Teneur en eau du papier filtre (%)	w_f	17,6848	25,0120	30,0064	33,5209	39,0514	39,7266	41,2222	43,4887
Hamblin : $pF=6,281-0,0822 \cdot w_f$		4,8273	4,2250	3,8145	3,5256	3,0709	3,0155	2,8925	2,7062
Succion (Hamblin) (kPa)	ψ	6,72E+03	1,68E+03	6,52E+02	3,35E+02	1,18E+02	1,04E+02	7,81E+01	5,08E+00
Succion (Daniel) (kPa)	ψ	4,30E+03	1,40E+03	8,00E+02	7,00E+02	5,00E+02	5,00E+02	1,00E+02	0,00E+00
Fawcett et Collis	PF	4,72E+00	4,28E+00	3,98E+00	3,77E+00	3,43E+00	3,39E+00	3,30E+00	3,17E+00
Succion (F-C)	ψ	5,19E+03	1,89E+03	9,47E+02	5,83E+02	2,71E+02	2,47E+02	2,01E+02	1,47E+02
Chandler	PF	4,72E+00	4,28E+00	3,97E+00	3,76E+00	3,42E+00	3,38E+00	3,29E+00	3,15E+00
Succion (Ch)	ψ	5,28E+03	1,89E+03	9,36E+02	5,71E+02	2,63E+02	2,39E+02	1,94E+02	1,41E+02

Tableau A-7: fiche de préhydratation du Bentomat

calage de Van Genuchten

succion(kPa)	teneur en eau volumique	alpha(kPa-1)	n	Sr	Van Genuchten	moindre carre	somme	conductivite hydraulique
6719,06	0,17505974	2,39E-02	1,28	0,24113464	0,16879425	3,9256E-05	0,00299454	2,59868E-19
1678,8	0,2728136			0,35498537	0,24848976	0,00059165		1,32049E-17
652,339	0,30793104		m	0,46048264	0,32233784	0,00020756		1,87856E-16
335,4146	0,42362218		0,21875	0,55016028	0,3851122	0,00148302		1,17599E-15
117,753	0,48358238			0,71084107	0,49758875	0,00019618		1,79698E-14
103,62701	0,50331672			0,73085303	0,51159712	6,8565E-05		2,44702E-14
78,07877	0,52204508			0,77417721	0,54192404	0,00039517		4,71776E-14
5,08427	0,69371535			0,98584376	0,69009063	1,3139E-05		2,02848E-12

Tableau A-8: calage Van Genuchten du Bentomat

succion(kPa)	succion(cm)	tetha	alpha	n	tetha sat
6,72E+03	6,72E+04	0,14438065	1,00E-04	1,848	0,14657834
1,68E+03	1,68E+04	0,40863109			0,41042621
6,52E+02	6,52E+03	0,61982364			0,6200673
3,35E+02	3,35E+03	0,69506291			0,69494047
1,18E+02	1,18E+03	0,72960707			0,72953146
1,04E+02	1,04E+03	0,73093713			0,73087183
7,81E+01	7,81E+02	0,73298603			0,73294006
5,08E+00	5,08E+01	0,73598052			0,73597978

Tableau A-9 : résultats obtenus avec les données de Babu pour le Bentomat

Où:

$$V_v : \text{volume des vides (m}^3\text{)} = epf.S - \left[\frac{(M_{st} - MS_g.S)}{\gamma_{sb}} \right] + \left(\frac{MS_g.S}{\gamma_{sg}} \right)$$

M_{st} : masse sèche totale

MS_g : masse surfacique des géotextile g/m^2

γ_{sb} : poids volumique des grains solides de la bentonite = 26,5 kN/m³

γ_{sg} : poids volumique des grains solides des géotextiles = 9 kN/m³

V_t : volume total du GSB (m³) = $epf.S$

epf : épaisseur du GSB

S : surface du GSB

M_{st} : masse sèche totale

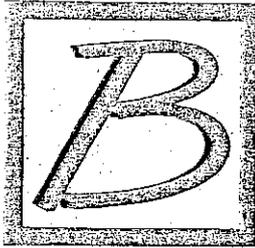
Pas de temps imposés pour la résolution numérique du cas non saturé

Temps modifié	Essai 1 (Touze-foltz)		Essai 2 (Touze-Foltz)	
	Temps (h)	Temps (mn)	Temps (h)	Temps (mn)
36	0,01	0,60	0,01	0,60
4500	1,25	75,00	1,00	60,00
8700	2,42	145,00	2,00	120,00
12300	3,42	205,00	2,00	180,00
15900	4,42	265,00	18,95	1137,00
19500	5,42	325,00	19,95	1197,00
23100	6,42	385,00	21,45	1287,00
100200	27,83	1670,00	23,45	1407,00
$1,67.10^5$	46,42	2785,00	25,95	1557,00
$1,92.10^5$	53,42	3205,00	42,95	2577,00
$4,28.10^5$	118,87	7132,00	48	2880,00
$5,13.10^5$	142,58	8555,00	50,45	3027,00
$5,99.10^5$	166,42	9985,00	66,95	4017,00
$6,87.10^5$	190,42	11425,00	68,95	4137,00
$7,72.10^5$	214,42	12865,00	70,95	4257,00
$1,03.10^6$	286,42	17185,00	74,45	4467,00
			211	12660,00
			235,033	14102,00
			307,033	18422,00

Tableau A-10: les différents pas de temps imposés

Les essais 1 et essai 2 représentent les résultats de la cellule de mesure de transmissivité d'interface de Touze-Foltz.

Annexe 4
Fiches techniques du Gundseal et du Bentomat



BENTOMAT

LA BENTONITE DE SODIUM NATURELLE

L'ORIGINE DE LA BENTONITE DE SODIUM NATURELLE

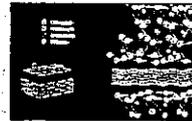
Il y a 80 millions d'années, des cendres volcaniques se sont déposées au fond d'une mer intérieure. L'eau saline a transformé les sédiments en Bentonite de Sodium Naturelle. A ce jour, lors de l'excavation, la Bentonite de Sodium Naturelle forme toujours une couche parfaitement étanche.

Après séchage et broyage, cette argile naturelle est utilisée comme produit d'étanchéité. Bentomat permet de développer sur les ouvrages en terre un revêtement étanche d'épaisseur uniforme, d'éviter l'infiltration de l'eau et des substances polluantes.

FONCTIONNEMENT - CYCLE D'HYDRATATION

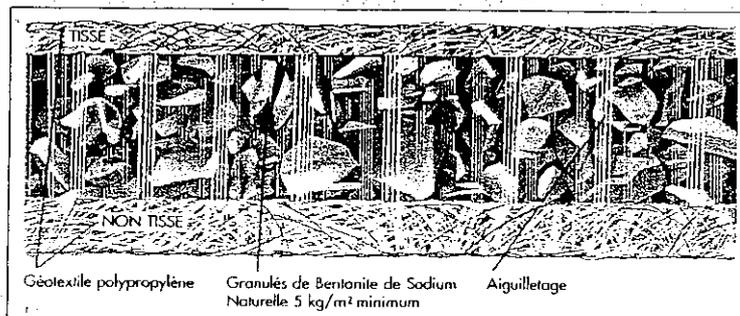
La Bentonite de Sodium Naturelle appartient au groupe des argiles Smectites et est composée d'une juxtaposition de feuillets extrêmement petits, très minces et peu liés entre eux. Les feuillets sont dipolaires. La charge positive se manifeste sur le périmètre des feuillets et la charge négative est située sur la surface des feuillets. La Bentonite de Sodium Naturelle contient des ions de sodium présents sur la surface des feuillets formant ainsi le lien. Dès que la Bentonite est en contact avec l'eau, les molécules d'eau pénètrent dans l'espace interfoliaire, dissociant le sodium. Il en résulte, que les charges négatives écartent les feuillets et provoquent ainsi le gonflement.

Les ions d'oxygène du silice-tétraèdre et les ions d'hydrogène venant de l'eau formeront ainsi des ponts d'hydrogène. Ceux-ci forment une structure moléculaire rigide en plusieurs couches superposées. La Bentonite peut gonfler jusqu'à 15 fois son volume initial.



DESCRIPTION DU BENTOMAT

La Bentonite de Sodium Naturelle est une argile gonflante conditionnée entre un géotextile de polypropylène non tissé et un géotextile de polypropylène tissé. Ce "Sandwich", aiguilleté à haute densité, confine de manière compacte et homogène les granulés de Bentonite (minimum 5 kg au m² - maximum 6,8 kg au m²). Le conditionnement d'une telle Bentonite rend le géocomposite BENTOMAT extrêmement robuste, flexible, facile d'application pour un grand nombre d'emplois. Le BENTOMAT saturé sous une contrainte de 40 Kpa possède après gonflement un coefficient de perméabilité de 1x10⁻¹² mlsec.

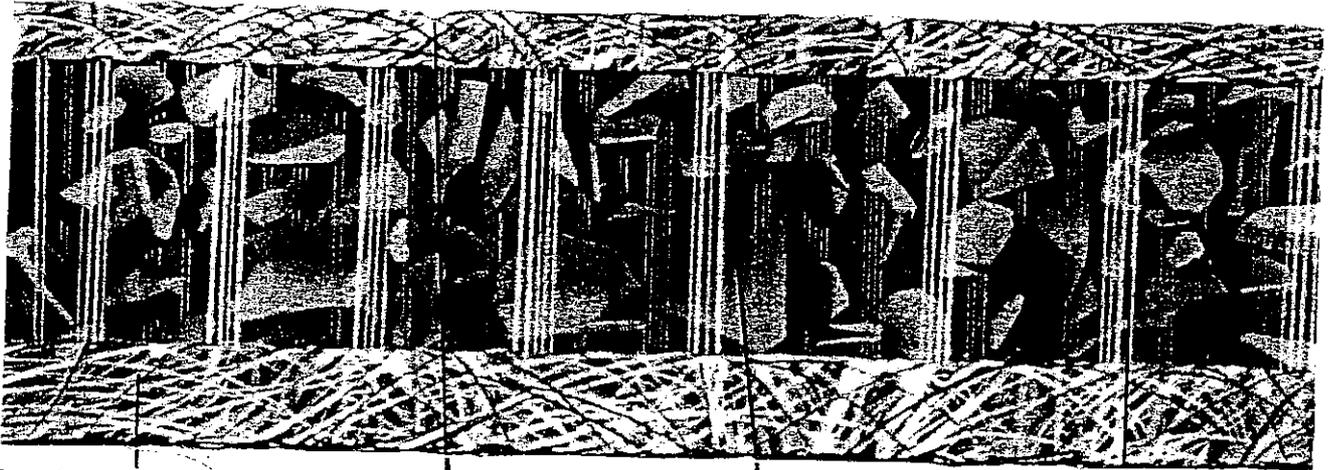


DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT

La Bentonite de Sodium Naturelle Volclay, constituant actif de *BENTOMAT* est conditionnée entre : un géotextile de polypropylène non tissé, et un géotextile de polypropylène tissé. Ce "Sandwich", aiguilleté à raison de 100 000 points de liaison par m², fixant de manière compact et homogène les granulés de Bentonite de Sodium Naturelle Volclay. Le principe consiste à pousser les fibres de la première épaisseur de géotextile (non tissé) au travers de la bentonite de sodium dans la deuxième épaisseur de géotextile (tissé), assurant ainsi une répartition uniforme de 5 kgs (minimum) de Bentonite de Sodium Naturelle VOLCLAY SALINE SEAL 100 (système breveté).

De telles caractéristiques rendent le géocomposite *BENTOMAT* extrêmement robuste, flexible, facile d'application dans toutes les situations.

Une épaisseur de *BENTOMAT* correspond à un coefficient de perméabilité de 1×10^{-12} m/sec (10 m de charge d'eau).



otextile polypropylène non tissé 220 gr /m² Géotextile polypropylène tissé 110 gr/m² Granulés de Bentonite de Sodium Naturelle 5 kg/m² minimum Aiguilletage

AVANTAGES

AUTOCICATRISANT en cas de perforation accidentelle

INSENSIBLE AUX TEMPERATURES EXTERIEURES

STABLE AU VENT

BENTONITE DE SODIUM NATURELLE A RESISTANCE CHIMIQUE ELEVEE

+ 90 % DE MONTMORILLONITE

PERMEABILITE 1×10^{-12} m/sec

EPAISSEUR CONTINUE - AIGUILLETAGE

TENEUR EN EAU LIMITEE PAR L'AIGUILLETAGE

AUTOCONFINEMENT - Le confinement peut-être différé

SURFACE UTILE DES ROULEAUX IMPORTANTE

MANIABILITÉ EXTREME, POSE

AVANTAGES

- ▷ AUTOCICATRISANT
en cas de perforation accidentelle
- ▷ INSENSIBLE AUX TEMPERATURES
EXTERIEURES
- ▷ STABLE AU VENT
- ▷ ANGLE DE FROTTEMENT ELEVE
- ▷ BENTONITE DE SODIUM NATURELLE GRANULAIRE
résistance chimique élevée
- ▷ PERMEABILITE 1×10^{-12} m/sec
- ▷ + 90% DE MONTMORILLONITE
- ▷ EPAISSEUR 6 MM CONSTANTE
- ▷ SURFACE UTILE IMPORTANTE
- ▷ AIGUILLETAGE HAUTE DENSITE
- ▷ AUTOCONFINEMENT
Le confinement peut-être différé sous contrôle
- ▷ TENEUR EN EAU LIMITEE PAR
L'AIGUILLETAGE ET LE CONFINEMENT
- ▷ MANIABILITE EXTREME

MISE EN ŒUVRE ET CONTRÔLE



1 DECHARGEMENT



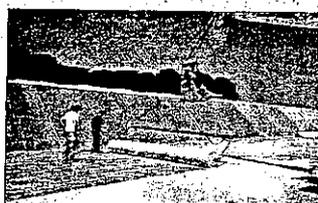
2 STOCKAGE



3 ANCRAGE EN CRETE DE TALUS



4 POSE SUR TALUS



5 POSE HORIZONTALE



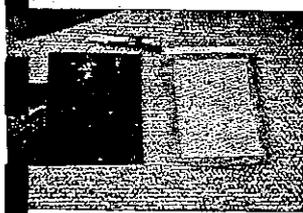
6 TRAITEMENT JOINT



7 CONFINEMENT SUR FOND



8 CONFINEMENT SUR TALUS



9 CONTROLE EXTERIEUR

SPECIFICATION DU BENTOMAT

		RESISTANCE CHIMIQUE
• DECHETS / Hydrocarbures	Bentomat Type SS 100	Haute
• LAGUNES D'EPURATION	Bentomat Type LAGUMAT SS 100	Haute
• HYDRAULIQUE - Bassins	Bentomat Type LAGUMAT CS 50	Moyenne

N° de Prix	DESIGNATION	Unité
01	<p>ETANCHEITE PARTIE COURANTE</p> <p>Il s'agit de 5 kg minimum au m² de granulés de Bentonite de Sodium Naturelle (+ 90% de montmorillonite) conditionnée entre deux géotextiles en polypropylène (1 non tissé de 220 gr/m² et 1 tissé de 110 gr/m²) aiguilletés entre eux.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Epaisseur 6 mm - 3,66 m x 30,48 m - 111,55 m² - 680 kg - 4,57 m x 38,11 m - 174,16 m² - 1180 kg <ul style="list-style-type: none"> • Perméabilité 10⁻¹² m/sec. 	m ²
02	<p>RECouvreMENTS ET PERTES HORS ANCRAGES</p> <p>Recouvrement entre lés de 4 à 10% en fonction de la géométrie du site.</p>	m ²
03	<p>TRAITEMENTS DE JOINTS</p> <p>Granulé de Bentonite de Sodium Naturelle (+ 90% de montmorillonite) 1 kg au ml minimum, au droit du recouvrement entre lés.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perméabilité 10⁻¹² m/sec. 	kg

Cahier des Charges DTB 92.07 sur simple demande.

GSE GundSeal®
Géosynthétique bentonitique

Le complexe **GSE GundSeal®** est l'unique géosynthétique bentonitique qui associe les propriétés d'expansion et d'étanchéisation de la bentonite et celle de faible perméabilité d'une géomembrane de polyéthylène. Cette combinaison de caractéristiques ne se retrouve dans aucun autre géosynthétique. Le **GSE GundSeal®** se compose d'une couche (4,9 Kgs/m²) de bentonite de sodium de haute qualité collée sur une géomembrane. Ce revêtement composite permet à l'installateur de dérouler facilement un revêtement d'argile, de remplacer ou de compléter l'argile compactée selon les besoins en étanchéité de fond ou de couverture. La couche support constituée par une géomembrane en polyéthylène qui reçoit le Gund-Seal est disponible dans une gamme d'épaisseurs de 0,3 mm jusqu'à 2 mm et peut en outre être texturée afin d'offrir un meilleur accrochage sur les pentes.

Propriétés du Complexe GSE GundSeal®

Couche de bentonite minimum	Kg/m ²	GSE QC/QS-Procédures	4,9*
Perméabilité effective	Géomembrane, m/s	ASTM E 96	2,7 x 10 ^{-15**}
Perméabilité	Bentonite, m/s	ASTM D 5084 @ (34,5 kPa)	1 x 10 ^{-10**}
Perméabilité	Soudure à recouvrement, m/s	ASTM D 5084 @ (34,5 kPa)	1 x 10 ^{-10**}
Cycles humidification/assèchement	10 cycles	ASTM D 5084 @ (34,5 kPa)	Pas d'incidence sur la perméabilité
Cycles gel/dégel	4 cycles	ASTM D 5084 @ (34,5 kPa)	Pas d'incidence sur la perméabilité
expansion libre	mm	GRI GCL-1	10
Teneur en humidité	couche de Bentonite, %	ASTM D 4643	20

* teneur en humidité ajustée 12 %

** Les procédures de test peuvent ne pas donner des résultats précis.

Propriétés de la géomembrane de Polyéthylène utilisée dans la fabrication du GSE GundSeal®

Propriétés	Unités	Méthode de test	Valeurs nominales				
			Géomembrane lisse**			Géomembrane texturée**	
Epaisseur	mm	ASTM D 751/1593/5199	0,3	0,5	1,5	0,75	1,5
Densité	g/cc	ASTM D 792/1505	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946
Indice de fusion	g/10 minutes	ASTM D 1238, Cond. 190/2,16	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Propriétés élastiques		ASTM D 638, Type IV					
Résistance à la rupture	N/mm ²	Dumbell, 2 ipm	6	14	41	6	13
Résistance à la limite d'élasticité	N/mm ²	Longeurs étalon par	5,3	8,8	26	12	24
Allongement à la rupture	%	NSF Std. 54	700	700	700	150	150
Allongement à la limite d'élasticité	%		13	13	13	13	13
Résistance à la déchirure	N	ASTM D 1004	27	67	200	98	200
Résistance au poinçonnement	N	FTMS 101, Methode 2065	71	115	356	174	356

**Disponible en épaisseurs jusqu'à 2 mm. Des informations supplémentaires sont fournies dans les fiches techniques des géomembranes GSE.

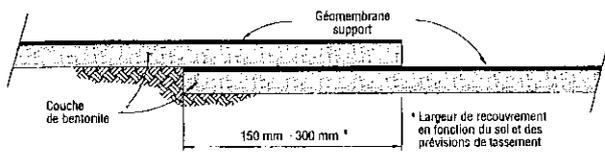
Propriétés de la bentonite entrant dans la fabrication du GSE GundSeal®

Propriétés	Unités	Méthode de test	Valeurs nominales
Teneur en montmorillonite	%	Analyse aux rayons X	90
Teneur en humidité	%	ASTM D 2216	8,2
Perméabilité	ml	API Spec 13A, Sec 4	18
Propriétés élastiques			
Expansion libre	ml	USP-NF-XVII (sec)	28
Absorption d'eau	%	ASTM E 946 (sec)	850
Densité produit brut	g/cc	ASTM B 417	1,1

Méthodes classiques d'installation du GundSeal

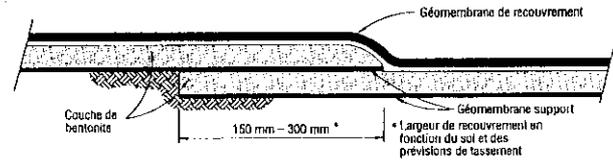
Raccords à recouvrement

Couche bentonite tournée vers le bas



Le géosynthétique Bentonitique **GSE GundSeal®** peut être utilisé pour remplacer une couche d'argile compactée (CAC) ou installé en tant que revêtement composite (géomembrane/argile). La partie bentonite remplace en totalité ou en partie un CAC tandis que la géomembrane joue le rôle du composant étanche du complexe. Le GundSeal est installé avec le côté bentonite vers le bas et simplement recouvert d'un minimum de 150 mm au niveau du raccord.

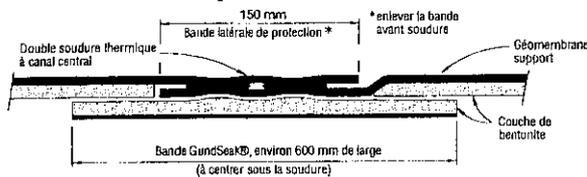
Couche bentonite tournée vers le haut



Le **GSE GundSeal®** peut être utilisé pour remplacer la partie d'argile compactée d'un revêtement composite ou de couverture. On déroule le produit avec la face bentonite orientée vers le haut. Celle-ci reçoit par-dessus une géomembrane distincte qui la recouvre directement. Cette configuration prend en sandwich la bentonite entre deux membranes, la préserve de l'humidité et offre une multiplicité de couches qui garantit la permanence des performances de l'étanchéité du système.

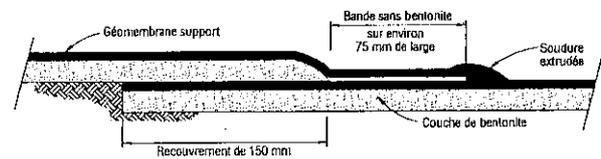
Raccords soudés

Soudure thermique à canal central



Le **GSE GundSeal®** peut être utilisé comme revêtement composite dont les membranes-supports sont thermo-soudées ensemble sur leur bord. Pour ce type d'application, le GundSeal est équipé en usine d'une bande périphérique de protection, habituellement d'une largeur 150 mm. Une fois que le produit est installé sa face bentonite orientée vers le bas, on enlève la bande de protection qui laisse apparaître des surfaces propres destinées à recevoir la thermo-soudure qui assemblera les membranes. Afin d'assurer la continuité de la couche de bentonite sous le joint, on place une bande de GundSeal qui sera centrée sous le recouvrement avant de procéder à la soudure. Le complexe d'étanchéité **GSE GundSeal®** avec raccordeur thermo-soudé offre des performances inégalées et durables.

Soudure extrudées



Le **GSE GundSeal®** peut être utilisé comme revêtement composite dont les membranes supports sont soudées ensemble sur leur bord par extrusion. On enlève la bentonite de la partie recouvrante du GundSeal, normalement sur environ 75 mm de large. Les supports-membranes peuvent alors être soudés par extrusion.

Une alternative consiste à placer une bande de géomembrane pour recouvrir un joint standard GundSeal et à la souder ensuite par extrusion à chaque support de géomembrane.

Le **GSE GundSeal®** est disponible en largeur de 5,30 m jusqu'à 61 m de long pour des épaisseurs membrane support de 0,3 à 2 mm.

- ◆ Le **GSE GundSeal®** Geobond peut être fourni avec un géotextile (25 g/m²) fixé sur la couche de Bentonite.
- ◆ Les rouleaux sont emballés dans un film extensible qui les protège de l'humidité.
- ◆ L'adhésif GundSeal est non-toxique et non-polluant.
- ◆ Le GundSeal est enroulé sur des mandrins creux et continus d'un diamètre intérieur de 150 mm.
- ◆ Chaque rouleau est livré avec 2 élingues destinées à en faciliter la manipulation sur le chantier.
- ◆ Le GundSeal peut être fourni avec une couche de bentonite spécialement traitée afin d'en optimiser les performances dans les applications où elle est en présence de solutions contaminées ou chimiques.

Ces informations ne sont données qu'à titre indicatif et ne présentent aucun caractère contractuel. GSE décline toute responsabilité en ce qui concerne l'utilisation de ces informations. Veuillez contacter GSE pour plus d'informations sur les procédures standards minimum relatives à l'assurance qualité.

Siège social Européen

GSE Lining Technology GmbH
Buxtehuder Straße 112 · D-21073 Hamburg
Allemagne
Tel. +49-40-76742-0 · Fax +49-40-76742-33

GSE France

16 rue Thoré · F-72000 Le Mans
Tel. 02.43.86.14.29
Fax 02.43.72.76.74

GSE Benelux

Goarde 78 · NL-5103 ED Dongen
Tel. (0162) 320 881
Fax (0162) 320 811

Siège social du groupe

GSE Lining Technology, Inc.
19103 Gundle Road · Houston, TX 77073
USA
Tel. +1-281-443-8564 · Fax +1-281-875-6010



For environmental lining solutions . . . the world comes to GSE™
A Gundle/SLT Environmental, Inc. Company