HAL
open science

COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS COMPACTÉS

Olivier Cuisinier

To cite this version:

Olivier Cuisinier. COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS COMPACTÉS. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2002. Français. NNT : . tel-00004524

HAL Id: tel-00004524

https://theses.hal.science/tel-00004524

Submitted on 16 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy

Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages

École Doctorale RP2E

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de :

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité :

Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique

par

Olivier CUISINIER

COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS COMPACTÉS

Soutenue le 31 octobre 2002 devant la commission d'examen

Membres du Jury :

M. P. DELAGE	Rapporteur
M. J.P. FLEUREAU	Rapporteur
Mme F. MASROURI	Directeur de thèse
Mme O. OZANAM	
M. E. ROMERO-MORALES	
M. I. SHAHROUR	Rapporteur
M. J.P. TISOT	

À Claire

À ma sœur

À mes parents

Remerciements

Avant tout je tiens à exprimer ma gratitude à Madame Farimah Masrouri, Professeur à l'INPL-ENSG et directrice de thèse, pour m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche. Je la remercie vivement de sa disponibilité de tous les instants et pour ses conseils avisés qui ont rendu ce travail possible.

Je remercie également Madame Françoise Homand, Professeur à l'INPL-ENSG et directrice du laboratoire, pour m'avoir accueilli au sein du LAEGO.

Je tiens à remercier Monsieur J.M. Fleureau, Professeur à l'École Centrale de Paris, Monsieur P. Delage, Directeur de recherche à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, ainsi que Monsieur I. Shahrour, Professeur à l'École Universitaire d'Ingénieurs de Lille, pour avoir bien voulu accepter la tâche de rapporteur de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier Monsieur J.-P. Tisot, Professeur et Directeur de l'École Nationale Supérieure de Géologie, Monsieur E. Romero-Morales, Docteur-Ingénieur à l'Université Polytechnique de Catalogne, et Madame O. Ozanam, Ingénieur spécialiste à l'ANDRA, d'avoir accepté d'être membre du jury de thèse.

Mes remerciements vont aussi à Éric Lefèvre, Assistant-Ingénieur au LAEGO, pour son aide dans la conception des appareils œdométriques à solutions salines et dans la réalisation des essais. Je tiens à citer Danielle Parmentier et Jean-François Noëlle qui m'ont aidé régulièrement dans la réalisation des essais.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à M. François Bartoli, Directeur de recherche au CNRS, et à Mme Geneviève Villemin, Ingénieur de recherche au CNRS, pour leur collaboration dans la préparation des éprouvettes destinées aux observations microscopiques.

Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne citais pas les personnes qui ont eu à supporter tous les hauts et les bas qui se sont succédés tout au long de la thèse. Je pense surtout à Annelise et Antoine sans qui je n'aurais pas pu traverser ces trois ans. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon amitié profonde et de ma reconnaissance.

Mes pensées vont aussi à Tanguy, à Pauline, à Arnold et à tous les autres doctorants ou étudiants que j'ai pu croiser en 3 ans au LAEGO (Sandra, Sonia, Christophe, Hervé, Cécile, etc.). Je n'oublierai pas non plus les pauses cafés en compagnie de Patrick, Jacques, Laurent, et tous les autres membres du LAEGO et de l'ASGA.

Enfin, pour leur soutien très précieux de tous les instants, j'associe à ce travail Claire, ma sœur Céline, mes parents ainsi que toute ma famille.

Résumé

Les sols gonflants compactés sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment en géotechnique et en géotechnique de l'environnement. Ces matériaux subissent d'importantes variations de volume en fonction de leur état hydrique, *i.e.* de leur succion. L'objectif principal du travail présenté ici est d'étudier l'influence de ce paramètre sur le comportement mécanique d'un matériau gonflant compacté dans la gamme des succions comprises entre 0 et 300 MPa.

Pour atteindre cet objectif, deux types d'œdomètre à succion contrôlée, soit par la méthode osmotique, soit par la technique des solutions salines saturées, ont été utilisés, les œdomètres à solutions salines ayant entièrement été développés pour ce travail.

Le support de l'étude est un matériau gonflant compacté. Les essais réalisés montrent en premier lieu que la pression de préconsolidation apparente atteint une valeur constante à partir de 38,5 MPa, dans le domaine des fortes succions. Par contre, la pente de compression plastique varie de manière non monotone en fonction de la succion appliquée. La variation de ces deux paramètres apparaît fortement liée à la structure initiale des éprouvettes. Par la suite, l'influence des sollicitations hydriques complexes a été étudiée, ce qui a permis de montrer que les résultats d'un essai sur un sol gonflant dépendent du chemin de contrainte hydrique même lorsqu'une humidification est réalisée en cours d'essai. L'interprétation de ces résultats dans le cadre des modèles de Barcelone a ensuite été proposée afin d'évaluer les possibilités de chacun des deux modèles existants. Le modèle de Barcelone pour sols gonflants nécessite, en outre, la réalisation d'essais comportant des cycles hydriques et au moins un essai à volume constant et à succion contrôlée.

En conclusion, ce travail a permis la mise en œuvre, le développement et la validation de deux dispositifs expérimentaux à succion contrôlée. Ceci a rendu possible la caractérisation du comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté en fonction de différentes sollicitations hydriques.

Mots clés : sol gonflant ; sol compacté ; succion ; solutions salines ; osmotique ; structure ; comportement hydromécanique.

Abstract

The use of compacted soils in engineering practice is very wide spread, especially in geotechnical and environmental engineering. These soils can be submitted to moisture variations, *i.e.* suction changes, that induce volumetric deformations. The main objective of this thesis is to study the suction influence on the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil in the range of suction comprised between 0 and 300 MPa.

For this purpose, two kinds of suction controlled oedometers, using the osmotic method or the salt solutions technique, were employed. The salt solutions oedometer were especially developed for this study.

The samples were made with a compacted swelling material. The experimental study has shown that the apparent preconsolidation stress reaches a constant value above a suction of 38.9 MPa. The slope of the plastic compression curve had a maximum value under a suction of 4 MPa. These results seem to be related to the initial internal structure of the samples. Then the influence of complex hydromechanical stress paths was also investigated. It appeared that the results of the tests conducted on a swelling soil depended on the followed stress path even if a wetting is performed during a test. In the last part of this work, the test results were interpreted with the Barcelona Basic Model and Barcelona Expansive Model (BExM). The possibilities of both models were compared. To interpret the test results with the BExM, it is necessary to conduct some additional tests that include a suction cycle and also a constant volume test with a suction controlled wetting.

As a conclusion, two suction controlled experimental devices were developed and validated in this study. With these devices, the influence of structure and suction on the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soils was characterised.

Keywords: swelling soil; compacted soil; suction; salt solutions; osmotic; structure; hydromechanical behaviour.

Sommaire

Introduction générale ……... 1

CHAPITRE I :

COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction 5

I.2. La succion.....6
I.2.1. Différents états de saturation d'un sol.....6
I.2.2. Définition.....6
I.2.3. Techniques expérimentales d'imposition ou de mesure de la succion.....8
I.2.3.1. Méthodes d'imposition de la succion.....9
I.2.3.2. Méthodes de mesure de la succion 11
I.2.4. Œdomètres utilisant des dispositifs de mesure ou d'imposition de la succion.....12
I.2.4.1. Œdomètres avec système d'imposition de la succion 12
I.2.4.2. Œdomètres avec système de mesure de succion 15

I.3. Quelques rappels sur le comportement des sols non saturés non gonflants 15
I.3.1. Courbe de rétention hydrique 15
I.3.2. Phénomène d'effondrement sous charge 16
I.3.3. Compressibilité.....16
I.3.4. Compressibilité hydrique.....18

I.4. Comportement des sols gonflants : synthèse bibliographique.....19
I.4.1. Les argiles : minéralogie et propriétés.....20
I.4.1.1. Unités minéralogiques de base 20
I.4.1.2. Différents types d'argile.....20
I.4.1.3. Propriétés électrochimiques et liaisons interfoliaires 21
I.4.2. Gonflement des particules argileuses 22
I.4.3. Étude du gonflement des sols 24
I.4.3.1. Détermination des propriétés de gonflement : méthodes 24
I.4.3.2. Facteurs influençant le gonflement.....26
I.4.3.3. Évolution de la pression de gonflement en fonction de l'état hydrique.....27
I.4.4. Structure des sols gonflants 28
I.4.4.1. Niveaux structuraux.....28

I.4.4.2. Évolution de la structure en fonction de différentes sollicitations 29
I.4.5. Comportement hydromécanique des sols gonflants 31
I.4.5.1. État saturé (succion nulle) 32
I.4.5.2. État non saturé 33

I.5. Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés 41
I.5.1. Contrainte effective dans les sols non saturés 41
I.5.2. Approches en variables indépendantes et notion de surface d'état 42
I.5.3. Modèle élastoplastique de Barcelone pour sols non saturés 42
I.5.3.1. Définition des surfaces de charges 43
I.5.3.2. Formulation du modèle 43
I.5.3.3. Couplages 44
I.5.3.4. Remarques 45
I.5.4. Modélisation de Barcelone pour sols gonflants (BExM) 45
I.5.4.1. Description du modèle 46
I.5.4.2. Performances et limites du modèle BExM 49

I.6. Conclusion 49

CHAPITRE II

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

II.1. Introduction 51

II.2. Choix des méthodes d'imposition de la succion 52
II.2.1. Œdomètre osmotique 53
II.2.1.1. Étalonnage des solutions osmotiques 53
II.2.1.2. Méthode de contrôle de la succion imposée 55
II.2.1.3. Description de l'appareil œdométrique osmotique 57
II.2.2. Œdomètre à solutions salines 60
II.2.2.1. Quelques considérations sur la méthode des solutions salines 60
II.2.2.2. Description des œdomètres à solutions salines conçus 67

II.3. Autres techniques utilisées 71
II.3.1. Imposition de la succion 71
II.3.2. Mesure de succion 71
II.3.3. Préparation des éprouvettes destinées à l'observation microscopique 72

II.4. Conclusion 73

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET VALIDATION DES DISPOSITIFS ŒDOMÉTRIQUES

III.1. Introduction 75

III.2. Matériaux employés et préparation des éprouvettes 76
III.2.1. Paramètres d'identification des matériaux 76
III.2.2. Courbes de compactage 77
III.2.3. Méthode de préparation des éprouvettes testées 78
III.2.4. Succion initiale des éprouvettes 79
III.2.5. Remarque 79

III.3. Validation des dispositifs expérimentaux à succion contrôlée 79
III.3.1. Œdomètres osmotiques 80
III.3.1.1. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée 80
III.3.1.2. Mode de chargement mécanique 82
III.3.1.3. Influence du type de PEG 83
III.3.2. Œdomètres à solutions salines 84
III.3.2.1. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée 84
III.3.2.2. Mode de chargement mécanique 86
III.3.2.3. Validation des appareils œdométriques développés 87
III.3.3. Continuité entre les deux techniques expérimentales 89
III.3.3.1. Essais réalisés 90
III.3.3.2. Interprétation des résultats 91
III.3.3.3. Commentaires 92
III.3.4. Conclusion 92

III.4. Étude des caractéristiques du matériau sélectionné 92
III.4.1. Courbe de rétention 93
III.4.2. Compactage et succion initiale 96
III.4.3. Évolution de la structure interne des éprouvettes en fonction de la succion 97
III.4.4. Commentaires 102

III.5. Conclusion 102

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN SOL GONFLANT COMPACTÉ DANS UNE GAMME ÉTENDUE DE SUCCION

IV.1. Introduction 105

IV.2. Programme expérimental 106

IV.2.1. Nomenclature des essais 106
IV.2.2. Caractéristiques de l'ensemble des essais réalisés 107

IV.3. Caractérisation du comportement hydromécanique d'un matériau gonflant pour des succions comprises entre 0 et 300 MPa 109
IV.3.1. Chemins de contrainte suivis 110
IV.3.2. Exemple d'interprétation d'un essai 111
IV.3.3. Essais menés avec des succions comprises entre 0 et 287,9 MPa 112
IV.3.3.1. Courbes de compressibilité 112
IV.3.3.2. Variation des caractéristiques des éprouvettes en fonction de la succion appliquée 115
IV.3.3.3. Variation des paramètres mécaniques en fonction de la succion imposée 121
IV.3.3.4. Commentaires 124
IV.3.4. Essais complémentaires 125
IV.3.4.1. Influence du compactage initial 125
IV.3.4.2. Comportement mécanique des constituants du mélange 129
IV.3.5. Conclusion 131

IV.4. Caractérisation des couplages hydromécaniques 131
IV.4.1. Influence du chemin de contrainte sur le résultat d'un essai 132
IV.4.2. Influence d'un cycle hydrique 134
IV.4.2.1. Chemins de contrainte suivis 135
IV.4.2.2. Cycle hydrique sous faible charge 135
IV.4.2.3. Cycle hydrique sous forte charge 138
IV.4.3. Essais d'effondrement 141
IV.4.4. Pression de gonflement 145
IV.4.5. Conclusion 146

IV.5. Interprétation des résultats dans le cadre du modèle de Barcelone 147
IV.5.1. Détermination des surfaces de charge initiales 147
IV.5.1.1. Modèle de Barcelone pour sols non saturés non gonflant (BBM) 148
IV.5.1.2. Modèle de Barcelone pour sols non saturés gonflants (BExM) 149
IV.5.2. Interprétation des essais d'effondrement 151
IV.5.3. Interprétation des essais comportant un cycle hydrique 153
IV.5.3.1. Cycle hydrique sous faible charge mécanique 153
IV.5.3.2. Cycle hydrique sous forte charge 156
IV.5.4. Conclusion 158

IV.6. Conclusion 160

Conclusion générale 163

Bibliographie 167

Annexes 177

Listes des figures

Figure I.1. Phénomène d'ascension capillaire. 7
Figure I.2. a : Plaques tensiométriques ; b : Appareil de Richards. 9
Figure I.3. Principe de l'imposition de succion par la méthode osmotique. 10
Figure I.4. Œdomètre à succion contrôlée par surpression d'air (Habib & Karube, 1993). 13
Figure I.5. Œdomètre osmotique (Kassif & Ben Shalom, 1971). 13
Figure I.6. Œdomètre à solutions salines (Oteo Mazo et al., 1995). 14
Figure I.7. Appareil œdométrique à solutions salines (Bernier et al., 1997). 15
Figure I.8. Compressibilité ; (a) : en fonction de la succion (Alonso et al., 1990) ; (b) : relations l(s) (Kogho et al., 2001) ; (c) : influence de la pression moyenne (Geiser, 1999). 17
Figure I.9. Compressibilité hydrique (Alonso et al., 1990). 19
Figure I.10. Représentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique. 20
Figure I.11 Représentation schématique d'un octaèdre et d'une couche octaédrique. 20
Figure I.12. Structure des argiles du groupe des smectites. 21
Figure I.13. Représentation schématique de la double couche diffusive. 23
Figure I.14. Influence de la densité sèche sur le gonflement (Sridharan et al., 1986). 26
Figure I.15. Évolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification (Alonso et al., 1999). 27
Figure I.16. Structure des sols gonflants (d'après Gens & Alonso, 1992). 28
Figure I.17. Évolution de la courbe porosimétrique d'un matériau gonflant en fonction de la succion u cours de l'humidification (Cui et al., 2002). 31
Figure I.18. Compressibilité de deux smectites saturées (sodique et calcique) (Marcial et al., 2001). 32
Figure I.19. Influence sur la courbe de rétention : (a) du confinement (Yahia-Aissa, 1999) ; (b) du poids volumlique sec initial (Romero et al., 1999). 33
Figure I.20. Pente de compression vierge de différents matériaux gonflants. 34
Figure I.21. Variation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion imposée. 36
Figure I.22. Évolution de l'indice des vides au cours d'un cycle dessiccation/humectation sous deux pressions verticales (d'après Robinet et al., 1997). 37
Figure I.23. Variation du potentiel de gonflement selon différents auteurs. 38
Figure I.24. Variation de l'indice des vides d'une argile gonflante fortement compactée au cours d'un cycle d'humidification/dessiccation (Delage et al., 1998). 39
Figure I.25. Variations de volume d'une argile gonflante lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes (Alonso et al., 1995). 39
Figure I.26. Influence du chemin de contrainte sur les déformations (d'après Villar, 1999) : (a) chemins suivis ; (b) variations de l'indice des vides. 40
Figure I.27. Surfaces de plasticité dans le plan (p* – s) (Alonso et al., 1990). 43
Figure I.28. Couplages LC et SI. 45

Figure I.29. Représentation de la courbe NL (Gens & Alonso, 1992). 47
Figure I.30. Surfaces de charge du BExM (Gens & Alonso, 1992). 47
Figure I.31. Couplage entre la micro et la macrostructure (Gens & Alonso, 1992). 48

Figure II.1. Gamme accessible par les techniques de mesure ou d'imposition de la succion. 52
Figure II.2. Relation entre la concentration en PEG et la succion (Williams & Shaykewich, 1969 ; Cui, 1993). 53
Figure II.3. Courbe d'étalonnage du PEG dans une gamme étendue de succion. 55
Figure II.4. Relation entre le degré Brix et la concentration de la solution osmotique (Delage et al., 1998). 56
Figure II.5. Schéma de principe du dispositif œdométrique osmotique. 57
Figure II.6. Œdomètres osmotiques en cours d'essai. 58
Figure II.7. Incertitude relative sur la succion imposée en fonction de la succion imposée. 62
Figure II.8. Incertitude relative sur la succion imposée en fonction de la succion imposée (détail)... 62
Figure II.9. Succion imposée par un sel donné en fonction de la température. 65
Figure II.10. Schéma d'un œdomètre à solutions salines : (a) vue générale ; (b) détail de l'emplacement de l'éprouvette. 68
Figure II.11. Vue de l'ensemble du dispositif expérimental basses pressions. 69
Figure II.12. Détails de l'intérieur d'une œdomètre à solutions salines : (a) avec éprouvette ; (b) piston en place. 69

Figure III.1. Courbes de compactage statique des matériaux étudiés. 77
Figure III.2. Volume d'eau échangé après l'application d'une succion de 1,2 MPa (PEG 6 000). 81
Figure III.3. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'application du chargement mécanique (les valeurs indiquées correspondent à la pression verticale imposée). 83
Figure III.4. Influence du poids moléculaire du PEG sur la compressibilité. 84
Figure III.5. Variation de l'indice des vides lors de l'application d'une succion de 38,9 MPa à une éprouvette dont la succion est d'environ 20 MPa. 86
Figure III.6. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'application du chargement mécanique (les valeurs indiquées correspondent à la pression verticale imposée). 87
Figure III.7. Essai de compression œdométrique sous une succion de 20,5 MPa. 88
Figure III.8. Vérification de la répétabilité entre les différents œdomètres à solutions salines. 89
Figure III.9. Résultats des essais Ss et Os. 90
Figure III.10. Courbes d'humidification et de dessiccation d'une éprouvette de mélange compacté. 94
Figure III.11. Courbe de rétention des éprouvettes. 95
Figure III.12. Relation entre le compactage et la succion initiale des éprouvettes (Londres, 2001 ; Carof, 2002). 96
Figure III.13. Structure sous la succion initiale (Î4). 98
Figure III.14. Structure sous la succion initiale (Î10). 98
Figure III.15. Structure sous une succion de 4 MPa (Î4). 99
Figure III.16. Structure sous une succion de 4 MPa (Î10). 99
Figure III.17. Structure sous une succion de 0 MPa (Î4). 100
Figure III.18. Structure sous une succion de 0 MPa (Î10). 100

Figure IV.1. Chemins de contrainte dans le plan (- s). 110
Figure IV.2. Courbe de compressibilité de l'essai SDL2. 111
Figure IV.3. Courbes de compressibilité en fonction de la succion appliquée – méthode osmotique. 113

Figure IV.4. Courbes de compressibilité en fonction de la succion appliquée –méthode des solutions salines. 114
Figure IV.5. Gonflement en fonction de la succion appliquée (humidification). 116
Figure IV.6. Variation du degré de saturation durant chaque essai. 118
Figure IV.7. Variation de la teneur en eau massique au cours de chaque essai. 119
Figure IV.8. Variation de k avec la succion. 121
Figure IV.9. Variation de l(s) avec la succion. 122
Figure IV.10. Variation de p0(s) avec la succion. 123
Figure IV.11. Courbes de compressibilité des essais R1 et OWL6 (succion nulle). 126
Figure IV.12. Courbes de compressibilité des essais SP1 et SDL1 (succion de 20,5 MPa). 127
Figure IV.13. Courbes de compressibilité des essais SP2 et SDL6 (succion de 287,9 MPa). 127
Figure IV.14. Compressibilité des différents constituants du mélange. 130
Figure IV.15. Essais réalisés pour caractériser le rôle du chemin de contrainte. 132
Figure IV.16. Comparaison des résultats des essais SWL1 et SLWL. 133
Figure IV.17. Comparaison des essais SLDWL et SDL2. 134
Figure IV.18. Chemins de contrainte des essais incluant un cycle hydrique. 135
Figure IV.19. Variations de l'indice des vides au cours d'un cycle hydrique conduit sous une pression verticale de 10 kPa (D : dessiccation ; W : humidification). 136
Figure IV.20. Courbes de compressibilité des éprouvettes ayant subi un cycle hydrique sous une pression verticale de 10 kPa. 137
Figure IV.21. Courbe de compressibilité de l'essai SLWDL. 138
Figure IV.22. Variation de l'indice des vides au cours du cycle hydrique de l'essai SLDWL sous une pression verticale constante de 800 kPa. 140
Figure IV.23. Comparaison des courbes de compressibilité obtenues dans les essais SLDWL, SWL1 et SLWL. 141
Figure IV.24. Chemins de contrainte suivis pour étudier l'effondrabilité des éprouvettes. 142
Figure IV.25. Variation de hauteur des éprouvettes soumises à une humidification sous différentes pressions verticales constantes. 143
Figure IV.26. Courbes de compressibilité des essais OLWL1 et OLWL2 comparées à celle de l'essai OWL6. 145
Figure IV.27. Variation de la pression de gonflement lors de l'humidification à succion non contrôlée (Péron, 2002). 146
Figure IV.28. Courbes LC et SI initiales dans le cas où les essais sont interprétés en utilisant le modèle BBM. 149
Figure IV.29. Courbes LC, SI et SD initiales dans le cas où les essais sont interprétés en utilisant le modèle BExM. 150
Figure IV.30. Interprétation des essais d'effondrement : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM. 152
Figure IV.31. Interprétation de l'essai SDWL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM. 154
Figure IV.32. Interprétation de l'essai SWDL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM. 155
Figure IV.33. Interprétation de l'essai SLWDL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM. 156
Figure IV.34. Interprétation de l'essai SLDWL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM. 157
Figure IV.35. Essais supplémentaires proposés. 159

Listes des tableaux

Tableau I.I. Charge des minéraux argileux (Yong et Warkentin, 1975). 21
Tableau I.II. Surface spécifique des principaux minéraux argileux (Yong et Warkentin, 1975). 22

Tableau II.1. Humidité relative et succion imposée en fonction de la différence de température entre la solution saline et l'air de l'enceinte lorsque la température de la solution saline est de 20°C. 66
Tableau II.2. Caractéristiques des sels sélectionnés. 67

Tableau III.1. Caractéristiques minéralogiques des matériaux étudiés. 76
Tableau III.2. Caractéristiques géotechniques des matériaux étudiés. 77
Tableau III.3. Caractéristiques de compactage des différents matériaux. 78
Tableau III.4. Caractéristiques initiales des éprouvettes utilisées pour vérifier l'influence du type de PEG. 84
Tableau III.5. Paramètres déterminés lors des essais conduits pour valider les œdomètres à solutions salines. 88
Tableau III.6. Influence de la méthode d'imposition de la succion. 90
Tableau III.7. Caractéristiques de compactage du mélange en fonction de la pression de compactage. 97
Tableau III.8. Caractéristiques des éprouvettes destinées aux observations microscopiques. 101

Tableau IV.1. Nomenclature des essais. 107
Tableau IV.2. Essais réalisés pour caractériser le comportement hydromécanique du matériau dans le domaine des succions comprises entre 0 et 287,9 MPa. 107
Tableau IV.3. Essais réalisés pour caractériser les couplages hydromécaniques. 108
Tableau IV.4. Récapitulatif des essais complémentaires. 109
Tableau IV.5. Description des chemins suivis (technique des solutions salines). 111
Tableau IV.6. Description des chemins suivis (méthode osmotique). 111
Tableau IV.7. Caractéristiques initiales et finales des éprouvettes et paramètres mécaniques. 115
Tableau IV.8. Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais sur matériau non compacté. 126
Tableau IV.9. Influence de l'état initial sur les paramètres mécaniques. 128
Tableau IV.10. Influence de la quantité de bentonite sur les paramètres mécaniques à l'état saturé. 130
Tableau IV.11. Paramètres des éprouvettes des essais SDWL et SWDL. 135
Tableau IV.12. Paramètres mécaniques déterminés dans les essais SDWL, SWDL et SDL1. 137
Tableau IV.13. Caractéristiques de l'éprouvette utilisée lors de l'essai SLWDL. 138
Tableau IV.14. Caractéristiques de l'éprouvette utilisée lors de l'essai SLDWL. 139

Tableau IV.15. Influence du chemin de contrainte suivi sur la pente l(s) lors d'un chargement mécanique (s = 8,5 MPa). 141
Tableau IV.16. Caractéristiques des éprouvettes testées. 142
Tableau IV.17. Changement de succion qui provoque l'effondrement de l'éprouvette. 144
Tableau IV.18. Comparaison des paramètres mécaniques des essais OLWL1, OLWL2 et OWL6..144
Tableau IV.19. Caractéristiques de l'éprouvette VC. 146
Tableau IV.20. Succions pour lesquelles l'éprouvette s'effondre. 152

Introduction générale

Cadre général

Jusqu'au début des années 1960, la mécanique des sols s'est concentrée principalement sur le cas des sols totalement saturés ou bien entièrement secs. Or, dans le cas général, qu'ils soient naturels ou artificiels, les sols sont non saturés : ils contiennent une phase solide, une liquide et une gazeuse. La coexistence de ces trois phases est à l'origine du phénomène de succion dont l'influence sur le comportement mécanique des sols est l'objet d'une attention croissante depuis 1960. Cet intérêt se traduit par un nombre toujours plus important de publications qui a permis de démontrer le rôle de la succion sur le comportement mécanique des sols non saturés.

Parmi l'ensemble des matériaux existants, les matériaux gonflants non saturés font l'objet d'une attention particulière. Ces matériaux ont pendant longtemps intéressé les chercheurs en raison de la propriété qu'ils ont de changer fortement de volume lorsque leur teneur en eau, *i.e.* leur succion, est modifiée. Les exemples de désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux et variés (Chen, 1975 ; Philipponat, 1991 ; Vandangeon, 1992 ; Derriche *et al.*, 1999 ; Djedid *et al.*, 2001 ; etc.). Malgré ces inconvénients, les propriétés particulières des argiles gonflantes, faible perméabilité et rétention notamment, en font des matériaux très intéressants dans de nombreuses applications comme la construction de sites de stockage de déchets ménagers. Une synthèse des différentes solutions de stockage de ce type dans l'Union Européenne est disponible dans Koch (2001). Leur emploi est courant dans ce dernier contexte mais leur utilisation est aujourd'hui envisagée pour la construction de barrières ouvragées destinées à confiner des colis de déchets nucléaires stockés en profondeur (Chapman & Tassoni, 1985 ; Gens & Olivella, 2001 ; Andra, 2002). L'étude de ces sols fait actuellement l'objet d'un grand nombre de projets de recherche de par le monde.

Les argiles gonflantes sont donc présentes dans de nombreux contextes, leurs propriétés pouvant être à la fois profitables et/ou dommageables. Le problème primordial actuel que constitue l'entreposage de déchets, ménagers, industriels ou nucléaires, est qu'il est indispensable d'assurer la pérennité de l'ouvrage construit sur des périodes extrêmement longues, de l'ordre de plusieurs siècles. Il est donc de première nécessité d'arriver à caractériser le comportement hydromécanique de ces matériaux afin de pouvoir prévoir leur comportement à long terme, et notamment, l'influence des variations de volume dues à des modifications de leur état hydrique sur leur comportement mécanique.

Objectifs de la thèse

Les atouts des sols gonflants, faible perméabilité et fort gonflement liés à la présence d'argiles particulières, constituent autant d'obstacles majeurs à leur étude expérimentale. En effet, ces sols requièrent des temps d'essais extrêmement longs ainsi que des dispositifs expérimentaux spécifiques associés à des techniques expérimentales originales d'imposition de succion. Dans ce contexte, le premier objectif de la thèse a été la mise au point d'appareillages destinés à l'étude des sols gonflants, qu'il s'agisse de leur comportement mécanique ou bien de toutes leurs autres propriétés (structurales, hydriques, etc.). Un point important de ce travail a aussi été de s'intéresser à la validation de chacune des techniques employées et à son influence sur le comportement mesuré.

Il s'est agi ensuite de caractériser l'évolution du comportement mécanique d'un matériau gonflant compacté en fonction de la succion appliquée, ce qui constitue le deuxième objectif de la thèse. Le travail s'est attaché premièrement à évaluer l'influence d'une variation de succion d'amplitude variable sur le comportement mécanique d'un sol gonflant compacté selon une procédure constante. Ensuite, les conséquences de sollicitations hydriques complexes sur le comportement mécanique du même matériau ont été abordé à travers plusieurs essais comportant des cycles hydriques notamment. Il est apparu au cours de l'étude qu'il n'était pas possible d'interpréter les résultats obtenus sans un grand nombre d'informations additionnelles sur la structure interne du matériau et ses propriétés hydriques.

Le dernier objectif de ce travail a été d'interpréter les résultats obtenus dans le cadre d'un modèle spécifique aux sols gonflants qui prenne notamment en compte l'influence des fortes variations de volume sur le comportement mécanique. Le choix s'est porté sur le modèle de Barcelone qui est un modèle de référence pour les sols non saturés (Alonso *et al.*, 1990 ; Alonso *et al.*, 1999).

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre donne un aperçu des connaissances actuelles portant sur les sols gonflants. Après une partie dédiée à la définition de la notion de succion et à la présentation des principales techniques expérimentales utilisées en mécanique des sols non saturés, un résumé des propriétés fondamentales des sols non saturés non gonflants est proposé. Ce chapitre consiste ensuite en une revue des principaux résultats existants sur les sols gonflants pour se terminer par la présentation du modèle de Barcelone pour sols non saturés non gonflants et gonflants.

Le second chapitre est consacré à la présentation des différentes techniques expérimentales qui ont été utilisées pour la réalisation des essais qui seront introduits dans les chapitres suivants. Le premier point traite de la méthode osmotique et des œdomètres qui l'utilisent. Le reste de ce chapitre est réservé à la méthode des solutions salines. Une grande attention a été portée à la validité de cette méthode, ce qui a permis d'en définir un domaine d'utilisation optimal. Puis, les autres procédures expérimentales sont brièvement décrites, notamment celle de préparation des éprouvettes destinées à l'étude structurale du matériau.

Le troisième chapitre est l'occasion de présenter le mélange de limon et de bentonite compacté support de notre étude. Il contient aussi les essais qui ont permis de valider séparément puis entre eux les dispositifs œdométriques à succion contrôlée développés ou seulement employés lors de cette thèse. Le reste du chapitre est consacré à la caractérisation des propriétés hydriques, de gonflement et microstructurales du matériau. C'est une étape indispensable pour l'interprétation des résultats d'essais mécaniques et la compréhension des phénomènes en jeu.

Le dernier chapitre contient l'ensemble des résultats d'essais mécaniques à succion contrôlée. Il est divisé en trois parties. La première s'attache à évaluer l'influence d'une modification de succion sur le comportement mécanique d'un matériau gonflant. L'interprétation de ces résultats fait appel à un certain nombre d'essais réalisés sur le matériau non compacté ainsi que sur des essais effectués sur chacun des constituants du mélange. Le deuxième point du chapitre est consacré à l'évaluation de l'influence d'une sollicitation hydrique complexe sur le comportement mécanique d'un matériau gonflant. Le dernier point de ce chapitre propose une interprétation de l'ensemble de ces résultats dans le cadre du modèle de Barcelone en comparant les deux versions existantes de ce modèle.

Chapitre I :

Comportement hydromécanique des sols gonflants : synthèse bibliographique

INTRODUCTION

Le terme argile est assez imprécis et il en existe plusieurs définitions. Celle que nous retiendrons par la suite est celle des minéralogistes qui définissent les argiles comme des minéraux phylliteux ou fibreux dont la taille n'excède pas quelques µm. Parmi toutes les familles d'argiles existantes, celle des argiles gonflantes présente un grand intérêt en raison notamment de son utilisation en géotechnique de l'environnement. Ces argiles subissent des variations de volume lors de la modification de leur teneur en eau, *i.e.* de leur succion, et il est important, compte tenu des applications sensibles auxquelles elles sont destinées, de caractériser l'influence de ces variations de volume sur leur comportement hydromécanique. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est d'élaborer une synthèse bibliographique des résultats existant sur le comportement hydromécanique des sols gonflants.

Dans la première partie de ce chapitre, le phénomène de succion sera défini. Ensuite, une synthèse des principaux résultats expérimentaux existant sur le comportement hydromécanique des sols non saturés non gonflants sera présentée, étape indispensable pour l'interprétation des données se rapportant aux sols gonflants. La troisième partie sera consacrée à l'étude des spécificités du comportement hydromécanique des sols gonflants. Nous insisterons sur les particularités liées à la structure de ces sols, aux conséquences de sollicitations hydriques complexes, et à l'influence du chemin de contrainte. Pour terminer ce chapitre, les évolutions du modèle de Barcelone pour la modélisation du comportement des sols non saturés seront exposées.

LA SUCCION

La mécanique des sols s'est pendant très longtemps intéressée uniquement au cas des sols saturés. L'utilisation de la succion pour expliquer le comportement mécanique des sols non saturés a été introduite pour la première fois par le "*Road Research Laboratory*" au Royaume Uni (Croney & Coleman, 1948 cités par Fredlund & Rahardjo, 1993).

Cette partie présente tout d'abord une définition des différents états de saturation d'un sol, pour aborder ensuite la définition de la succion. Dans un dernier point sont exposées les différentes techniques expérimentales d'imposition et de mesure de la succion.

Différents états de saturation d'un sol

Dans le cas général, qu'ils soient naturels ou artificiels, les sols sont non saturés : ils contiennent à la fois une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. D'après Wroth & Houlsby (1985), il est possible de distinguer trois catégories de sols non saturés :

- la phase liquide est continue, la phase gazeuse discontinue ;
- les phases liquide et gazeuse sont continues ;
- la phase liquide est discontinue, la phase gazeuse continue.

Aitchison (1959) définit quatre états de saturation :

- l'état saturé où le sol est saturé en eau et la succion est nulle ;
- l'état partiellement saturé où le degré de saturation est voisin de 100 % mais où la succion n'est plus nulle ;
- l'état non saturé où le degré de saturation est très inférieur à 100 % et la succion non nulle ;
- le sol sec où le degré de saturation en eau est nul et la succion très forte.

Définition

Le terme de succion indique un déficit de pression de l'eau du sol par rapport à la pression atmosphérique. La succion peut varier dans une gamme très large, entre 0 et plusieurs centaines de MPa. Il faut noter que certains auteurs expriment le potentiel de succion en centimètres de colonne d'eau, le potentiel de succion variant alors entre 0 et 10^7 cm d'eau. Pour éviter la manipulation de chiffres aussi importants, le pF, *potentiel of free energy*, a été introduit. Le pF correspond au logarithme décimal du potentiel de succion exprimé en centimètres de colonne d'eau.

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965 cité par Fredlund & Rahardjo, 1993). La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau des composants du sol. Elle est la somme d'une composante capillaire et d'une composante associée aux forces d'adsorption développées par les particules d'un sol. La succion osmotique du sol est liée aux sels présents dans le sol.

Succion capillaire

Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s. En effet, une molécule à l'intérieur du liquide n'est pas soumise aux mêmes forces d'interaction intermoléculaires qu'une molécule se situant à l'interface liquide-gaz. Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire (fig. I.1).

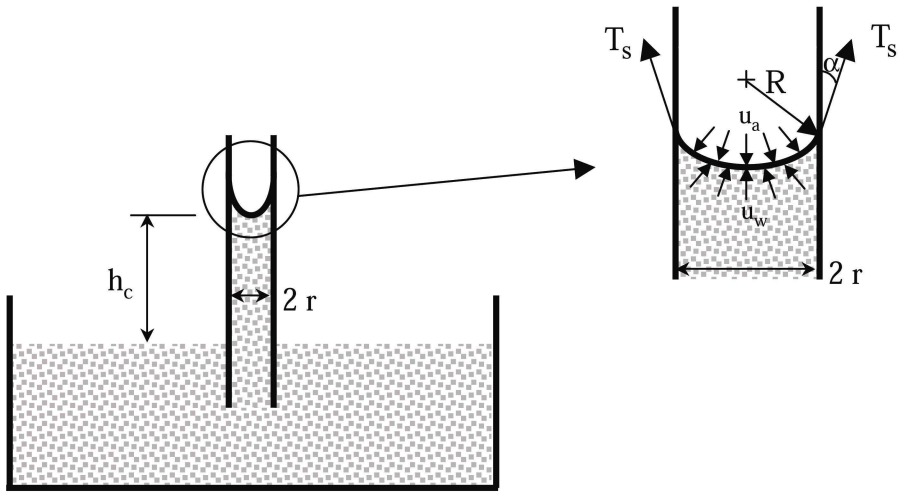

Figure I.1. Phénomène d'ascension capillaire.

Capillary rise.

La relation de Jurin-Laplace relie la pression capillaire au rayon du tube capillaire (équation I.1). Elle montre que plus le tube est petit, plus la pression capillaire est élevée.

$$P_c = u_a - u_w = \frac{2\,T_s\,\cos\alpha}{r} \qquad \text{I.1}$$

avec

P_c : pression capillaire (kPa) ;
α : angle de mouillage ;
u_a : pression de l'air au-dessus de l'interface (kPa) ;
u_w : pression de l'eau en dessous de l'interface (kPa) ;
T_s : tension de surface ($N.m^{-1}$) ;
r : rayon du tube capillaire (m).
La hauteur d'ascension capillaire est donnée par la relation I.2.

$$h_c = \frac{2\,T_s\,\cos\alpha}{r\,\gamma_w} \qquad \text{I.2}$$

avec

h_c : hauteur d'ascension capillaire (m) ;
γ_w : poids volumique de l'eau ($kN.m^{-3}$).

Succion d'adsorption

Les argiles sont des particules globalement chargées négativement, et qui, de ce fait, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface (cf. 0). Les forces en jeu sont de type hydrogène, liées à l'hydratation des cations du sol, ou de type Van der Walls. Ce phénomène est à l'origine de la succion d'adsorption.

Succion osmotique

La composante osmotique de la succion est due à la présence d'ions en solution. La tendance des ions à s'hydrater et l'existence de différences de concentration entre plusieurs points du sol sont à l'origine de cette composante. Dans le cas où la concentration en sels de la solution de sol est faible, elle peut être négligée. La succion osmotique dépend aussi de l'état de saturation du sol : plus le degré de saturation augmente, plus la succion osmotique décroît (Edil & Motan, 1984 ; Houston *et al.*, 1994).

Succion totale

La succion totale est reliée à l'humidité relative par la loi de Kelvin :

$$\Psi = -\gamma_w \frac{R\,T}{M\,g} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \qquad \text{I.3}$$

avec :

Ψ : succion totale (kPa) ;
R : constante des gaz parfaits (8,31432 $J.mol^{-1}.K^{-1}$) ;
T : température absolue (K) ;
M : masse molaire de l'eau (18,016 $g.mol^{-1}$) ;
g : accélération de la pesanteur (9,81 $m.s^{-2}$) ;
p : pression partielle de vapeur (kPa) ;
p_0 : pression de vapeur saturante à la température T (kPa).

Techniques expérimentales d'imposition ou de mesure de la succion

La recherche dans le domaine des sols non saturés exige de pouvoir mesurer, ou à défaut, imposer, la succion au cours d'un essai. L'objet de cette partie est de présenter les différentes techniques d'imposition et de mesure de la succion d'un sol.

La distinction doit être faite entre les méthodes qui permettent d'imposer ou de mesurer la succion totale et celles qui ne mesurent ou n'imposent que la succion matricielle. Lorsque le sol est en contact direct avec le dispositif de mesure ou d'imposition de la succion, on considère que seule la succion matricielle est imposée ou mesurée.

Méthodes d'imposition de la succion

Méthode par translation d'axe

Les dispositifs à partir desquels il est possible de faire varier soit la pression de l'air, soit la pression de l'eau d'un sol, permettent l'imposition de la succion (loi de Jurin-Laplace). L'utilisation de ce principe a donné naissance à deux types d'appareil représentés sur la figure I.2.

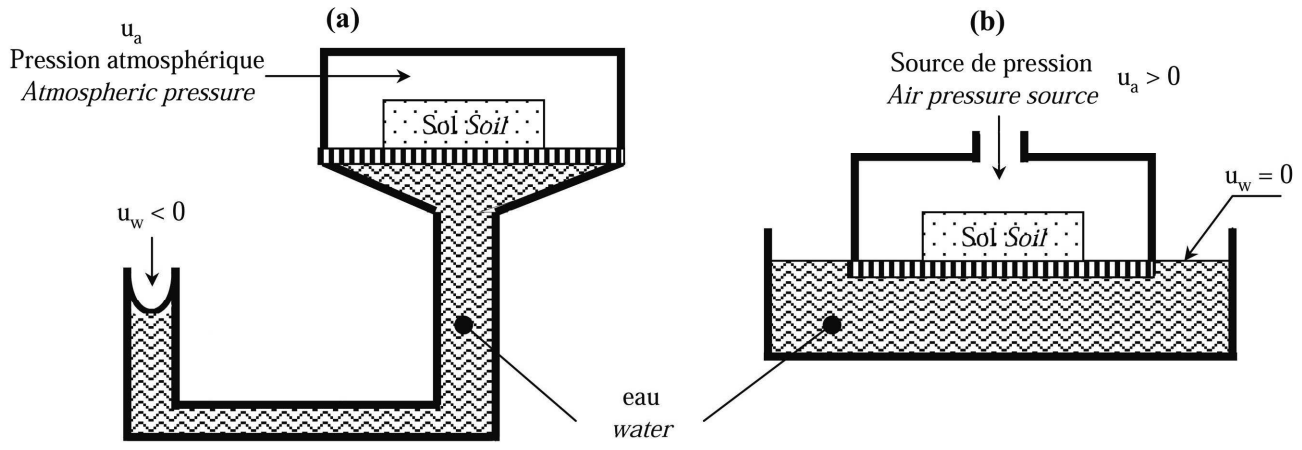

Figure I.2. a : Plaques tensiométriques ; b : Appareil de Richards.

a: Pressure plate ; b: Richard's device.

Dans le cas des plaques tensiométriques, la pression de l'eau est diminuée et la pression de l'air maintenue à la pression atmosphérique. L'eau est mise en tension par simple différence de niveau, comme indiqué sur la figure I.2a.

Le principe de l'appareil de Richards (Richards, 1935) est d'augmenter la pression de l'air en gardant la pression de l'eau du sol à la pression atmosphérique (fig. I.2b). L'éprouvette de sol est placée dans une enceinte qui permet d'imposer une pression d'air tout en maintenant la pression de l'eau de l'éprouvette à la pression atmosphérique.

Il est à noter que n'importe quel appareil permettant de contrôler à la fois la pression de l'air et la pression de l'eau autorise l'imposition de la succion. Les plaques tensiométriques et l'appareil de Richards ne constituent que deux cas limites d'un tel appareil.

Ces méthodes ne permettent d'imposer que la composante matricielle de la succion. Dans la plupart des cas, la succion maximale imposable avec ces appareils est de 1,5 MPa. Cependant, en utilisant une membrane semi-perméable et de l'azote sous pression à la place de l'air, Villar (1995) a porté la limite de cette technique à 14 MPa.

Méthode osmotique

Cette méthode, utilisée pour la première fois par Zur (1966), est une application directe du principe de l'osmose. De l'eau pure et une solution de macromolécules sont mises en contact *via* une membrane semi-perméable qui empêche l'échange des macromolécules entre les deux réservoirs (fig. I.3). La tendance naturelle est d'assurer l'équilibre des concentrations de part et d'autre de la membrane. Il y a donc un transfert d'eau de A vers B qui induit une élévation du niveau d'eau dans le bac B (création d'une pression hydrostatique). Cette élévation h vient compenser la pression de diffusion des molécules d'eau. La succion est donnée par :

$$u_a - u_w = \rho_w \, g \, h \qquad \text{I.4}$$

avec :

ρ_w : masse volumique de l'eau ($g.cm^{-3}$).

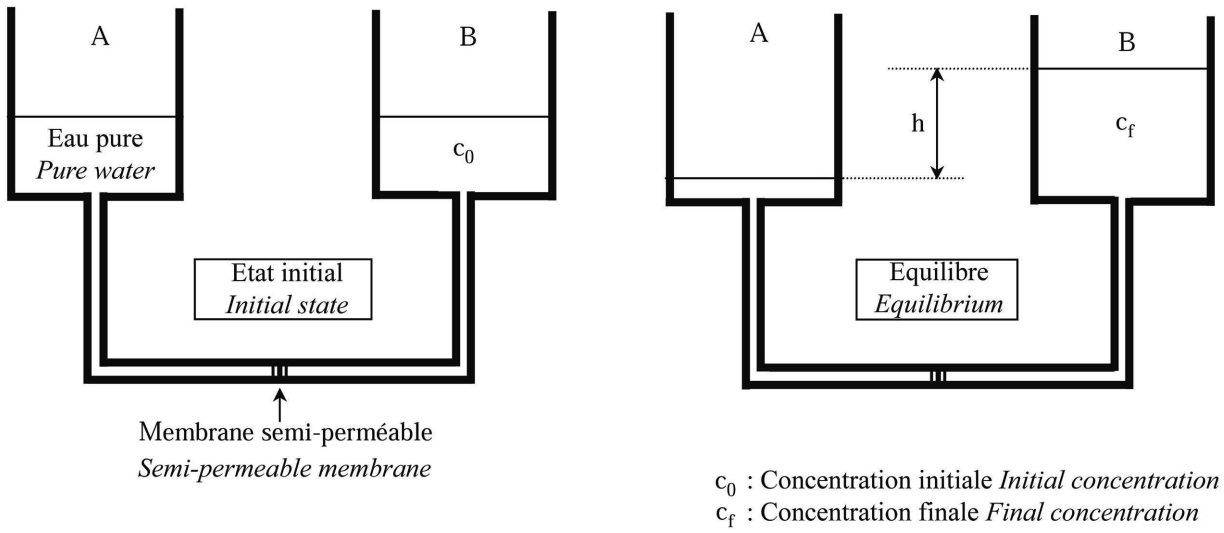

Figure I.3. Principe de l'imposition de succion par la méthode osmotique.

Osmotic method principle for suction imposition.

La macromolécule classiquement utilisée est le polyéthylène glycol (PEG). Le poids moléculaire du PEG est le plus fréquemment de 6 000 ou de 20 000 Da (1 Dalton (Da) = $1{,}6605.10^{-24}$ g), mais il est possible de trouver dans la bibliographie quelques résultats d'utilisation de PEG 1 500 ou 4 000.

Cette méthode impose la succion matricielle. La succion maximale imposable est d'environ 1,5 MPa avec du PEG 20 000. Delage *et al.* (1998) indiquent avoir atteint une succion maximale de 12,6 MPa avec du PEG 1 500 et de 9 MPa avec du PEG 6 000.

Méthode des solutions salines

Une solution saline a la propriété de maintenir l'humidité relative constante, l'humidité relative dépendant du sel utilisé ainsi que de sa concentration. La loi de Kelvin (équation I.3) permet de relier l'humidité relative à la succion totale. Le principe de la méthode est de disposer, à l'intérieur d'une enceinte close, une éprouvette de sol et une solution saline. Les succions imposées varient de quelques MPa à 1 000 MPa. Il est possible d'utiliser :

- des solutions salines saturées, ce qui nécessite la connaissance de la solubilité du sel et de l'humidité relative imposée par ce sel à saturation ;
- des solutions salines non saturées, pour lesquelles il est nécessaire de disposer de la relation entre concentration et humidité relative pour le sel.

Méthodes de mesure de la succion

Tensiomètre à eau

Ce type d'appareil permet de mesurer la pression négative de l'eau du sol. Un capteur de pression mesure la pression de l'eau contenue dans un réservoir, cette eau étant en contact avec celle du sol par l'intermédiaire d'une plaque céramique. La théorie de ce type d'appareil, initialement décrit par Richards & Gardner (1938), est disponible dans Stannart (1992). L'utilisation des tensiomètres reste limitée en raison de l'apparition de bulles d'air à partir d'une succion de 80 kPa (phénomène de cavitation). En réduisant le volume d'eau dans l'appareil, Ridley & Burland (1993) puis Guan & Fredlund (1997) ont réussi à développer un tensiomètre utilisable jusqu'à une succion de 1,25 MPa.

Tensiomètre osmotique

Cet appareil regroupe le principe du tensiomètre à eau et celui de la méthode osmotique. Le réservoir du tensiomètre osmotique est rempli d'une solution osmotique, et la plaque céramique est remplacée par une membrane semi-perméable. Le principe de ce type de tensiomètre a été décrit par Peck & Rabbidge (1966) cités par Ridley & Wray (1995). Des modifications ont été apportées par Bocking & Fredlund (1979), ces derniers indiquant une succion matricielle mesurable maximale de 1,5 MPa.

Méthode du papier filtre

Cette méthode de mesure de la succion repose sur le fait qu'à l'équilibre hydrique, le potentiel de l'eau du sol et le potentiel de l'eau d'un papier filtre en contact avec le sol sont identiques. Elle a été introduite par Gardner (1937). La gamme de succion accessible par cette technique est comprise entre quelques kPa et plusieurs centaines de MPa.

Psychromètre

Un psychromètre est un dispositif qui permet de mesurer l'humidité relative d'un sol, et par conséquent, sa succion totale (équation I.3). Le principe de l'appareil est de mesurer la température d'une goutte d'eau qui s'évapore, cette température étant inférieure à la température ambiante. La différence entre les deux températures est une fonction de l'humidité relative. Il existe deux types de capteurs utilisant chacun un principe physique différent pour mesurer la température d'évaporation de la goutte d'eau. Il y a les psychromètres à transistors décrits par Richards (1958) cité par Yalçin (1992), et les psychromètres à thermocouple utilisant l'effet Peltier introduits par Spanner (1951). Cette méthode de mesure est utilisable pour des succions comprises entre 0,1 et 80 MPa.

Œdomètres utilisant des dispositifs de mesure ou d'imposition de la succion

Les œdomètres sont un des principaux dispositifs utilisés en mécanique des sols. Ce type d'appareils permet d'identifier les paramètres de compressibilité d'un sol. Pour cette raison, un grand nombre d'appareils œdométriques ont été adaptés par différents auteurs de manière à pouvoir mesurer ou imposer la succion au cours d'un essai.

Œdomètres avec système d'imposition de la succion

Œdomètre à surpression d'air

La cellule œdométrique à surpression d'air est similaire dans son principe à l'appareil de Richards : c'est une enceinte close dans laquelle une pression d'air peut être appliquée, la pression de l'eau de l'éprouvette étant maintenue à la pression atmosphérique (fig. I.4). Le premier appareil basé sur cette technique utilisait une membrane semi-perméable comme support (Escario & Saez, 1973). De nombreux autres auteurs (Habib & Karube, 1993 ; Geiser, 1999 ; Romero, 1999 ; Alshihabi *et al.*, 2002 ; etc.) utilisent une pierre céramique avec un point d'entrée d'air élevé comme support. En utilisant à la place de l'air de l'azote sous pression et une membrane semi-perméable, Villar (1995) a réussi à imposer une succion maximale de 14 MPa.

Le principe des plaques tensiométriques avec imposition d'une pression d'eau négative a été appliqué dans un appareil œdométrique par Chu & Mou (1973).

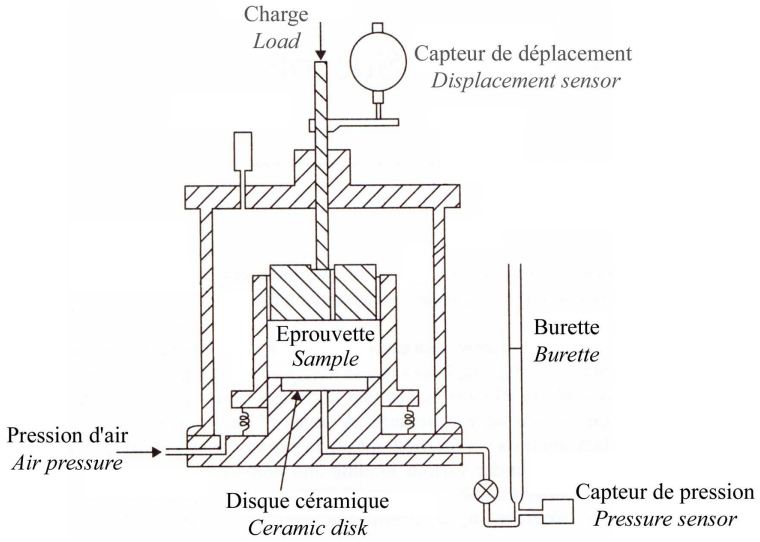

Figure I.4. Œdomètre à succion contrôlée par surpression d'air (Habib & Karube, 1993).

Suction controlled oedometer using the axis translation method (Habib & Karube, 1993).

Œdomètre osmotique

La méthode osmotique a pour la première fois été mise en œuvre dans un œdomètre par Kassif & Ben Shalom (1971) (fig. I.5). Dans leur dispositif, le piston et l'embase de la cellule sont modifiés de manière à permettre la circulation de la solution osmotique. Les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette sont recouvertes d'une membrane semi-perméable. Ce type d'appareillage a été repris et modifié par de nombreux auteurs (Delage *et al.*, 1992 ; Dineen & Burland, 1995 ; Guiras-Skandaji, 1996 ; etc.). Suivant les dispositifs, la circulation de la solution osmotique se fait au niveau des deux faces de l'éprouvette ou uniquement au niveau de la face inférieure.

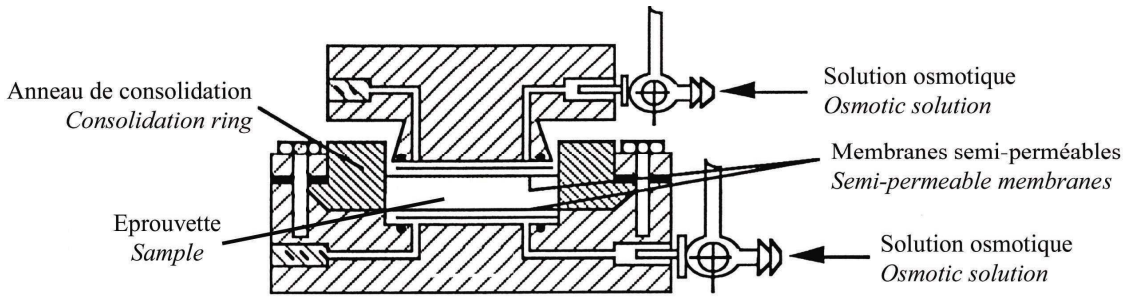

Figure I.5. Œdomètre osmotique (Kassif & Ben Shalom, 1971).

Osmotic oedometer (Kassif & Ben Shalom, 1971)

Œdomètre à solutions salines

Ce type d'œdomètre reprend le principe du dessiccateur. Le premier appareil de ce type a été présenté par Esteban (1987) cité par Villar & Martín (1996). Il est possible de ranger les appareils utilisant les solutions salines en deux catégories.

La première est celle qui se rapproche le plus du principe du dessiccateur : une cellule œdométrique est placée dans une enceinte close dont l'humidité relative est maintenue constante. La solution saline est disposée dans un réservoir à l'intérieur de l'enceinte (Oteo Mazo *et al.*, 1995 ; Villar & Martín, 1996 ; Bélanteur *et al.*, 1997 ; Al-Mukhtar *et al.*, 1999) (fig. I.6).

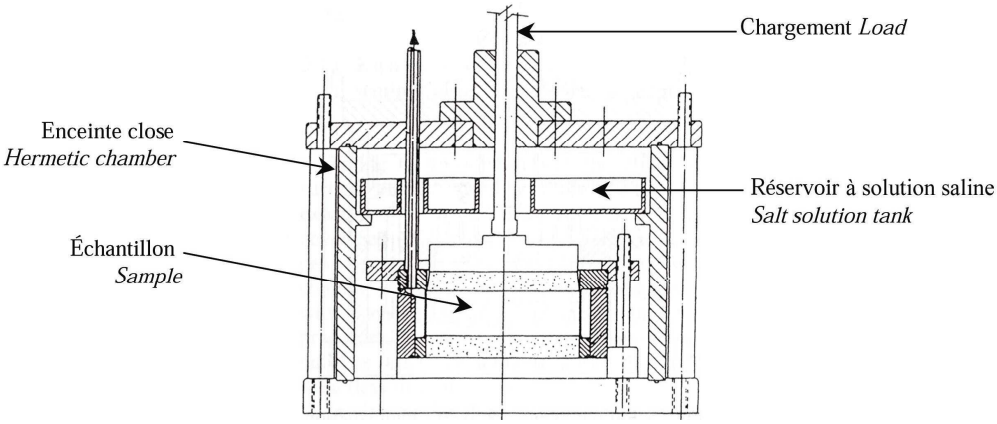

Figure I.6. Œdomètre à solutions salines (Oteo Mazo *et al.*, 1995).

Salt solutions oedometer (Oteo Mazo* et al.*, 1995).

La deuxième catégorie est celle où une circulation d'air est assurée en permanence au niveau de l'éprouvette (Bernier *et al.*, 1997 ; Robinet *et al.*,1997 ; Alonso *et al.*, 2001 ; Dueck *et al.*, 2001). Dans ce cas, l'air mis en circulation est préalablement porté à une humidité relative déterminée dans un échangeur qui contient la solution saline. Un exemple d'appareil utilisant ce principe est donné sur la figure I.7.

Il est à noter que la majorité des auteurs utilisent des solutions salines saturées avec des sels de nature variable, les autres utilisant des solutions salines non saturées.

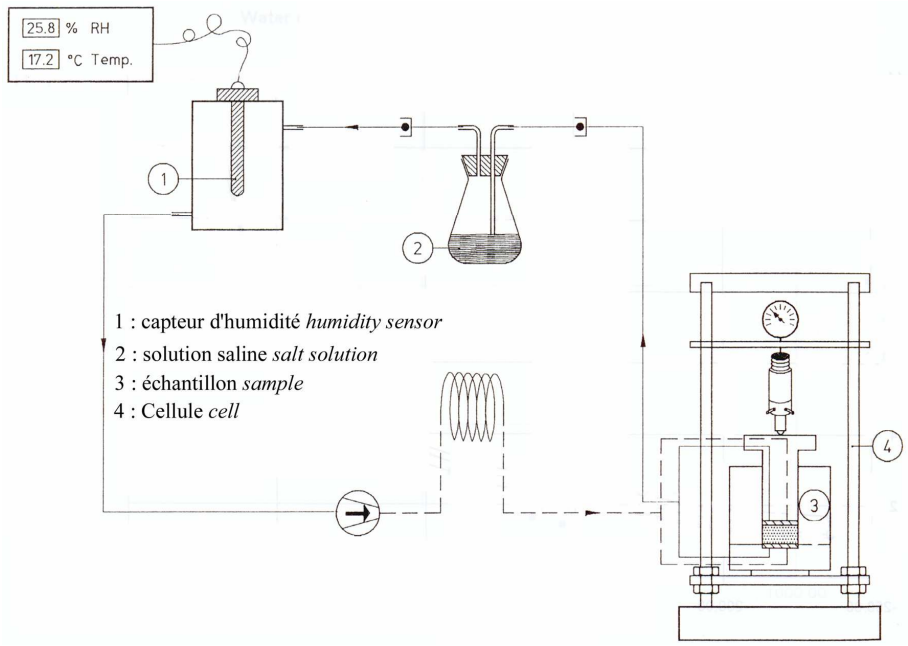

Figure I.7. Appareil œdométrique à solutions salines (Bernier *et al.*, 1997).

Salt solutions oedometer (Bernier* et al.*, 1997).

Œdomètres avec système de mesure de succion

Certains auteurs ont équipé des œdomètres avec un capteur permettant de mesurer la succion à l'intérieur de l'éprouvette. Ainsi l'œdomètre osmotique présenté par Dineen & Burland (1995) inclut-il un tensiomètre osmotique directement introduit dans l'éprouvette testée. De même, l'appareil à solutions salines présenté par Robinet *et al.* (1997) comprend un hygromètre positionné à l'intérieur de l'éprouvette.

QUELQUES RAPPELS SUR LE COMPORTEMENT DES SOLS NON SATURÉS NON GONFLANTS

Dans la partie précédente, le phénomène de succion a été défini, et l'inventaire des différentes techniques de mesure et d'imposition de la succion a été fait. Les appareils présentés ont d'abord été utilisés pour l'étude de l'influence de la succion sur le comportement des sols non gonflants. Il existe donc une quantité importante de données qui peut servir de base à l'interprétation du comportement des sols gonflants. Cette partie expose donc une synthèse des principaux résultats existant sur le comportement hydromécanique des sols non gonflants.

Courbe de rétention hydrique

Une augmentation de la succion d'un sol, c'est-à-dire une dessiccation, provoque une diminution de sa teneur en eau, l'eau ne pouvant plus être retenue par les forces matricielle et osmotique. La

réduction de succion provoque une humidification du sol. La relation entre la teneur en eau du sol et la succion correspondante est appelée courbe de rétention de l'humidité du sol ou encore courbe caractéristique de l'humidité du sol (Hillel, 1988). Cette courbe peut être obtenue par drainage, séchage d'un sol initialement saturé ou bien par humidification, mouillage d'un sol initialement sec. On parlera de courbe de désorption dans le premier cas et de courbe de sorption dans le second. Cette relation n'est pas unique. L'hystérésis est liée à une variation de l'angle de mouillage en fonction du processus (humidification ou bien dessiccation), à la présence d'air piégé dans le sol, aux éventuels couplages hydromécaniques et à la non-uniformité géométrique des pores (effet bouteille d'encre, effet de goulot).

La comparaison de l'évolution simultanée de la saturation, de la teneur en eau et de la succion au cours de la dessiccation, met en évidence l'existence d'un domaine saturé à succion non nulle, ce qui correspond à l'état partiellement saturé défini par Aitchison (1959). La succion s_E, à partir de laquelle l'air commence à pénétrer dans le sol, est appelée point d'entrée d'air.

Phénomène d'effondrement sous charge

Les sols effondrables ont une structure ouverte métastable (Barden *et al.*, 1973). Ce sont des sols qui se caractérisent par l'existence de liens entre leurs différents constituants. Ces liens peuvent être de nature chimique, cimentations par différents minéraux, ou bien minéralogiques, par la présence d'argiles. Lorsque ces sols sont humidifiés, les liens entre les constituants sont détruits, soit par dissolution, soit par hydratation des argiles, entraînant ainsi une forte réduction de leur indice des vides, ce qui correspond à un effondrement.

Il est nécessaire de distinguer cette notion, applicable à certains sols, de celle d'effondrement qui est commune à tous les sols. Lorsqu'un sol initialement non saturé est humidifié sous une faible charge verticale, une tendance à un léger gonflement est observée. En revanche, si la charge appliquée est suffisamment importante, une réduction de l'indice des vides se produit lors de la mise en eau : c'est le phénomène d'effondrement.

Compressibilité

La compressibilité d'un sol peut être évaluée à l'aide de trois paramètres : la pente de compression vierge $\lambda(s)$, la pente de rebond élastique κ et la pression de préconsolidation $p_0(s)$. Pour les sols non saturés, les pentes $\lambda(s)$ et κ se calculent en utilisant le plan $(e - p^*)$ pour représenter les données, où p^* est la pression moyenne nette, notion qui sera mieux définie par la suite (cf. I.5).

La plupart des résultats disponibles dans la littérature s'accordent sur le fait que la pente de déchargement, κ, est indépendante de la succion (Alonso *et al.*, 1990). Certains auteurs notent cependant une augmentation de κ avec la succion (Vicol, 1990 ; Cui *et al.*, 1996 ; Rampino *et al.*, 2000), ou une diminution (Futai *et al.*, 2002). Néanmoins, le comportement élastique des sols non saturés n'a fait l'objet que de rares études spécifiques qui permettraient d'augmenter la connaissance du comportement dans ce domaine (Wheeler, 1997 ; Di Mariano *et al.*, 2002).

La figure I.8a permet de voir que la pression $p_0(s)$ et la pente $\lambda(s)$ sont influencées par la succion sous laquelle est effectué le chargement mécanique. La pression $p_0(s)$ augmente avec la succion, ce point ayant été mis en évidence par de nombreux auteurs (Alonso *et al.*, 1987 et 1990). Dans le cas des sols non saturés la notion de pression de préconsolidation doit être précisée. En effet, la pression de préconsolidation correspond, par définition, à la plus grande pression que le matériau a connue au cours de son histoire. Cette définition ne s'applique plus ici et, afin de lever la confusion entre pression maximale réellement connue par le sol et l'influence de la succion sur ce paramètre, le terme de pression de préconsolidation apparente sera conservé dans la suite du mémoire.

La figure I.8a donne le cas général de la variation de la pente de compression vierge $\lambda(s)$ en fonction de la succion. L'augmentation de la succion se traduit par une réduction de la pente $\lambda(s)$, phénomène qui a été observé par une majorité d'auteurs (Alonso *et al.*, 1987 ; Vicol, 1990 ; Cui, 1993 ; Chen *et al.*, 1999 ; Rampino *et al.,* 2000 ; …).

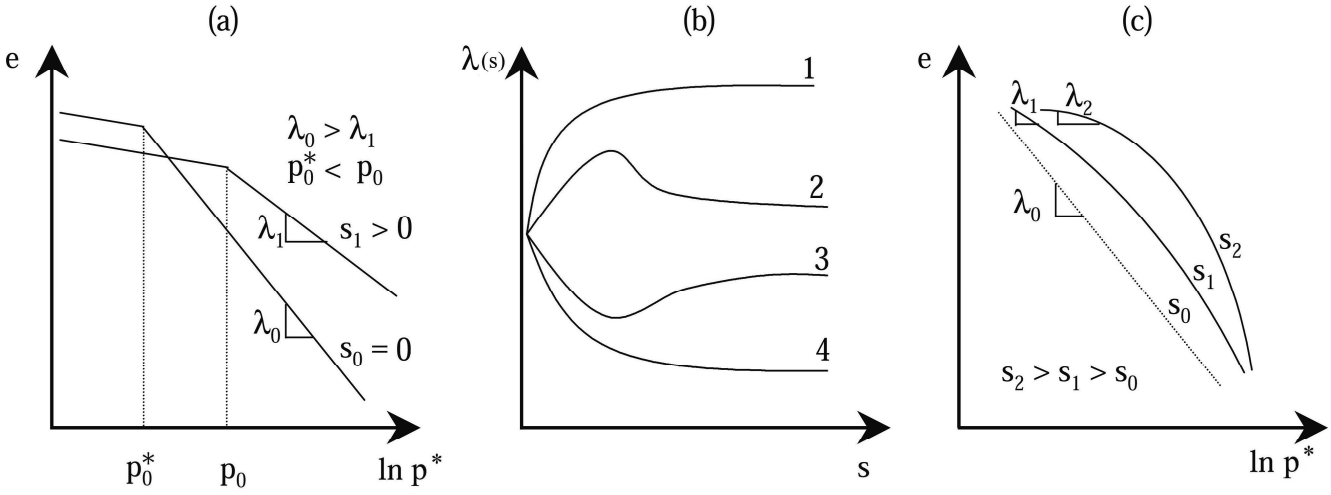

Figure I.8. Compressibilité ; (a) : en fonction de la succion (Alonso *et al.*, 1990) ; (b) : relations λ(s) (Kogho *et al.*, 2001) ; (c) : influence de la pression moyenne (Geiser, 1999).

Compressibility; (a) as a function of suction (Alonso* et al.*, 1990); (b) λ(s) relations (Kogho* et al.*, 2001); (c) net mean stress influence (Geiser, 1999).

Cependant, à partir de résultats obtenus sur différents matériaux, Kogho *et al.* (2001) supposent que la pente $\lambda(s)$ peut varier de quatre manières différentes avec la succion (fig. I.8b) suivant le type de matériau, la cas général évoqué précédemment correspondant au cas n°4 de la figure I.8b.

À partir d'un limon compacté, Geiser (1999) a obtenu une relation $\lambda(s)$-succion similaire au cas n°2 (fig. I.8b). Geiser (1999) associe la succion pour laquelle la compressibilité est maximale au point d'entrée d'air (s_E) du matériau. Cet auteur met aussi en évidence l'influence du plan de représentation utilisé pour déterminer ces paramètres (contraintes effectives ou bien contraintes nettes).

Wheeler & Sivakumar (1995), Sivakumar & Wheeler (2000) et Wheeler & Sivakumar (2000) en travaillant sur du kaolin compacté ont montré qu'avec une faible énergie de compactage, la relation $\lambda(s)$-succion était similaire au cas n°2 alors qu'avec une forte énergie de compactage cette relation devenait similaire au cas n°4. D'après les auteurs, ces résultats traduisent le passage d'une structure interne des éprouvettes ouverte avec une faible énergie à une structure plus homogène lorsque l'énergie est augmentée. Ce rôle de la structure semble être confirmé par les résultats de Futai *et al.* (2002) qui, en travaillant sur un silt argileux, trouvent une variation de $\lambda(s)$ qui correspond au cas n°1 de la figure I.8b.

La figure I.8a suggère que la relation entre la contrainte et l'indice des vides est linéaire, la valeur de $\lambda(s)$ ne dépendant que de la succion. Certains auteurs cités par Geiser (1999) (Josa *et al.*, 1992 ; Taibi, 1994) proposent, au contraire, une évolution de ce paramètre correspondant à ce qui est représenté sur la figure I.8c.

Compressibilité hydrique

Une augmentation de succion peut provoquer une déformation volumique irréversible pour un sol sous une charge donnée. Une représentation de ce phénomène est donnée sur la figure I.9 qui fait apparaître une pente de compression vierge hydrique λ_s ainsi qu'un seuil élastique en succion s_0. La pente de la partie élastique de la courbe est κ_s.

Cependant, Biarez *et al.* (1987) et Soemitro (1994) ont montré que la pente $\lambda(s)$ était égale à la compressibilité hydrique λs dans le domaine des succions inférieures à s_E dans le cas d'une argile et d'une montmorillonite. À partir d'essais réalisés sur différents matériaux, Taibi (1994) propose que la pente $\lambda(s)$ soit constante si la succion est inférieure à s_E puis diminue lorsque le sol est dessaturé.

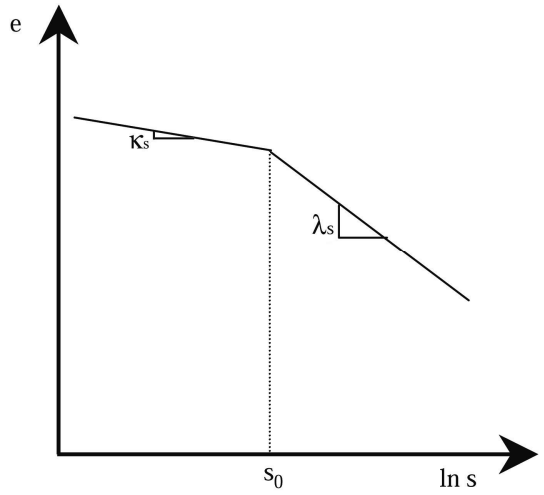

Figure I.9. Compressibilité hydrique (Alonso *et al.*, 1990).

Hydrous compressibility (Alonso* et al.*, 1990).

COMPORTEMENT DES SOLS GONFLANTS : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les sols gonflants se distinguent des sols non gonflants par un certain nombre de points. La succion d'un sol gonflant peut ainsi atteindre plusieurs centaines de MPa, or les résultats présentés au cours du point précédent ont été obtenus pour la plupart dans une gamme limitée de succion (au maximum quelques MPa). De plus, la réduction de succion entraîne un fort gonflement irréversible du sol associé à des modifications importantes de sa structure interne.

Dans ce contexte, cette partie propose une synthèse de résultats bibliographiques existant sur le comportement des sols gonflants. Seront d'abord présentés les techniques de caractérisation du gonflement et les facteurs affectant le gonflement. Seront ensuite abordées la structure des sols gonflants ainsi que l'influence d'une sollicitation hydrique ou mécanique sur la structure. Dans un dernier point, le rôle de la succion sur le comportement mécanique de ces matériaux sera présenté.

Les argiles : minéralogie et propriétés

Les argiles sont des phyllosilicates hydratés formés par l'association de feuillets élémentaires qui s'accolent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs (Push *et al.*, 1999), ou cristallites par d'autres (Tessier & Grimaldi, 1993). L'espace entre deux feuillets est appelé espace interfoliaire. Ces cristallites se rassemblent par des dispositions face-face pour former une particule argileuse. Dans le cas des smectites calciques, les empilements de cristallites laissent des espaces libres au sein des particules, espaces qui jouent un rôle très important au cours de la dessiccation et de l'humidification. Le nombre de feuillets par particule est variable suivant le type

d'argile considéré et, dans le cas des smectites, variable en fonction de l'état hydrique (Ben Rhaiem *et al.*, 1986).

Unités minéralogiques de base

Le tétraèdre, de formule générale SiO_4, est composé de 4 atomes d'oxygène enserrant un atome de silicium. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques (fig. I.10). L'octaèdre, de formule générale $Al_2(OH)_6$, est formé de 6 groupements hydroxyles (OH^-) enserrant un atome d'aluminium. Il est possible que des substitutions isomorphes aient lieu au sein des octaèdres, l'aluminium pouvant être remplacé par du magnésium ou du fer. Ces octaèdres se combinent de façon à former des couches octaédriques (fig. I.11).

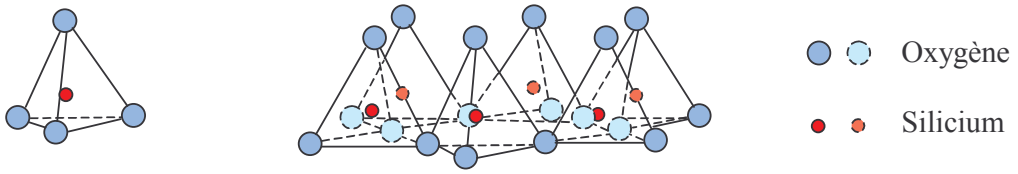

Figure I.10. Représentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique.

Tetrahedral and tetrahedral layer scheme.

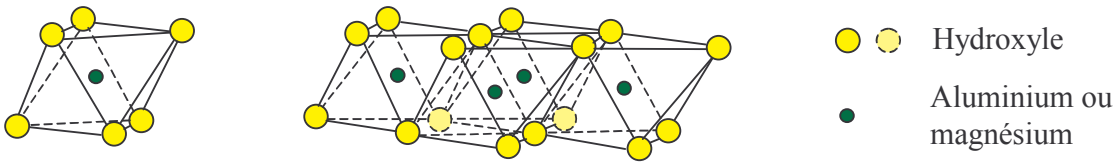

Figure I.11 Représentation schématique d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.

Octahedral and octahedral layer scheme.

Différents types d'argile

Trois grands types d'argiles peuvent être identifiés. Il y a tout d'abord le groupe de la kaolinite dont le feuillet élémentaire comporte une couche tétraédrique et une couche octaédrique. Les liaisons entre les feuillets sont de type hydrogène et peuvent être qualifiées de liaisons fortes. Les argiles de cette famille sont dites argiles T-O. Le deuxième grand groupe d'argile est celui des illites pour lequel les feuillets sont composés de trois couches : deux tétraédriques et une octaédrique. Les liaisons entre les feuillets se font par des ions potassium énergiquement fixés. Ces argiles sont appelées argiles T-O-T. Le troisième groupe est celui des smectites. Ces minéraux sont également formés de feuillets à trois couches et sont donc aussi des argiles T-O-T (fig. I.12). Il n'existe pas de liaison hydrogène entre les feuillets élémentaires ni de cation interfoliaire capable de maintenir fortement les feuillets entre eux.

De plus, les substitutions d'aluminium par du fer ou du magnésium au sein des octaèdres et tétraèdres sont assez fréquentes. La montmorillonite est une argile de la famille des smectites comme la bentonite qui est aussi une roche issue de l'altération de cendres volcaniques (Foucault & Raoult, 1995).

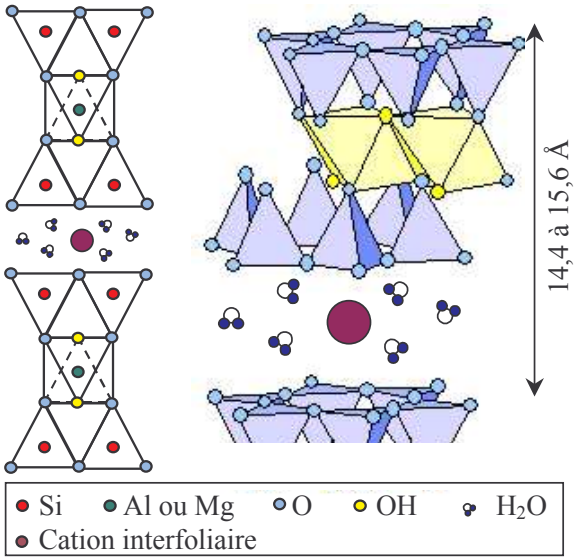

Figure I.12. Structure des argiles du groupe des smectites.

Smectite group structure.

Propriétés électrochimiques et liaisons interfoliaires

Le tableau I.I donne une idée de la charge électrique des principaux types d'argile. Ces charges ont plusieurs origines. Il est d'abord possible d'avoir des substitutions isomorphes d'un cation d'une valence élevée par un cation de valence moins élevée au sein des tétraèdres et octaèdres. Le feuillet initialement neutre se retrouve alors globalement chargé négativement. Les substitutions sont peu fréquentes dans les argiles type kaolinite, mais très répandues dans les argiles type smectite, ce qui permet d'expliquer en grande partie les différences observées dans le tableau I.I. Il existe aussi des charges au niveau des particules argileuses, dues à la neutralisation incomplète de charges aux extrémités des couches, ainsi que des charges de bordure qui apparaissent lorsqu'un cristal se rompt, les valences situées dans le plan de rupture n'étant alors plus saturées (Hillel, 1988).

Tableau I.I. Charge des minéraux argileux (Yong et Warkentin, 1975).

Electric charge of argillaceous minerals (Yong et Warkentin, 1975).

Famille d'argile	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Charge (meq/100 g)	5 - 15	20 - 40	80 - 100

La tendance naturelle est d'assurer l'électroneutralité de la particule argileuse, et pour cette raison, les feuillets vont avoir tendance à adsorber à leur surface les cations présents dans le milieu environnant. Ces cations, il s'agit le plus souvent d'ions K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, sont qualifiés d'échangeables car leur nature peut évoluer en fonction des conditions du milieu. Ils jouent un grand rôle sur les propriétés des argiles. Ainsi, dans le cas des illites, les feuillets sont liés entre eux par des ions potassium énergiquement fixés, ce qui induit une force de cohésion importante entre les feuillets. En revanche, dans le cas des smectites, la nature des cations est très variable et ils sont faiblement fixés : ils n'assurent donc qu'une très faible force de cohésion. L'influence de ces forces se traduit par la taille respective des particules argileuses. Ainsi, les fortes forces de cohésion permettent l'existence de particules d'illite d'une taille supérieure à celles de smectite, ce qui est visible dans le tableau I.II.

Tableau I.II. Surface spécifique des principaux minéraux argileux (Yong et Warkentin, 1975).

Specific surface of the main argillaceous minerals (Yong et Warkentin, 1975).

Famille d'argile	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Surface spécifique ($m^2.g^{-1}$)	15	80	800

Gonflement des particules argileuses

Le gonflement des particules argileuses est une conséquence de leurs propriétés électrochimiques et varie donc énormément d'une famille à l'autre, les argiles les plus gonflantes étant les smectites ; puis viennent les illites et enfin la kaolinite qui gonfle très peu. Deux phénomènes sont généralement avancés pour expliquer le gonflement d'une smectite : le gonflement cristallin au-dessus d'une succion de 10 MPa environ et le gonflement osmotique au-dessous de cette valeur (Yong, 1999).

Le gonflement cristallin est qualifié dans la bibliographie d'hydratation initiale (Laird, 1996). Celle-ci est liée à l'adsorption de molécules d'eau à la surface des particules argileuses en deux à trois couches monomoléculaires. Ce gonflement est essentiellement interparticulaire, c'est-à-dire qu'il prend place au sein des espaces interfoliaires. Le gonflement cristallin n'est possible que lorsque les liaisons interfoliaires sont suffisamment faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. Cela n'est réalisable que dans le cas de la montmorillonite sodique où ces liaisons sont très faibles, et dans une moindre mesure pour la montmorillonite calcique (Tessier, 1984 ; Ben Rhaiem *et al.*, 1986).

Les cations compensateurs ne sont pas maintenus directement à la surface de la particule argileuse mais ils sont présents à une certaine distance moyenne de la surface. Il s'établit un équilibre entre l'agitation thermique des ions, qui tend à les éloigner de la particule, et l'attraction coulombienne, qui tend à les maintenir près du feuillet. L'ensemble particule chargée négativement plus espace interfoliaire globalement chargé positivement constitue la double couche diffusive (DDL) (fig. I.13).

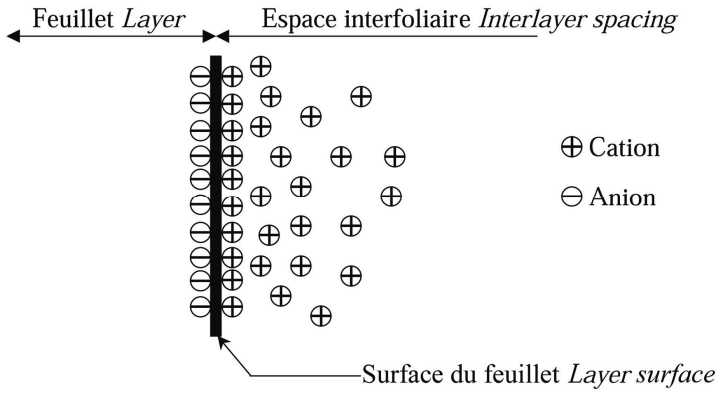

Figure I.13. Représentation schématique de la double couche diffusive.

Schematic of the double diffusive layer.

Le système eau-argile peut être perçu comme un osmomètre (Bolt, 1956). La double couche est en fait un milieu fortement concentré, les cations n'ayant pas la possibilité de s'écarter de la surface de la particule argileuse. Empêchant l'éloignement des cations mais permettant l'arrivée d'eau, la particule argileuse joue le rôle d'une membrane semi-perméable. Ainsi, si le milieu environnant est suffisamment dilué, il se crée une pression osmotique entre le milieu extérieur et l'espace interfoliaire, l'eau pénètre dans l'espace interfoliaire : c'est le gonflement osmotique.

De nombreux auteurs se sont intéressés à la validité et aux limites de cette dernière théorie. Ainsi Yong & Mohamed (1992) montrent un très bon accord entre des mesures expérimentales et la théorie, en se basant sur l'étude de la distance interfoliaire et de la pression de gonflement. Cette théorie a aussi été utilisée avec succès dans le calcul de la compressibilité mécanique des matériaux gonflants (Sridharan & Venkatappa Rao, 1973 ; Sridharan & Jayaveda, 1982).

Certains auteurs limitent ou bien contestent la validité de cette théorie. Ainsi, Sposito (1973) indique que la théorie de la double couche ne prédit pas de manière satisfaisante le gonflement lorsque la solution contient des cations bivalents (alors qu'elle convient très bien aux électrolytes monovalents). Low (1980), à partir d'une série d'expériences menées sur 35 montmorillonites sodiques, montre que la théorie de la double couche est, soit fausse, soit inapplicable pour prédire le gonflement

des montmorillonites, car leurs doubles couches ne sont que faiblement développées. Le gonflement est alors expliqué par l'interaction entre les feuillets argileux et l'eau. La théorie CAT, *Coulombic Attraction Theory*, proposée par Sogami (1983), suppose une interaction attractive entre les cations. Kjellander *et al.* (1988) développent eux une approximation qui reproduit mieux le comportement d'argiles gonflantes à cations bivalents.

La formation de la couche diffuse n'est pas forcément un phénomène se déroulant au seul niveau du feuillet, mais il peut aussi se produire autour des particules formées de plusieurs feuillets (Cases *et al*., 1990). Le gonflement de la montmorillonite sodique peut s'expliquer par ce phénomène (Tessier, 1984 ; Olson & Mesri, 1971). Pour une montmorillonite calcique, en revanche, tous les espaces interfoliaires n'accueillent pas la couche diffuse, même pour des états proches de la saturation, les forces de cohésion existantes entre les feuillets élémentaires étant trop fortes. Le mécanisme d'hydratation est alors à relier à des forces capillaires qui prennent place dans les espaces poreux existant au sein même des particules argileuses. L'hydratation induit un agrandissement de ces pores ainsi qu'une augmentation de leur nombre. Cependant, on reste loin du comportement de la kaolinite, dont les feuillets ne s'ouvrent pas lors de l'humectation, et dont l'hydratation reste confinée à la surface extérieure des particules (Tessier, 1984).

Étude du gonflement des sols

Le premier objectif de cette partie est d'exposer les différentes méthodes expérimentales de mesure des propriétés de gonflement. Seront ensuite évoqués les paramètres influençant le gonflement. Dans un troisième temps, l'évolution du potentiel de gonflement en fonction du temps et de la succion sera présentée.

Détermination des propriétés de gonflement : méthodes

Le gonflement d'un sol est caractérisé par deux paramètres : le potentiel et la pression de gonflement. Le potentiel de gonflement $\Delta h/h$ correspond au rapport entre la variation de hauteur enregistrée lors de l'humidification Δh, et la hauteur initiale h. La pression de gonflement Pg, est la pression que peut exercer un sol lors de son humidification, les variations de volume étant empêchées. Il n'existe cependant pas de méthode standard de détermination de ces paramètres, ce qui complique l'interprétation et la comparaison de résultats obtenus par différents auteurs. Les trois méthodes expérimentales principales (gonflement libre, gonflement sous charge constante et méthode à volume constant) seront décrites dans cette partie en se fondant sur les normes AFNOR NF XP 94-091 (1995) et ASTM D 4546-90 (1990).

Méthode à gonflement libre

Une éprouvette est insérée dans une cellule œdométrique classique, puis soumise à la charge du piston et enfin humidifiée. Ses déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale est le potentiel de gonflement. L'éprouvette est ensuite chargée de manière progressive. La pression verticale nécessaire pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale est la pression de gonflement. Cet essai n'existe pas dans la norme AFNOR.

Méthode sous charge constante

Quatre éprouvettes au moins sont soumises à quatre pressions verticales différentes. Ces quatre éprouvettes sont ensuite humidifiées et le potentiel de gonflement final est déterminé dans chaque cas. La courbe $\Delta h/h$ en fonction de la pression appliquée lors de l'humidification est tracée. Une interpolation linéaire est réalisée entre les quatre points pour estimer la pression pour laquelle le gonflement est nul. Cette pression correspond à la pression de gonflement. Le potentiel de gonflement dans cette méthode est variable, il correspond à la variation de hauteur sous une pression donnée. Deux variantes de cette procédure existent, différant par le mode d'application de la charge verticale. Dans la procédure ASTM (méthode B), la charge est appliquée, puis l'humidification suit 5 mn après. La procédure AFNOR nécessite la stabilisation des déformations avant le début de l'humidification.

Méthode à volume constant

Le principe est d'humidifier une éprouvette tout en maintenant son volume constant. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement. D'un point de vue pratique, deux méthodes expérimentales existent. Cet essai n'existe pas dans la norme AFNOR. Suivant la norme ASTM (méthode C), l'éprouvette est soumise avant humidification à une pression verticale voisine des conditions *in situ*, et ensuite humidifiée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée. La pression de gonflement est alors la pression maximale appliquée. Il existe des cellules spécialement conçues pour effectuer des essais à volume constant. Elles sont équipées d'un capteur de pression permettant de déterminer l'évolution de la pression exercée par le sol au cours de l'humidification.

Autres méthodes

Il existe une multitude de méthodes expérimentales du gonflement. Offer *et al.* (1980) cités par Guiras-Skandaji (1996) notaient l'existence d'au moins 25 méthodes différentes en 1980. La plupart des auteurs se sont basés sur les méthodes déjà citées pour définir leur protocole d'essai (Huder &

Amberg, 1970 ; Aboushook, 1984 ; Sridharan *et al.*, 1986 ; Erol *et al.*, 1987 ; Edil & Alanazy, 1992 ; Abduljawad & Al-Sulaimani, 1993 ; etc.).

Facteurs influençant le gonflement

La quantité d'argile gonflante dans un sol est le premier facteur qui affecte le gonflement. Ainsi, à partir d'un mélange de limon et de bentonite calcique, Tabani (1999) montre que le potentiel de gonflement passe de 6 % à 42 % lorsque le pourcentage massique de bentonite augmente de 10 à 90 %. Dans le même temps, la pression de gonflement croît de 200 à 700 kPa.

La rôle de la teneur en eau et du poids volumique sec sur le gonflement a fait l'objet de nombreuses études (Sridharan *et al.*, 1986 ; Komine & Ogata, 1996 ; Saiyouri, 1996 ; Carof, 2002 ; etc.). L'influence de la teneur en eau est variable et dépend des caractéristiques du sol et des conditions de l'essai. En revanche, la densité sèche initiale est reconnue comme le facteur ayant le plus d'importance sur le potentiel et la pression de gonflement (fig.I.14). En effet, le gonflement résulte de l'adsorption d'eau par toutes les particules argileuses du sol. Lorsque la densité sèche augmente, le nombre de particules gonflantes par unité de volume devient plus important, ce qui explique l'augmentation des propriétés de gonflement.

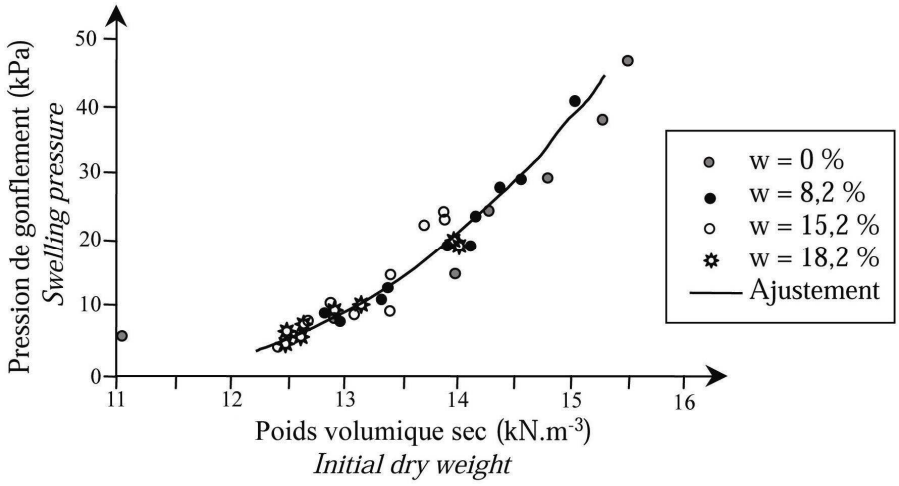

Figure I.14. Influence de la densité sèche sur le gonflement (Sridharan *et al.*, 1986).

Influence of dry density on the swelling pressure (Sridharan* et al.*, 1986).

Le rôle de la succion a été reconnu par Kassif & Ben Shalom (1971) et Komornik *et al.* (1980) qui ont montré qu'au-delà de l'optimum de compactage, la pression de gonflement est égale à la succion initiale, alors que du côté sec, la pression de gonflement n'est plus qu'une fraction de sa succion initiale. Pour expliquer ce résultat, il faut considérer l'état du sol (cf. 0). Au-dessus de

l'optimum, le sol est quasi-saturé, et il y a équivalence entre la réduction de succion provoquée par l'humidification progressive du matériau et l'augmentation de pression de gonflement.

Le gonflement dépend aussi d'un certain nombre de paramètres supplémentaires comme la pression verticale appliquée (Romero *et al.*, 1998), la température (Tessier *et al.*, 1998), l'appareillage utilisé, triaxial ou bien œdomètre ainsi que du mode de compactage (Seed *et al.*, 1962 ; Edil & Alanazy, 1992) ou encore de la concentration de l'électrolyte (Didier *et al.*, 1973 ; Di Maio, 1996).

Évolution de la pression de gonflement en fonction de l'état hydrique

En travaillant sur des argiles gonflantes compactées et humidifiées à volume constant, certains auteurs (Brackley, 1973 ; Push, 1982 ; etc.) observent que la pression de gonflement passe par un maximum avant de décroître au cours de l'hydratation. Le même type de résultat a été obtenu par Alonso *et al.* (1999) qui utilisaient des appareils à succion contrôlée pour étudier le gonflement de l'argile de Boom (fig. I.15). Ces auteurs expliquent ce phénomène par une plastification de l'éprouvette au cours de l'hydratation. En même temps que la succion diminue et que la pression de gonflement augmente, la résistance entre les agrégats du sol diminue. À partir d'un certain seuil, les particules s'effondrent, provoquant la baisse de la pression de gonflement.

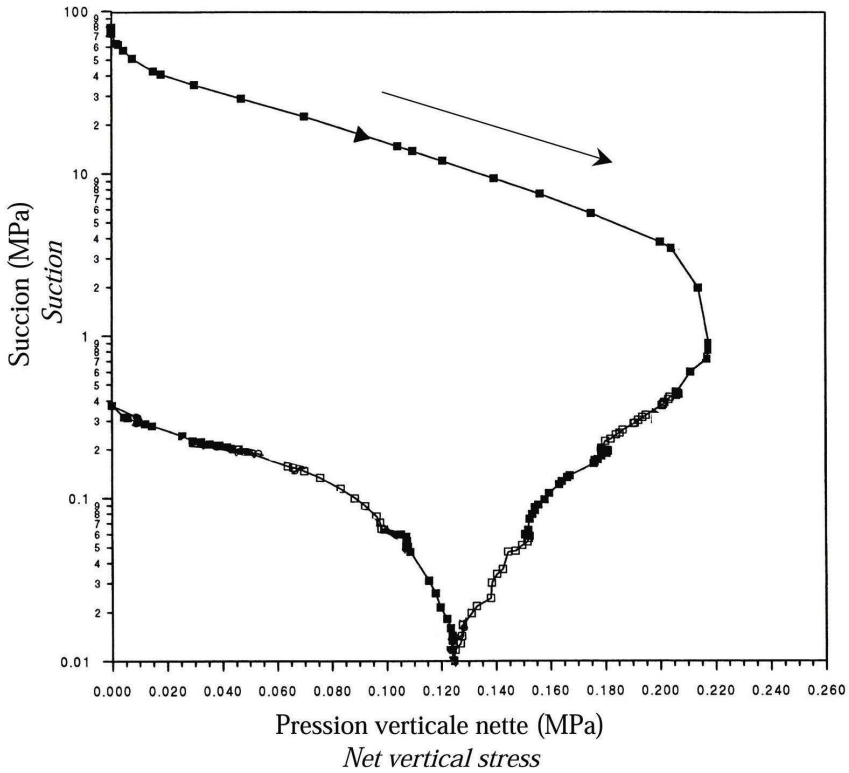

Figure I.15. Évolution de la pression de gonflement au cours de l'humidification (Alonso *et al.*, 1999).

Swelling pressure variation during a wetting test (Alonso* et al.*, 1999).

Structure des sols gonflants

Le terme de structure inclut à la fois la notion de fabrique, c'est-à-dire l'ensemble des caractères ou propriétés géométriques d'un agrégat ou d'un sol (granulométrie, porosité, etc.) et la nature des liens existant entre leurs constituants par le jeu, par exemple, de forces électrochimiques ou de cimentation (Yong & Warkentin, 1975 ; Burland, 1990 ; Wheeler, 1994).

Dans cette partie, l'organisation structurale des sols sera d'abord précisée. L'étude de l'évolution de la structure d'un sol gonflant en fonction de différentes sollicitations viendra ensuite.

Niveaux structuraux

Les feuillets argileux ont tendance à s'agglomérer pour former des particules de taille variable (fig. I.16a). Ce degré d'organisation correspond à l'ultrastructure ou infrastructure d'un sol. À ce niveau, les vides correspondent aux espaces interfoliaires que l'on qualifiera de vides intraparticulaires.

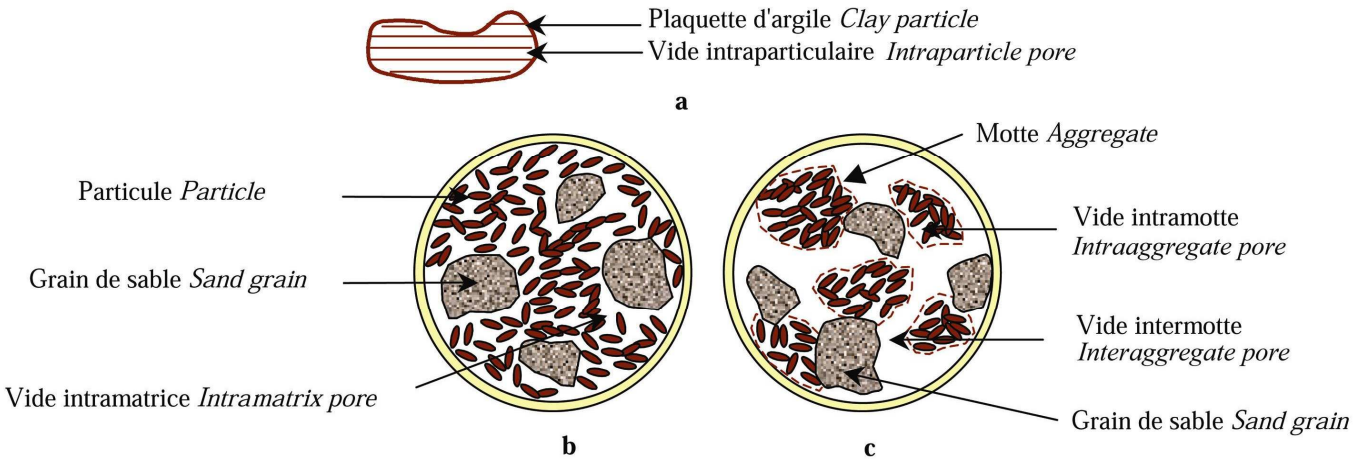

Figure I.16. Structure des sols gonflants (d'après Gens & Alonso, 1992).

Swelling soils structure (from Gens & Alonso, 1992).

Il existe en fait deux grands types de structure pour les sols compactés, structures qui ont été reconnues dans un grand nombre de matériaux différents à partir d'études réalisées au microscope électronique à balayage (Collins & McGown, 1974 ; Yong & Warkentin, 1975 ; Gilliot, 1979).

La figure I.16b représente le premier cas où l'ensemble du matériau est constitué d'une matrice homogène formée à partir des argiles et des autres constituants du sol. Il est alors possible de distinguer deux types de pores : les vides intraparticulaires et les vides intramatrices. Cette structure est typique des sols compactés du côté humide de l'optimum.

La figure I.16c correspond à la deuxième possibilité qui est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés du côté sec de l'optimum. Les particules argileuses s'associent aux autres constituants du sol pour former des agrégats. Trois niveaux structuraux peuvent alors être distingués : l'infrastructure, la microstructure qui correspond aux agrégats, et la macrostructure qui correspond à l'arrangement des agrégats entre eux. Les agrégats contiennent des pores qualifiés de micropores et la macrostructure des macropores situés entre les agrégats. Gens & Alonso (1992) ont repris ce schéma d'organisation, qu'ils qualifient de double structure, comme fondement de leur modèle de comportement des sols gonflants où sont réunies l'infrastructure et la microstructure.

Al-Mukhtar *et al.* (1996), citant différents auteurs, indiquent que la taille moyenne des pores de l'ultrastructure est comprise entre 10 et 15 Å, celle des micropores entre 25 et 2 000 Å, et celle des macropores supérieure à 2 000 Å.

Évolution de la structure en fonction de différentes sollicitations

La structure d'un sol est un état d'équilibre du sol dans des conditions données. La modification des conditions hydrique et/ou mécanique, va provoquer une modification de cette structure. L'objectif de cette partie est de montrer comment la structure d'un sol change en fonction de différents types de sollicitation.

Influence de l'énergie de compactage

Une évolution qualitative de la structure avec l'énergie et la teneur en eau de compactage a été présentée par Cabot & Le Bihan (1993). Ces auteurs constatent une disparition progressive de la macrostructure avec l'augmentation de l'énergie de compactage et/ou de la teneur en eau initiale, la double structure n'ayant pas été observée du côté humide de l'optimum. Le même type de comportement a été observé à l'aide de la porosimétrie à mercure (Cui, 1993 ; Romero *et al.*, 1999).

Influence d'une sollicitation hydrique : dessiccation

D'après Tessier (1991), trois étapes successives peuvent être considérées au cours de la dessiccation d'une montmorillonite calcique. Tout d'abord entre 0 et environ 1 MPa, où l'augmentation de succion provoque le départ d'eau située entre les empilements élémentaires, ce qui a pour effet une diminution de la distance interfoliaire. Ce phénomène se poursuit entre 1 et 5 MPa environ, mais associé à une formation d'empilements élémentaires de plus grande taille comprenant un nombre de feuillets croissant. Au-delà de 5 MPa, l'état d'hydratation de l'espace interfoliaire change, l'eau interfoliaire tend à s'éliminer. Le nombre de feuillets par empilement élémentaire continue de croître.

Le départ d'eau progressif provoque ainsi une réduction de volume de la particule argileuse par diminution de la distance interfoliaire.

Cette réduction du volume des particules argileuses produit une contraction macroscopique du matériau : c'est le phénomène de retrait. Cette contraction du matériau s'interrompt à partir d'un certain seuil de succion, la teneur en eau correspondante étant la limite de retrait. Il y a de plus au cours du séchage un développement de la macroporosité due à la contraction des agrégats.

Influence d'une sollicitation hydrique : humidification

Au cours de la réhumidification, les particules argileuses ont tendance à suivre en sens inverse le processus de dessiccation qui est réversible, la distance interfoliaire d'une argile calcique avant et après un cycle de dessiccation/humidification étant identique (Ben Rhaiem *et al.*, 1986). En revanche, l'humidification tend à réduire le nombre de feuillets par empilement élémentaire. Ainsi, Saiyouri *et al.* (1998) montrent que dans le cas de deux montmorillonites, une sodique et une calcique, lors de l'humidification, le nombre de feuillets par particules passe d'environ 100 feuillets par particule pour une argile calcique sous une succion de 10^3 MPa, à 10 feuillets par particule lorsque la succion n'est plus que de quelques MPa. Dans le cas de l'argile sodique, le nombre de feuillets passe de plusieurs centaines à une dizaine environ pour le même intervalle de succion.

Du point de vue de la structure interne des éprouvettes, le gonflement se traduit par une réduction de la macroporosité, phénomène qui a été mis en évidence par Cui *et al.* (2002) sur un mélange sable - bentonite (48 % bentonite). Leurs résultats ont été obtenus par porosimétrie à mercure sur des éprouvettes compactées. La succion de ces éprouvettes a été réduite par l'imposition de différents paliers, l'humidification se faisant à volume constant. À chaque palier, la courbe porosimétrique du matériau a été déterminée. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure I.17.

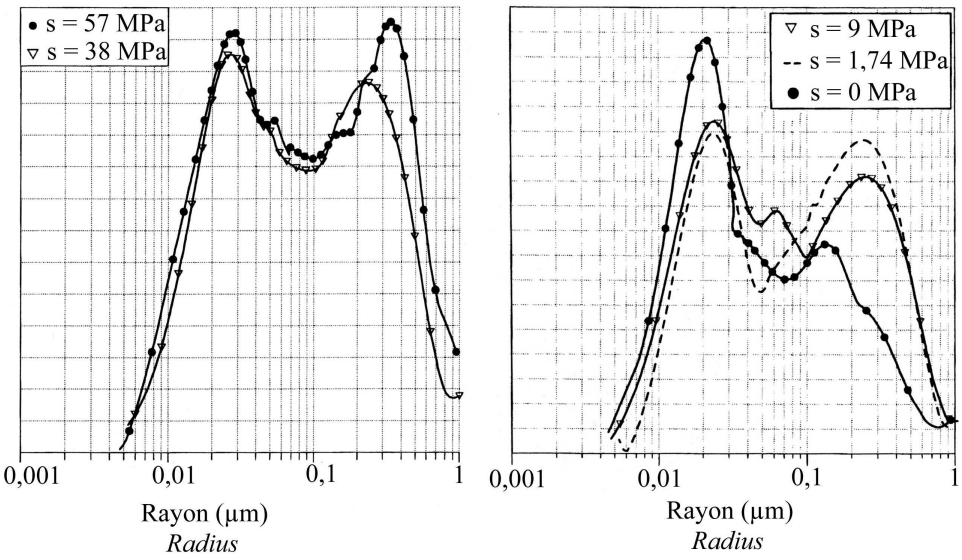

Figure I.17. Évolution de la courbe porosimétrique d'un matériau gonflant en fonction de la succion au cours de l'humidification (Cui *et al.*, 2002).

Evolution of the porosimetric curve of a swelling soil as a function of suction during wetting (Cui* et al.*, 2002).

Influence d'une sollicitation mécanique

Les travaux de Delage *et al.* (1983) sur une argile sensible du Québec ont montré que la réduction d'indice des vides au cours de la consolidation isotrope était due à une réduction de la macroporosité, la microstructure restant pratiquement inchangée. Delage *et al.* (1983) notent aussi que l'effondrement de la structure est progressif et que sa vitesse dépend du niveau de la surcharge et de son mode d'application. Les résultats de Griffiths & Joshi (1989) obtenus sur quatre sols argileux différents comprenant des proportions variables de kaolinite, illite et montmorillonite, de même que ceux de Qi *et al.* (1996) sur une montmorillonite sodique, la Na-laponite, vont dans le même sens.

Comportement hydromécanique des sols gonflants

La partie précédente a permis de montrer que la structure d'un sol gonflant est extrêmement sensible à toute modification de succion ou de contrainte mécanique. Se pose alors la question de savoir quelle est la relation entre ces modifications de la structure interne des matériaux gonflants et leurs conséquences sur le comportement hydromécanique. La suite de ce chapitre s'attache à une synthèse de résultats bibliographiques sur le comportement hydromécanique des sols gonflants.

L'objectif de cette partie est d'étudier la variation des différents paramètres hydromécaniques avec l'état hydrique du matériau, c'est-à-dire sa succion. Le cas à succion nulle sera d'abord évoqué avant que ne soit abordé le cas à succion non nulle.

État saturé (succion nulle)

La compressibilité d'un matériau argileux est extrêmement dépendante du type d'argile qu'il contient, un sol à kaolinite étant moins compressible qu'un sol contenant de la montmorillonite. De même, les paramètres physico-chimiques ont un rôle important puisqu'une montmorillonite calcique est moins compressible qu'une montmorillonite sodique. Olson & Mesri (1971) et Sridharan & Venkatappa Rao (1973) ont montré l'existence de deux phénomènes déterminant la compressibilité d'une argile à l'état saturé. Il existe un mécanisme contrôlé par les résistances au cisaillement entre les différents feuillets, que l'on qualifiera de modèle mécanique, et un mécanisme physico-chimique où le comportement est gouverné par les forces électrochimiques. Les argiles type kaolinite sont plutôt gouvernées par les phénomènes mécaniques tandis que les montmorillonites sont régies par les aspects physico-chimiques, ce qui explique que la compressibilité d'une smectite sodique diffère de celle d'une smectite calcique.

Le rôle des phénomènes physico-chimiques sur la compressibilité semble être limité à une certaine gamme de contrainte. Marcial *et al.* (2001) ont réalisé deux essais de compression œdométrique sur une montmorillonite sodique et une calcique. Leurs résultats (fig. I.18) montrent qu'au-delà d'une contrainte effective d'environ 2 000 kPa, les indices de compression des deux montmorillonites deviennent égaux. Les auteurs de cette étude expliquent ce résultat par le fait que sous une faible contrainte, la double couche peut se développer avec une prédominance des phénomènes physico-chimiques, tandis que sous fortes contraintes, la double couche disparaît.

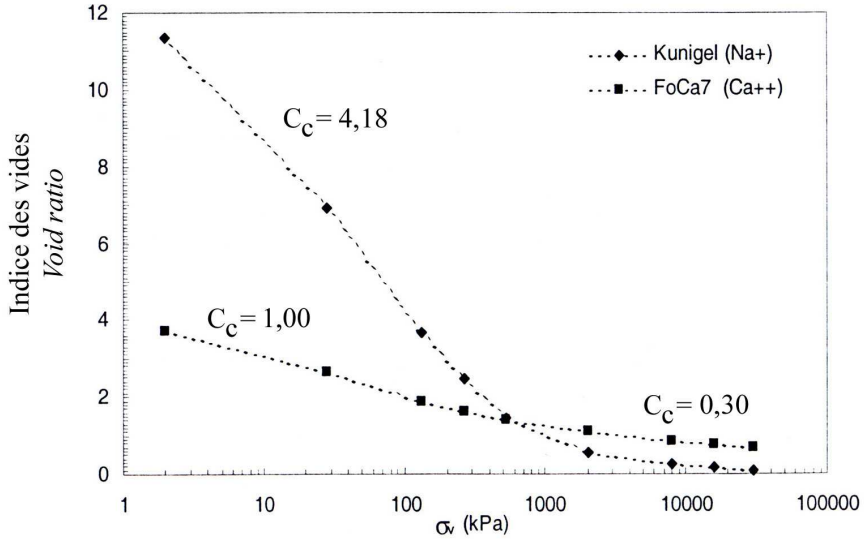

Figure I.18. Compressibilité de deux smectites saturées (sodique et calcique) (Marcial *et al.*, 2001).

Compressibility of two saturated smectites (sodium and calcium) (Marcial* et al., *2001).

Mollins *et al.* (1996) montrent que lors du chargement mécanique d'un mélange sable-bentonite, il existe deux zones distinctes en fonction de la contrainte appliquée. Sous faible charge, le comportement est caractéristique de la bentonite. À forte charge une partie de l'effort est repris par les grains de sable, et le comportement tend alors vers celui du sable. Mollins *et al*. (1986) montrent que la limite entre ces deux zones est fonction de la teneur en argile du mélange. Les hypothèses avancées par Graham *et al.* (1986), selon lesquels la distribution des contraintes dans le mélange combine une relation entre les grains de sable peu compressibles et les argiles au comportement régi par la double couche, peuvent expliquer le comportement mis en évidence par Mollins *et al*. (1986).

État non saturé

Courbe de rétention des sols gonflants

La courbe de rétention d'un sol gonflant est très dépendante des conditions dans lesquelles s'effectue sa détermination. La figure I.19a reproduit la courbe de rétention de l'argile gonflante FoCa obtenue, soit avec des déformations libres, soit à volume constant (Yahia-Aissa, 1999). Les deux courbes divergent à partir d'une teneur en eau qui correspond au moment où il n'est plus possible dans le cas de l'essai à volume constant de faire pénétrer de l'eau dans la cellule d'essai, c'est à dire lorsque l'éprouvette est saturée.

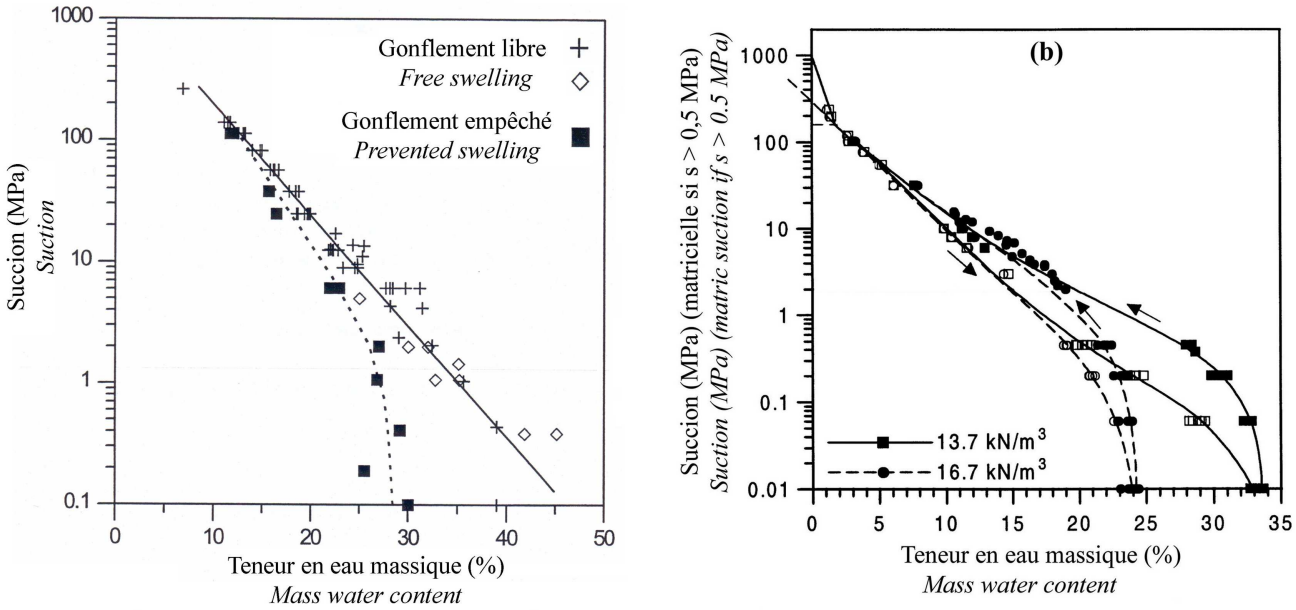

Figure I.19. Influence sur la courbe de rétention : (a) du confinement (Yahia-Aissa, 1999) ; (b) du poids volumlique sec initial (Romero *et al.*, 1999).

Influence on retention curve: (a) of volumetric containment (Yahia-Aissa, 1999); of initial density (Romero* et al., *1999).

Romero *et al.* (1999) ont étudié le rôle du poids volumique sec initial sur la courbe de rétention de l'argile de Boom (fig. I.19b). Leurs résultats montrent que la densité influence la courbe de rétention uniquement au-dessous d'une succion de 2 MPa. Partant du constat que la densité ne joue que sur la quantité de macropores et leur taille, les auteurs supposent qu'en deçà de 2 MPa, la courbe de rétention est contrôlée par les macropores et qu'au-delà elle est contrôlée par les micropores.

Compressibilité mécanique

La figure I.20 donne les valeurs de la pente λ(s) issues des travaux de différents auteurs. Pour réaliser cette figure, ont été sélectionnés uniquement les essais où le matériau était préparé selon une technique constante, puis soumis à une succion donnée, et enfin chargé mécaniquement afin de minimiser l'influence éventuelle du chemin de contrainte sur les paramètres. Si Al-Mukhtar *et al.* (1999) utilisent deux smectites sodiques, les autres auteurs emploient des smectites calciques, tandis qu'Alonso *et al.* (2001) travaillent sur un mélange de smectite calcique et de sable (20 %). Contrairement aux autres auteurs, Al-Mukhtar *et al.* (1999) et Robinet *et al.* (1997) utilisent des matériaux non compactés, préparés sous forme de poudre.

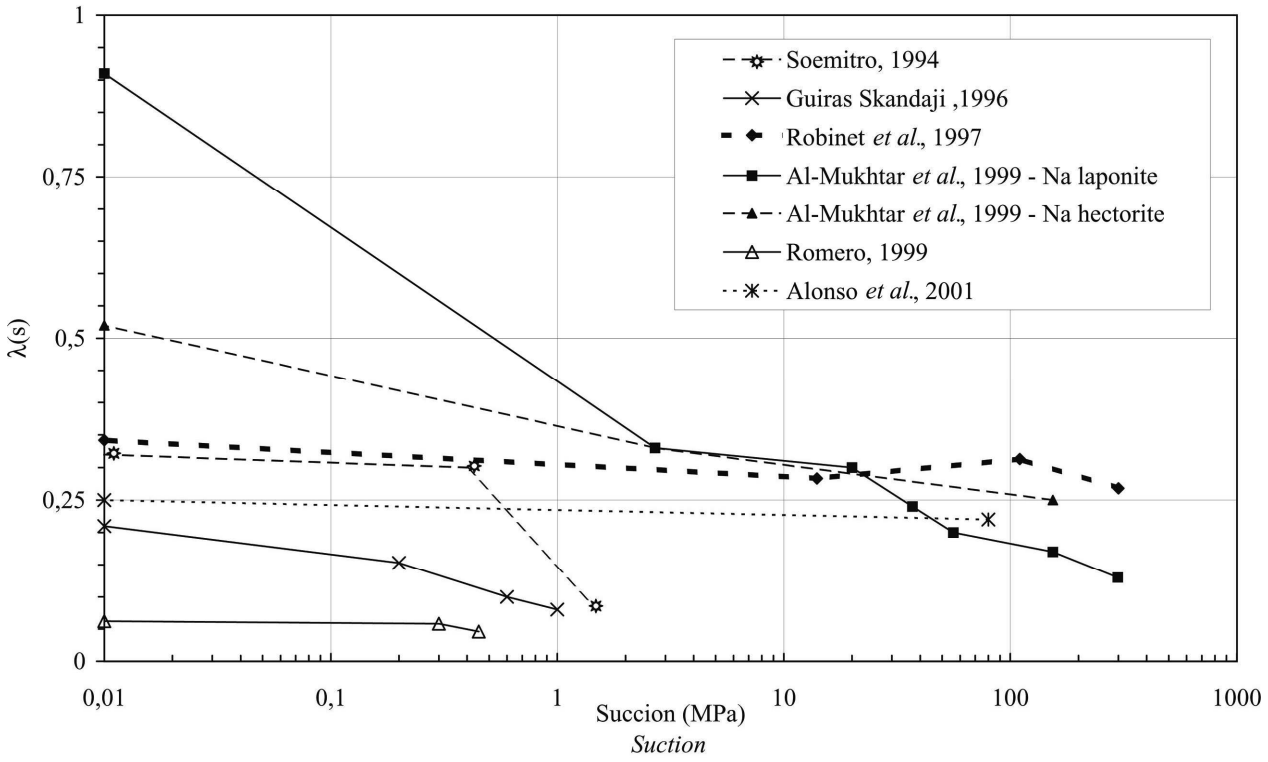

Figure I.20. Pente de compression vierge de différents matériaux gonflants.

Virgin compression slope of several swelling materials.

Cette figure montre que la différence de compressibilité entre smectites sodique et calcique s'atténue lorsque la succion augmente. Ce comportement est à rapprocher des observations de Marcial *et al.* (2001). L'influence des paramètres physico-chimiques liés au cation interfoliaire semble donc limitée au domaine des faibles succions et faibles contraintes.

Parmi les résultats obtenus avec les montmorillonites calciques, il est difficile de conclure au sujet de la relation entre $\lambda(s)$ et la succion. Ainsi, les résultats de Guiras-Skandaji (1996) révèlent une baisse significative de $\lambda(s)$ entre 0 et 1,2 MPa alors que Robinet *et al.* (1997) ne constatent qu'une diminution limitée de ce paramètre entre 0 et 300 MPa environ. L'ensemble des cas représentés ici correspond au cas n°4 de la figure I.8b. La vérification des hypothèses émises par un certain nombre d'auteurs pour le cas des sols non saturés non gonflants – structure, point d'entrée d'air – nécessitent la réalisation d'un plus grand nombre d'essais.

En revanche, la pente de déchargement d'un matériau gonflant peut être considérée comme indépendante de la succion (Villar, 1995 ; Guiras-Skandaji, 1996). D'après les résultats de Delage & Howat (1993) cités par Yahia-Aissa (1999), il apparaît que cette affirmation n'est vraie que pour des succions supérieures à 3 MPa, ce qui peut être relié aux interactions physico-chimiques qui sont différentes à faibles et fortes succions.

Les argiles gonflantes, dans le cadre de leur utilisation pour la construction de barrières ouvragées, sont compactées sous des pressions et des succions parfois très fortes. La réduction de la succion au cours de la vie de l'ouvrage peut entraîner une variation de la pression de préconsolidation apparente qu'il est important de quantifier. À titre d'exemple, la figure I.21 donne trois cas, issus de la bibliographie, de variation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion. Guiras-Skandaji (1996) travaille sur une bentonite calcique compactée à l'optimum, Romero (1999) sur l'argile de Boom compactée et Alonso *et al.* (2001) sur un mélange sable bentonite. L'ensemble de ces résultats montre une décroissance de la pression $p_0(s)$ avec la diminution de succion. Il n'existe cependant pas dans la littérature suffisamment de résultats qui permettent de conclure sur la variation de la pression de préconsolidation apparente sur une gamme étendue de succion.

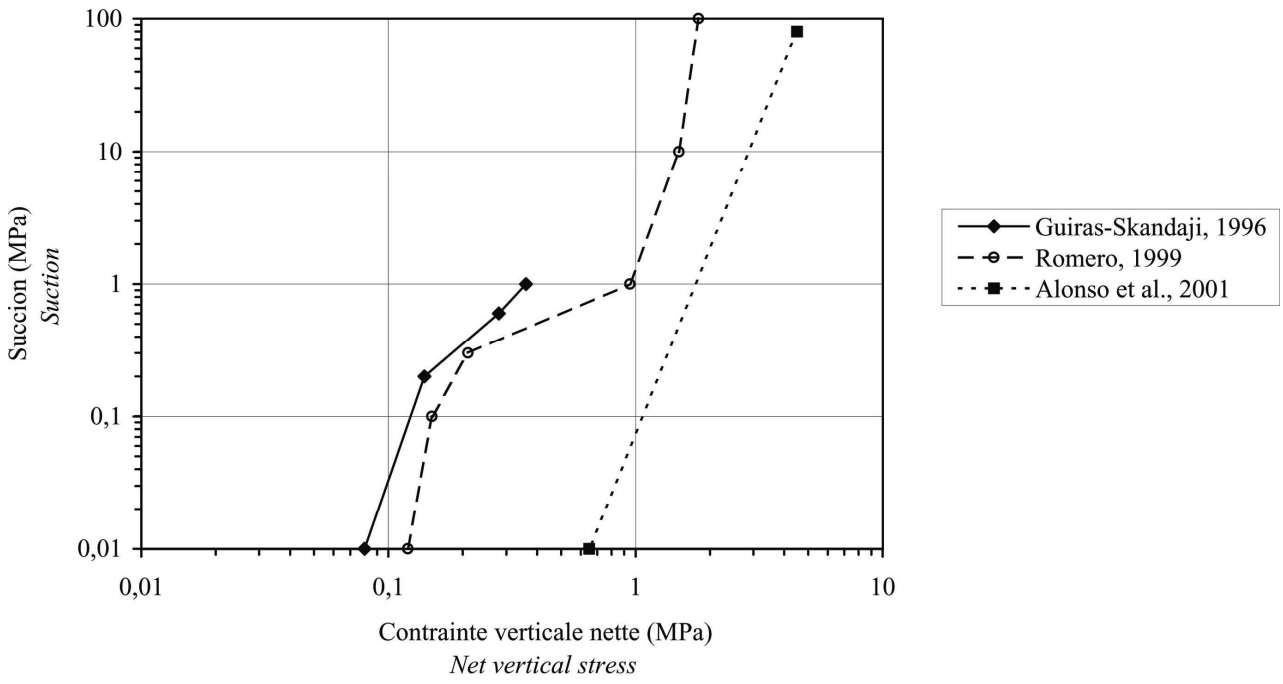

Figure I.21. Variation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion imposée.

Variation of apparent preconsolidation pressure with applied suction.

Cui *et al.* (1998) ont étudié l'influence d'une réduction de succion sur le comportement volumique d'une argile compactée. Le matériau choisi est une bentonite compactée sous 60 MPa avec une succion initiale de 113 MPa. Ces auteurs indiquent que le comportement de cette argile est totalement réversible tant que la succion appliquée supérieur à 82 MPa.

Compressibilité hydrique et cycles de succion

L'augmentation de la succion provoque un important retrait des argiles. Robinet *et al.* (1997), travaillant sur l'argile de Boom, ont montré que plusieurs phases successives se succédaient au cours de la dessiccation (fig. I.22). Il est intéressant de noter que dans tous les deux cas représentés sur la figure, il existe une phase où une augmentation de succion ne provoque plus de variation significative de l'indice des vides. Dans cette dernière phase, les déformations sont élastiques. Ces résultats montrent qu'un cycle de dessiccation/humidification entraîne un retrait irréversible. Fleureau *et al.* (1993) obtiennent le même type de comportement à partir d'une montmorillonite calcique remaniée.

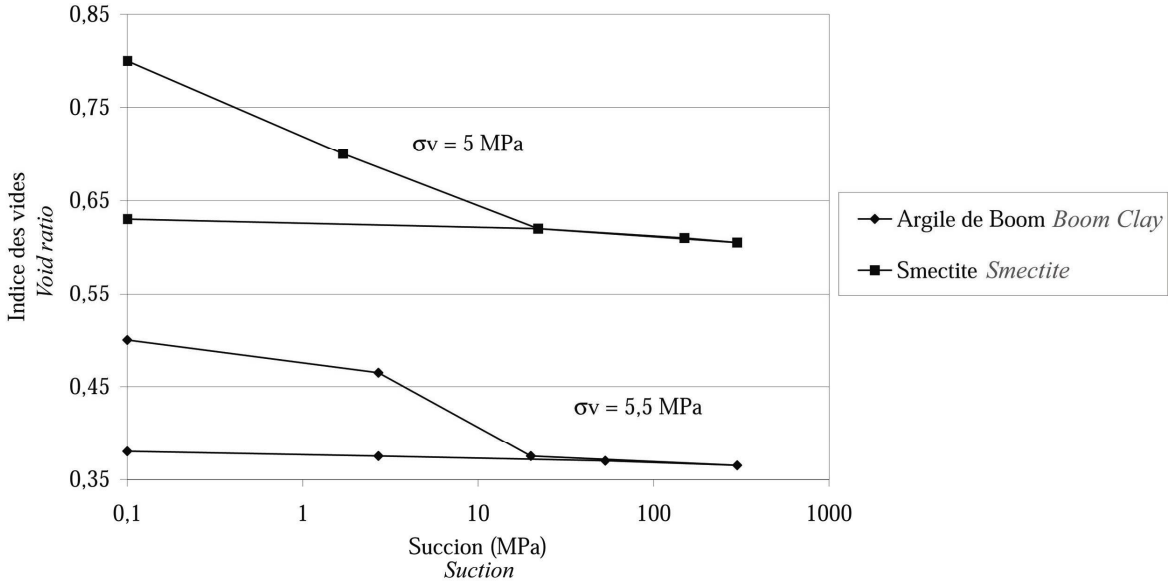

Figure I.22. Évolution de l'indice des vides au cours d'un cycle dessiccation/humectation sous deux pressions verticales (d'après Robinet *et al.*, 1997).

Evolution of the void ratio during a drying/wetting under two vertical stress (from Robinet* et al.*, 1997).

Les observations précédentes peuvent être complétées par les résultats d'auteurs étudiant l'évolution des propriétés de gonflement, potentiel ou pression de gonflement, au cours de cycles hydriques successifs sur différents matériaux gonflants (fig. I.23). Il apparaît ainsi clairement qu'une partie des résultats mettent en évidence une "fatigue" du potentiel de gonflement, alors que l'autre partie dénote une augmentation du potentiel au fil des cycles.

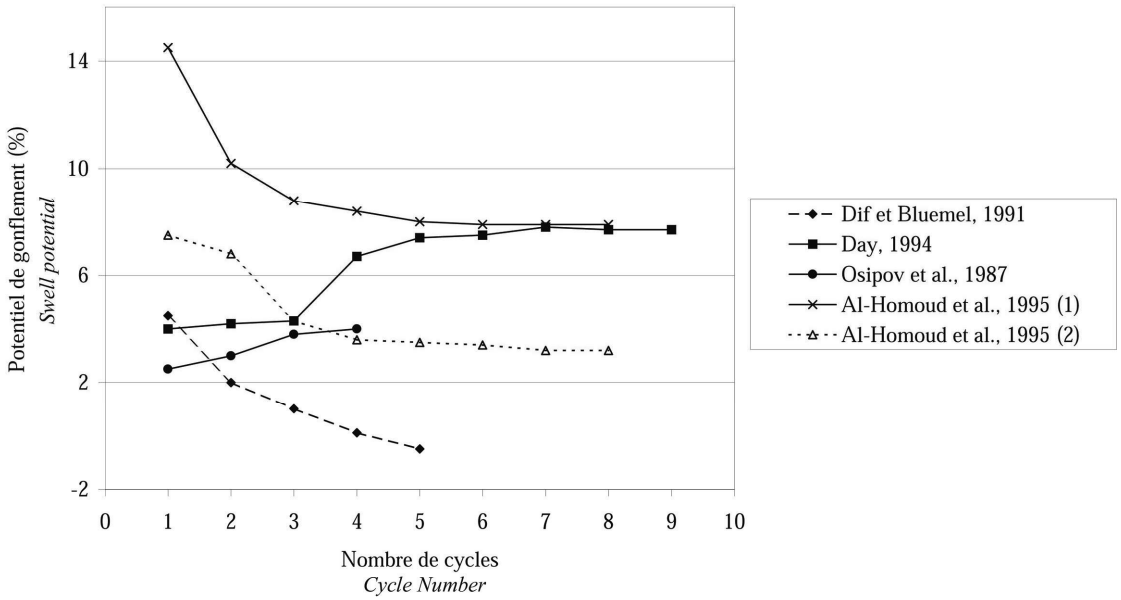

Figure I.23. Variation du potentiel de gonflement selon différents auteurs.

Variation of the swelling potential according to several authors.

La compréhension des phénomènes en jeu au cours de sollicitations hydriques se base sur plusieurs approches. Il est possible de trouver une approche structurale (Delage *et al.*, 1998), hydrique (Tessier *et al.*, 1980), ou hydromécanique (Alonso *et al.*, 1995 ; Villar, 1995 et 1999).

Pour certains auteurs, l'apparition de déformations irréversibles au cours de cycle(s) de succion est associée au type de structure du matériau testé, structure qui est contrôlée par les paramètres du compactage. Delage *et al.* (1998) ont réalisé un cycle de dessiccation-drainage sur de l'argile FoCa compactée à 18 kN.m^{-3}, poids volumique pour lequel la macroporosité n'existe pas. Au cours du cycle hydrique, les déformations plastiques sont inexistantes (fig. I.24). L'hypothèse avancée repose sur le fait que l'absence de la double structure est associée à la disparition des déformations plastiques. Sans la double structure, le comportement du matériau tend vers celui des plaquettes argileuses dont le comportement est supposé élastique (Bolt, 1956).

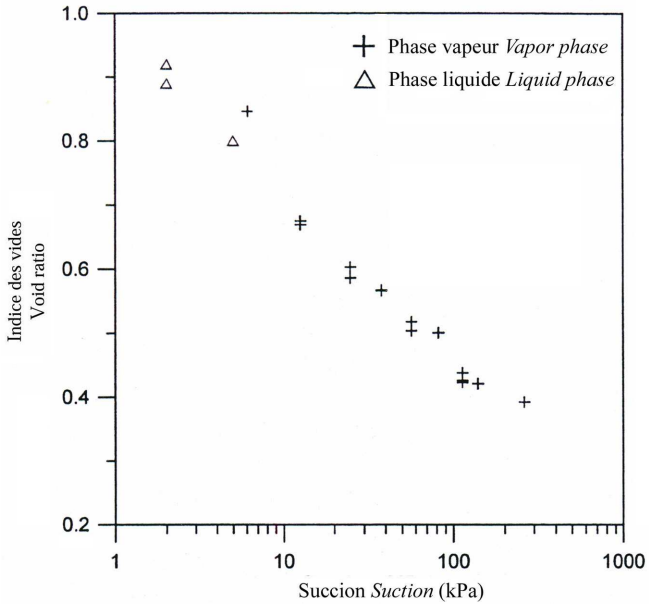

Figure I.24. Variation de l'indice des vides d'une argile gonflante fortement compactée au cours d'un cycle d'humidification/dessiccation (Delage *et al.*, 1998).

Void ratio variation of a highly compacted swelling clay during a wetting/drying cycle (Delage* et al.*, 1998).

Tessier *et al.* (1980) et Tessier (1984) relient les irréversibilités observées au cours d'un cycle de dessiccation/humidification à la nature des argiles présentes dans le sol. La dessiccation d'une montmorillonite calcique provoque la coalescence irréversible de plusieurs unités cristallines, et ainsi la formation de particules de plus grande taille. Ceci modifie les propriétés de gonflement liées dans ces argiles à l'hydratation des espaces intraparticulaires affectés de manière irréversible par la dessiccation. Ces auteurs notent en même temps que le comportement au cours de l'humidification qui

suit est lié au degré de dessiccation subi par le matériau : plus le matériau aura été amené à une succion élevée, plus les particules créées seront de taille importante. Les conclusions de ces auteurs sont appuyées par les observations de Basma *et al.* (1996) et d'Osipov *et al.* (1987) qui constatent que le séchage tend à provoquer une structuration du sol au cours de la dessiccation, structuration irréversible et dépendante du degré de séchage atteint.

Alonso *et al.* (1995) ont réalisé des essais de sollicitations hydriques cycliques sous différentes charges verticales constantes (fig. I.25). Le matériau utilisé était de l'argile de Boom compactée selon une procédure permettant de réaliser des éprouvettes comportant une double structure. Leurs résultats montrent qu'il est possible d'obtenir une accumulation de déformations de compression ou d'extension avec un même type de sol, uniquement en faisant varier la contrainte verticale, c'est-à-dire le rapport de préconsolidation. Ceci a été confirmé par une étude similaire, présentée par Alonso *et al.* (2001), et menée sur un mélange sable bentonite. Alonso *et al.* (1995) concluent que la contrainte verticale, par le biais du rapport de préconsolidation, rapport entre la pression verticale appliquée et la pression de compactage, détermine le comportement du sol sous sollicitations hydriques cycliques.

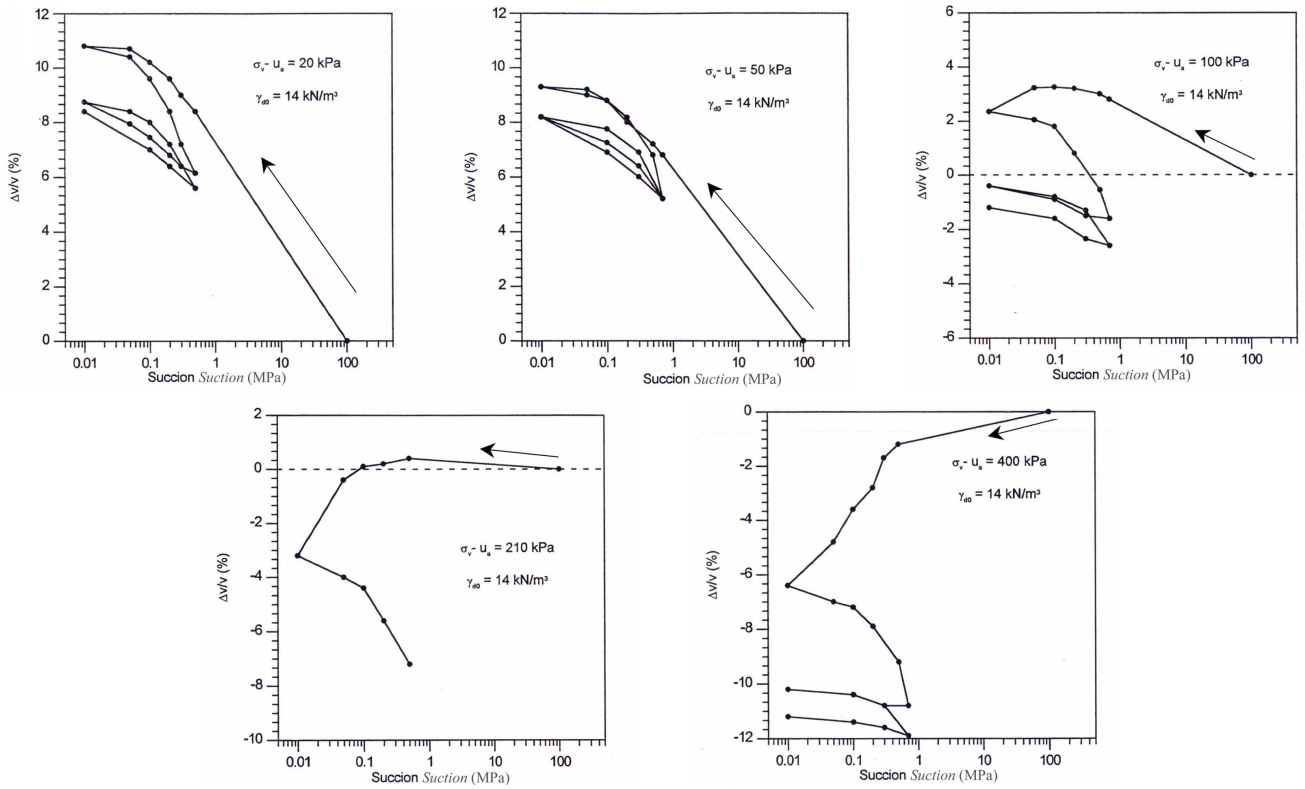

Figure I.25. Variations de volume d'une argile gonflante lors de cycles d'humidification/dessiccation réalisés sous différentes charges verticales constantes (Alonso *et al.*, 1995).

Volume variation of a swelling clay during wetting/drying cycles conducted under various constant vertical load (Alonso* et al.*, 1995).

Villar (1995), en travaillant sur l'argile de Boom et une gamme de succion étendue (0 à 100 MPa), a montré que la quantité de déformations plastiques diminuait avec l'augmentation de la contrainte verticale. Ses résultats montrent aussi l'importance de l'ordre de la sollicitation hydrique, drainage puis humidification ou l'inverse, car suivant l'ordre, il est possible d'avoir accumulation de déformations soit d'extension soit de compression.

Influence du chemin de contrainte

Il est très difficile de trouver dans la bibliographie des résultats portant sur l'influence du chemin de contrainte sur les variations de volume pour les sols gonflants. Les résultats de Villar (1999), obtenus sur une bentonite compactée à une masse volumique de 1,7 g.cm^{-3}, sont donc à ce titre très intéressants. La figure I.26a représente les quatre chemins suivis et la figure I.26b la variation de l'indice des vides en fonction de la succion. La succion initiale est d'environ 100 MPa, et l'indice des vides initial est compris entre 0,52 et 0,55.

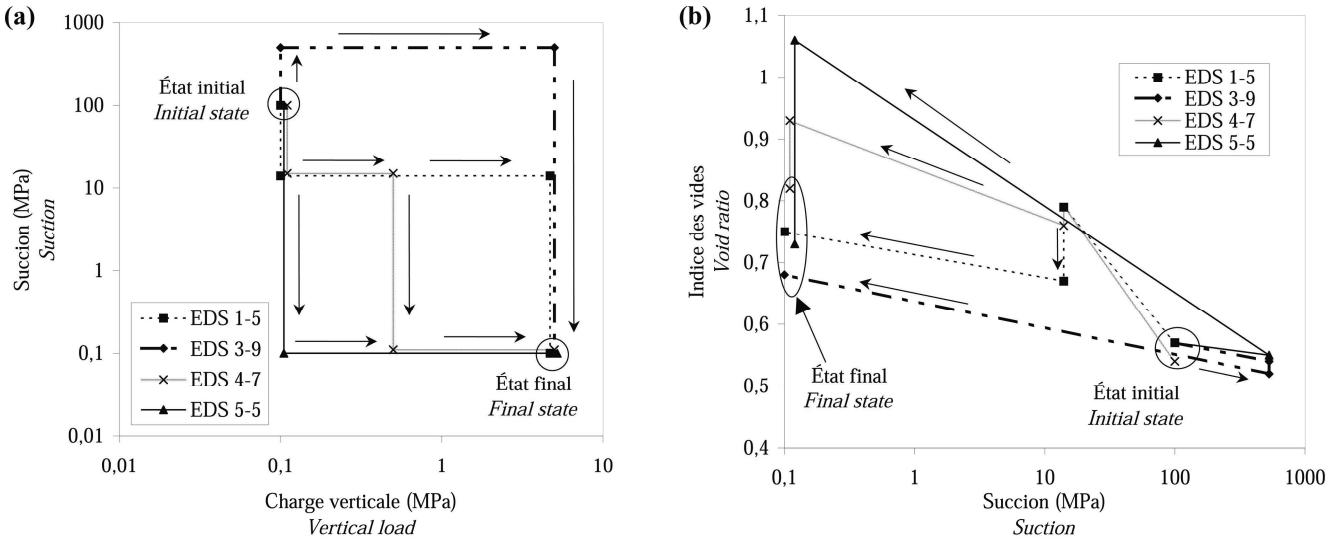

Figure I.26. Influence du chemin de contrainte sur les déformations (d'après Villar, 1999) : (a) chemins suivis ; (b) variations de l'indice des vides.

Influence of the stress path on deformations (from Villar, 1999): (a) followed stress paths; (b) void ratio variation.

Les essais EDS 1-5, EDS 5-5 et EDS 4-7, où la même variation de succion est imposée mais sous trois charges verticales différentes, mènent à un indice des vides final significativement différent. Le cas de l'essai EDS 3-9 est à mettre à part car la succion est augmentée au début de l'essai. L'indice des vides final de cet essai diffère fortement de ceux obtenus par les autres chemins. Il est à noter que la pression de compactage appliquée pour préparer les éprouvettes est de 20 MPa environ, chiffre à comparer à la pression verticale maximale de 5 MPa appliquée. Les mêmes chemins réalisés avec un

sol non gonflant auraient tous abouti au même indice des vides initial, hormis l'essai EDS 3-9 qui inclut une phase de dessiccation (Alonso *et al.*, 1990).

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS NON SATURÉS

Les parties précédentes ont permis d'avoir une vue d'ensemble des traits fondamentaux du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés et de mettre en évidence quelques points à éclaircir. Il s'agit notamment de l'influence de la structure des sols gonflants sur leur comportement, ainsi que sur la transition entre l'état saturé et l'état non-saturé. Ces études expérimentales ont servi aux développements de modèles de comportement qui ont d'abord cherché à intégrer la succion dans leur formulation, en se limitant au cas des sols présentant un gonflement limité. Dans cette partie, seront exposés les concepts de base de la formulation de modèle en non saturé.

L'extension du concept des contraintes effectives aux états non saturés sera évoquée dans le premier point en insistant notamment sur ses limites. Les notions de variables d'état indépendantes et de surface d'état seront ensuite introduites. Le modèle de Barcelone pour sols non saturés non gonflants sera abordé dans un troisième temps tandis que le modèle de Barcelone pour sols expansifs sera plus largement développé dans le quatrième point.

Contrainte effective dans les sols non saturés

La contrainte effective σ', selon Terzaghi, s'exprime comme la différence entre la contrainte totale σ, et la pression interstitielle de l'eau u_w. Dans ce cas, les variations de volume d'un sol sont dues exclusivement aux modifications de la contrainte effective σ'. L'application de ce principe aux sols non saturés implique la prise en compte de la pression de la phase gazeuse u_a (Croney *et al.*, 1958 ; Lambe, 1960 ; Aitchison, 1961 ; Jennings, 1961). Parmi ces travaux, on peut notamment citer ceux de Bishop & Blight (1963) qui propose la formule suivante pour calculer la contrainte effective :

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi\,(u_a - u_w) \qquad \text{I.5}$$

Le paramètre χ varie entre 0 pour un sol sec et 1 pour un sol saturé. Cependant, plusieurs limitations à l'utilisation de cette équation peuvent être mises en avant, notamment le phénomène d'effondrement sous charge (cf. 0). En effet, l'humidification induit une diminution de succion, c'est-à-dire une baisse de la contrainte effective. D'après le principe de la contrainte effective une baisse de la contrainte effective entraîne une augmentation de l'indice des vides, contrairement à ce qui est observé lors de l'humidification sous charge (Jennings & Burland, 1962).

La détermination du paramètre χ est difficile expérimentalement car ce paramètre dépend en réalité de nombreux facteurs tels que le type de sol, sa structure et son indice des vides. Sa détermination est aussi affectée par le phénomène d'hystérésis (Bishop & Blight, 1963). De plus, certains auteurs ont obtenu des valeurs de χ inférieures à 0, supérieures à 1 ou fonction du chemin de contrainte suivi (Matyas & Radhakrishna, 1968 ; Gulhati & Satija, 1981).

Jennings & Burland (1962) supposent que le principe de la contrainte effective appliqué aux sols non saturés n'est valable que dans une gamme de succion limitée à un degré de saturation supérieur à 0,5 pour les sables et limons et 0,85 pour des argiles. Taibi (1994) propose de restreindre l'utilisation du concept aux sols non saturés dans le cas où leur succion est inférieure à la succion s_E. Biarez *et al.* (1987) ont trouvé la même valeur pour les coefficients de compressibilité hydrique et mécanique dans le domaine des succions inférieures à s_E, ce qui démontre l'équivalence entre contrainte mécanique et succion dans ce domaine (cf. 0).

Approches en variables indépendantes et notion de surface d'état

Coleman (1962) suggère d'utiliser un jeu de deux variables indépendantes pour représenter les contraintes au cours d'un essai triaxial, à savoir la contrainte nette $\sigma^* = \sigma - u_a$, et la succion $s = u_a - u_w$. Fredlund et Morgenstern (1977) ont approfondi cette notion de variables indépendantes en démontrant que n'importe quelle paire de deux tenseurs de contrainte indépendants parmi les trois possibles, $\sigma - u_a$, $\sigma - u_w$ et $u_a - u_w$, convenait pour décrire le comportement des sols non saturés.

Une surface d'état est le lieu des points représentant tous les états possibles du matériau dans un espace contrainte, déformation et succion. La validité de ce principe a été pour la première fois vérifiée expérimentalement par Matyas & Radhakrishna (1968). Le résultat final d'un essai est indépendant du chemin suivi, à condition cependant de se limiter aux cas où le degré de saturation ne décroît pas et où le sol ne gonfle pas au cours de l'essai. De nombreuses relations ont été établies pour décrire ces surfaces d'états (Lloret & Alonso, 1985), chacune s'adaptant à un type de problème (suivi de la saturation, indice des vides, etc.) ou aux conditions de l'essai.

Modèle élastoplastique de Barcelone pour sols non saturés

Parmi les modèles destinés aux sols non saturés, le modèle de Barcelone BBM (*Barcelone Basic Model*) pour les sols non saturés, présenté par Alonso *et al.* (1987) et Alonso *et al.* (1990) permet de rendre compte d'un nombre important de phénomènes spécifiques aux sols non saturés. Ces modèles ont donc été sélectionnés pour interpréter les résultats des essais qui seront présentés par la suite.

Définition des surfaces de charges

Ce modèle utilise deux variables indépendantes : la contrainte moyenne nette p* et la succion s. Il permet de prendre en compte l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion, l'effondrement ou le gonflement en fonction de la charge appliquée lors de l'humidification, l'augmentation de succion produit des déformations irréversibles, ainsi que l'indépendance du chemin de contrainte pour des variations monotones de contrainte et de succion.

Ce modèle définit un domaine élastique limité par deux surfaces de charges (fig. I.27). La première de ces surfaces permet de reproduire l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion. Il s'agit de la courbe LC (*Loading Collapse*). La deuxième surface permet de rendre compte de l'apparition de déformations plastiques au cours de la dessiccation d'un matériau au-delà d'un certain seuil de succion. Cette surface est supposée indépendante de la contrainte verticale nette ; il s'agit de la SI (*Suction Increase*).

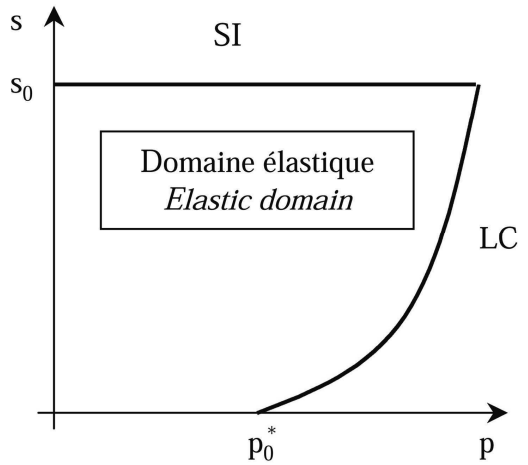

Figure I.27. Surfaces de plasticité dans le plan (p* – s) (Alonso *et al.*, 1990).

Plastic surfaces in the (p* - s) plane (Alonso* et al.*, 1990).

Formulation du modèle

La courbe SI est donnée par la relation I.6 la courbe LC par l'équation I.7. Les paramètres s_0 et p_0^* sont les deux paramètres d'écrouissage.

$$s = s_0 \qquad \text{I.6}$$

$$\left(\frac{p_0}{p_c}\right) = \left(\frac{p_0^*}{p_c}\right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \qquad \text{I.7}$$

avec :

$\lambda(s)$: pente de compression vierge à la succion s ;
$\lambda(0)$: pente de compression vierge sous une succion nulle ;
p_c : pression de référence ;
p_0 : pression de préconsolidation apparente sous la succion s ;
p_0^* : pression de préconsolidation apparente sous une succion nulle ;
s_0 : plus grande succion connue par le sol.

Dans les équations qui vont suivre, l'indice supérieur indique le type de déformation, "e" pour élastique et "p" pour plastique, l'indice inférieur indique l'origine de la déformation, "p" pour une modification de la contrainte moyenne et "s" pour la succion.

Un chargement mécanique à succion constante produit la déformation élastique suivante :

$$d\varepsilon_{vp}^{e} = -\frac{\kappa}{v}\frac{dp^*}{p_*} \qquad \text{I.8}$$

avec :
v : volume spécifique, v = 1 + e ;
κ : est la pente élastique de la courbe de compressibilité, indépendante de la succion.

Le chargement mécanique d'un sol vierge à succion constante se traduit par une déformation plastique donnée par l'équation I.9. Ce paramètre varie en fonction de la succion suivant la relation I.10 qui correspond au cas 4 de la figure I.8b.

$$d\varepsilon_{vp}^{p} = -\frac{\lambda(s)-\kappa}{v}\frac{dp_0^*}{p_0^*} \qquad \text{I.9}$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)\left[(1-r)\exp(-\beta_s) + r\right] \qquad \text{I.10}$$

avec :
r : paramètre égal au rapport entre $\lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)$;
β_s : contrôle le taux d'augmentation de la raideur avec la succion.

Couplages

La figure I.28 montre l'influence d'un chargement mécanique sur la position des surfaces de charge. Le chemin I provoque un déplacement vers la droite de la courbe LC qui se traduit par une augmentation de p_0^*, la position de la courbe SI restant identique. Le chemin hydrique II provoque un écrouissage couplé succion-contrainte avec à la fois une augmentation de s_0 et de p_0^*.

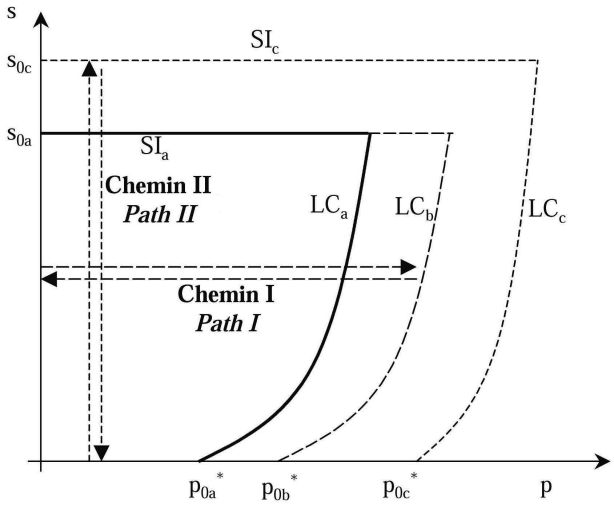

Figure I.28. Couplages LC et SI.

Coupling between LC and SI.

Remarques

Ce modèle permet de décrire correctement la plupart des phénomènes observés sur les sols non saturés. Il s'agit notamment de l'effondrement sous charge, de l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion, et de la dépendance du résultat d'un essai vis-à-vis du chemin de contrainte.

Certaines limites peuvent cependant être décelées dans ce modèle, en plus du cas particulier des sols fortement expansifs. L'effondrement n'augmente pas indéfiniment avec la charge verticale, la pente $\lambda(s)$ varie de manière monotone alors que certains auteurs mettent en évidence des comportements plus complexes (fig. I.8). De plus, le gonflement irréversible n'est pas pris en compte, de même que l'augmentation de la compressibilité du sol associée au gonflement.

Modélisation de Barcelone pour sols gonflants (BExM)

Les auteurs du modèle BBM ont proposé une évolution du modèle destinée aux sols fortement expansifs ; il s'agit du BExM (*Barcelona Expansive Model*) (Gens & Alonso, 1992 ; Alonso *et al.*, 1999).

Description du modèle

Hypothèses

Le point de départ de leur modèle est le constat de l'existence de différents niveaux structuraux dans un sol gonflant. Les auteurs, par souci de simplification, ne retiennent que deux niveaux structuraux (fig. I.16c). L'élaboration de leur modèle repose sur un certain nombre d'hypothèses :

- la microstructure reste saturée quel que soit le niveau de succion ; le concept de contrainte effective est donc considéré comme applicable au niveau microstructural ;
- les déformations de la microstructure sont purement élastiques et volumiques ;
- les équilibres mécaniques, hydriques et chimiques sont réalisés entre la macrostructure et la microstructure ;
- le couplage entre la microstructure et la macrostructure se traduit par la création de déformations plastiques macrostructurales ε_{vM}^{p}, à partir de déformations microstructurales élastiques $\varepsilon_{v\mu}^{e}$;
- le comportement de la microstructure est indépendant du comportement de la macrostructure, l'inverse n'étant pas vrai.

La première hypothèse induit que l'incrément de déformation élastique microstructurale $d\varepsilon_{v\mu}^{e}$, ne dépend que de l'incrément de contrainte effective. Il est possible de construire dans le plan (p, s) une ligne d'équation (p + s) = constante, orientée à 45° par rapport aux axes, qui représente les états pour lesquels il n'y a aucune déformation microstructurale (fig. I.29). Cette ligne est la NL (*Neutral Line*), elle sépare la zone de gonflement microstructural de la zone de retrait microstructural.

Les déformations microstructurales élastiques $\varepsilon_{v\mu}^{e}$ affectent l'organisation de la macrostructure. Au-delà d'un certain point de variation de la contrainte effective au niveau microstructural, les déformations macrostructurales plastiques apparaissent avec deux cas possibles :

- soit la contrainte effective diminue, la microstructure gonfle provoquant l'apparition, au-delà d'un certain seuil, d'un gonflement irréversible, ce qui permet de définir la surface de charge SD (*Suction Decrease*) ;
- soit la contrainte effective augmente, la microstructure se rétracte créant un réduction de volume irréversible à partir d'un seuil, ce qui permet de définir la surface de charge SI (*Suction Increase*).

En première approximation, ces deux surfaces sont prises parallèles à la NL, inclinées de 45° par rapport aux deux axes, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de l'état actuel de la macrostructure (saturation, degré de surconsolidation…).

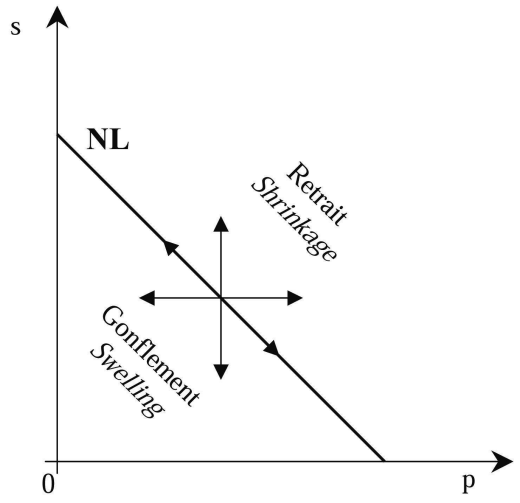

Figure I.29. Représentation de la courbe NL (Gens & Alonso, 1992).

Representation of the Neutral Line NL (Gens & Alonso, 1992).

Les auteurs supposent que la courbe LC telle que définie dans le modèle de Barcelone initial permet de décrire le comportement macrostructural. L'ensemble des surfaces de charge introduites dans le BExM est représenté sur la figure I.30.

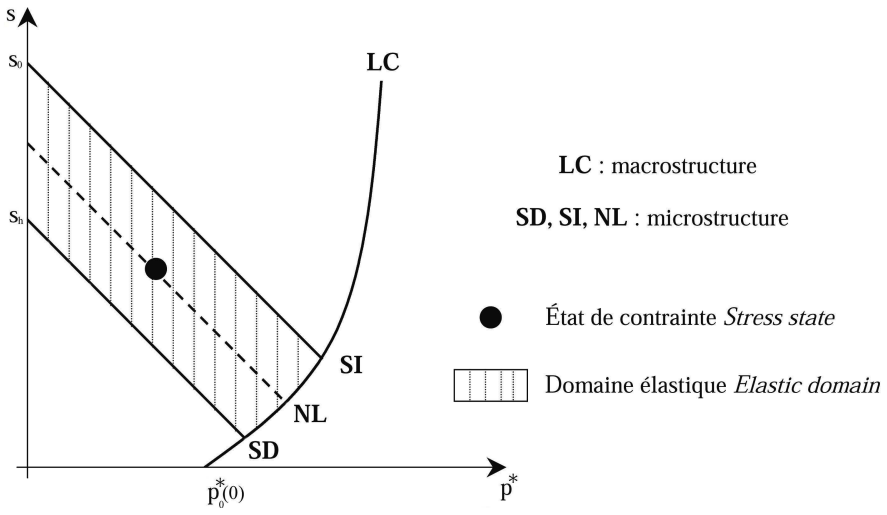

Figure I.30. Surfaces de charge du BExM (Gens & Alonso, 1992).

Yield surfaces of the BexM (Gens & Alonso, 1992).

Comportement de la microstructure et couplage micro/macro

Les auteurs suggèrent l'utilisation du modèle de la double couche diffusive pour décrire les variations de volume de la microstructure en fonction de la contrainte effective. La limite de ce type d'approche est qu'elle ne prend en compte que le comportement d'une plaquette individuelle, c'est-à-dire l'infrastructure, alors que la microstructure telle que définie dans ce modèle est constituée d'un assemblage hétérogène. Une alternative proposée par Alonso *et al.* (1999) repose sur la prise en compte de l'agrégat en le décrivant avec les propriétés habituelles en milieu saturé. Le comportement étant supposé parfaitement élastique, il n'y a donc plus qu'un seul paramètre à déterminer pour la partie micro : la pente de déchargement de la microstructure (κ_m).

La figure I.31a montre l'influence du gonflement microstructural sur le comportement mécanique macrostructural. En amenant un éprouvette de sol du point A vers le point B, un gonflement microstructural a lieu, qui entraîne une augmentation de l'indice des vides macrostructural. Ce gonflement provoque un réarrangement structural de l'éprouvette qui se traduit par un déplacement vers la gauche de la courbe LC, ce qui correspond à un radoucissement.

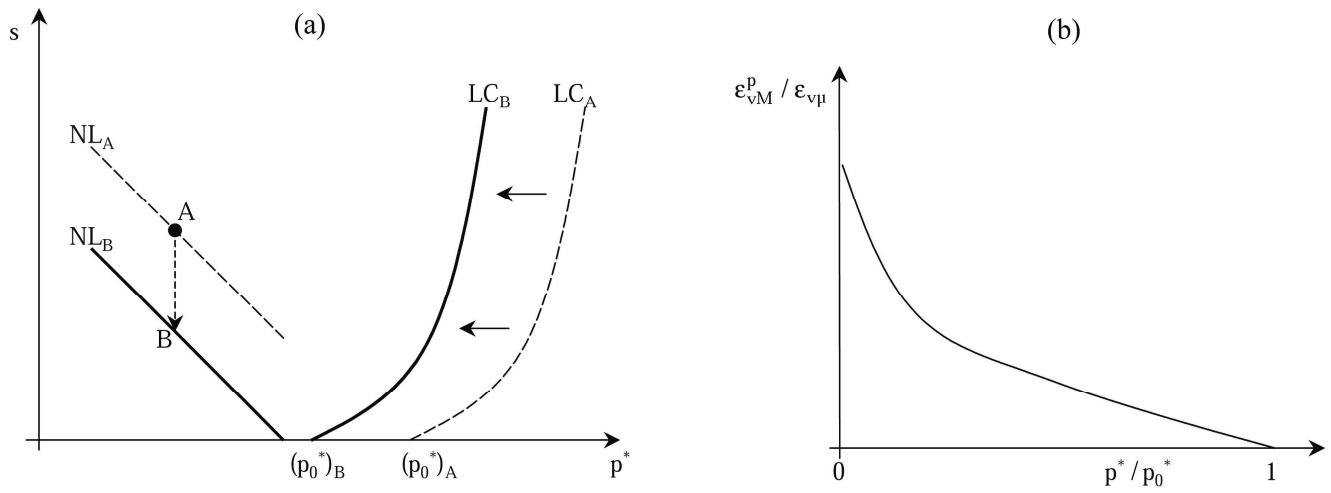

Figure I.31. Couplage entre la micro et la macrostructure (Gens & Alonso, 1992).

Coupling between the micro and macrostructure (Gens & Alonso, 1992).

Le modèle suppose que le gonflement macrostructural plastique généré par le gonflement microstructural est fonction du rapport p^* / p_0^*. La figure I.31b montre que lorsque le rapport p^* / p_0^* tend vers 1, il n'y a plus aucun gonflement, le sol étant alors en situation de s'effondrer lors de l'humidification.

Formulation mathématique

L'expression de la surface de charge LC est identique à celle donnée dans le modèle initial de Barcelone BBM (équation I.7). À partir de l'expression de la NL, il est possible de donner l'équation de la SI et de la SD (équations I.11 et I.12).

$$\text{SD} : p^* + s - s_h = 0 \qquad \text{I.11}$$

$$\text{SI} : p^* + s - s_0 = 0 \qquad \text{I.12}$$

avec :

s_h : succion au-delà de laquelle les déformations macrostructurales plastiques apparaissent lors de l'humidification lorsque la contrainte moyenne nette est nulle ;

s_0 : succion au-delà de laquelle les déformations macrostructurales plastiques apparaissent lors de la dessiccation lorsque la contrainte moyenne nette est nulle.

Performances et limites du modèle BExM

Le modèle BExM a fait l'objet d'un certain nombre de validations (Alonso *et al.*, 1999 ; Alonso *et al.*, 2001). L'introduction de la surface de charge SD permet de reproduire le gonflement irréversible lors d'une humidification. De même, il autorise la modélisation des variations de volume enregistrées au cours de cycles hydriques successifs en intégrant l'influence de la charge verticale. Ce modèle introduit aussi un couplage entre le gonflement du sol et son comportement mécanique.

Le modèle pose l'hypothèse d'une surface de charge NL inclinée à 45° par rapport aux axes. Cette hypothèse nécessite que la microstructure reste saturée quel que soit le niveau de succion, ce qui n'est pas forcément vérifié dans la gamme des très fortes succions. Le calcul des déformations volumiques engendrées par des cycles hydriques repose sur la connaissance de deux fonctions de couplage qui restent difficiles à déterminer expérimentalement.

CONCLUSION

Ce chapitre a tout d'abord permis une revue générale de l'ensemble des techniques permettant d'imposer la succion à un sol non saturé dans une gamme de succion comprise entre 0 et plusieurs centaines de MPa. Les deux techniques qui ont été retenues pour la réalisation des essais présentés dans les chapitres suivants sont la méthode osmotique et la technique des solutions salines saturées, qui feront l'objet d'une attention plus particulière dans ces chapitres.

Après quelques rappels sur les sols non gonflants, le comportement hydromécanique des sols gonflants a été étudié, ce qui a permis la mise en évidence de leurs caractéristiques principales. Ainsi un changement de succion provoque des modifications profondes du comportement de ces matériaux. Cette revue bibliographique a aussi fait ressortir certains manques sur la connaissance de ces sols en

particulier la nécessité qu'il y a d'obtenir des données à la fois dans le domaine des fortes succions, supérieures à quelques MPa, et dans le domaine des faibles succions sur les matériaux gonflants compactés.

L'ensemble des données existantes a permis l'élaboration des modèles BBM et BExM qui seront utilisés par la suite pour interpréter les résultats obtenus. Le modèle BExM permet de reproduire un certain nombre de traits particuliers du comportement des sols gonflants, notamment l'accumulation de déformations irréversibles au cours de cycles successifs d'humidification/dessiccation. Quelques questions restent cependant en suspens, comme notamment l'influence du chemin de contrainte, le couplage entre sollicitations hydrique, mécanique et variations de volume, et le comportement mécanique sous très fortes succions.

L'objectif des chapitres suivants, à l'aide du développement de dispositifs expérimentaux originaux, est d'apporter quelques éléments de réponse à l'ensemble des interrogations soulevées par l'étude bibliographique.

Chapitre II :

Techniques expérimentales

INTRODUCTION

L'étude du comportement hydromécanique des sols gonflants requiert l'utilisation de dispositifs expérimentaux permettant d'imposer la succion dans une très large gamme, entre 0 et plusieurs centaines de MPa. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'employer au moins deux techniques d'imposition de la succion. Dans le cadre des essais qui seront présentés dans ce mémoire, la méthode osmotique et la technique des solutions salines ont été sélectionnées. Les raisons pour lesquelles elles ont été retenues seront exposées dans le premier point de ce chapitre.

La gamme de succion accessible avec la méthode osmotique a été étendue jusqu'à une succion de 8,5 MPa. Cette extension a nécessité un étalonnage des solutions osmotiques dont le principe sera exposé avant d'aborder la description des appareils œdométriques osmotiques au cours de la deuxième partie de ce chapitre. L'imposition d'une succion par la méthode des solutions salines saturées est extrêmement exigeante du point de vue des conditions d'expérience. Une grande attention a donc été portée aux conditions dans lesquelles cette technique devait être employée. Cette recherche nous a amenés à poser quelques recommandations pour son usage. À partir de cette méthode, plusieurs nouveaux œdomètres à solutions salines ont été développés, dont les principales caractéristiques seront décrites dans la troisième partie de ce chapitre.

Ce chapitre est donc entièrement consacré aux techniques expérimentales utilisées pour la réalisation du travail qui sera présenté dans les chapitres suivants.

CHOIX DES MÉTHODES D'IMPOSITION DE LA SUCCION

La recherche bibliographique réalisée dans le chapitre précédent a montré la nécessité d'étudier le comportement d'un matériau sur une gamme étendue de succion, de la saturation jusqu'à plusieurs centaines de MPa. La réalisation d'une telle étude nécessite l'utilisation d'au moins deux méthodes expérimentales d'imposition ou de mesure de la succion, ce qui est visible sur la figure II.1.

Les techniques de mesure de succion n'ont pas été retenues car les plaques tensiométriques ont une gamme accessible trop limitée. D'autre part, le papier filtre requiert la destruction de l'éprouvette pour la mesure de succion, et le psychromètre implique le positionnement de la tête du capteur au contact de l'éprouvette, ce qui peut perturber le résultat de l'essai.

Deux méthodes d'imposition ont donc été choisies. Pour la gamme des succions les plus faibles (s < 10 MPa), il s'agit de la méthode osmotique, le matériel ayant déjà été développé et utilisé au laboratoire. La technique des solutions salines est la seule méthode qui permet l'imposition de très fortes succions et a donc également été retenue. Sur la figure II.1, les pointillés indiquent la gamme de succion pour laquelle la validité de chaque technique devra être démontrée. Ce point fera l'objet d'une attention particulière au moment de la présentation de chacune des techniques expérimentales.

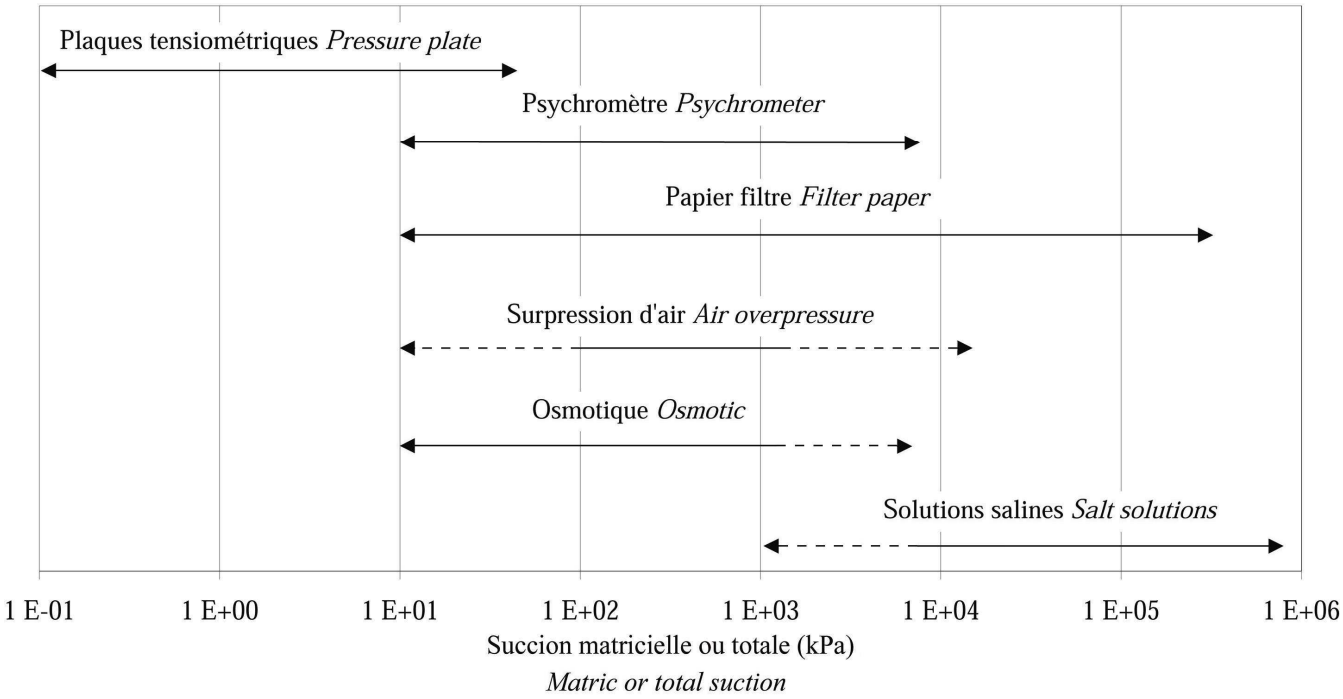

Figure II.1. Gamme accessible par les techniques de mesure ou d'imposition de la succion.

Suction range of each suction imposition or measurement method.

Œdomètre osmotique

Ce type d'œdomètre à succion contrôlée exploite le principe de l'osmose déjà décrit au paragraphe I.2. Le premier point de cette partie expose la méthode d'extension de la gamme de succion accessible avec cette méthode. Sont introduites ensuite, les principales caractéristiques des appareils œdométriques utilisés au laboratoire.

Étalonnage des solutions osmotiques

Étalonnage existant

L'utilisation de la méthode osmotique nécessite la connaissance de la relation qui lie la concentration de la solution osmotique en macromolécules à la succion imposée. L'étalonnage des solutions osmotiques pour des succions comprises entre 0 et 1,5 MPa a été réalisé par plusieurs auteurs utilisant des psychromètres à thermocouples. Leurs résultats, collectés par Zur (1966) et Williams & Shaykewich (1969), sont reportés sur la figure II.2 où les données initialement exprimées en g de PEG par g de solution ont été converties en g de PEG par g d'eau. Cette figure révèle que la succion imposée est indépendante du poids moléculaire de la macromolécule utilisée.

Il est à noter que la majorité des auteurs utilise le PEG 20 000 pour imposer la succion au cours d'essais hydromécaniques.

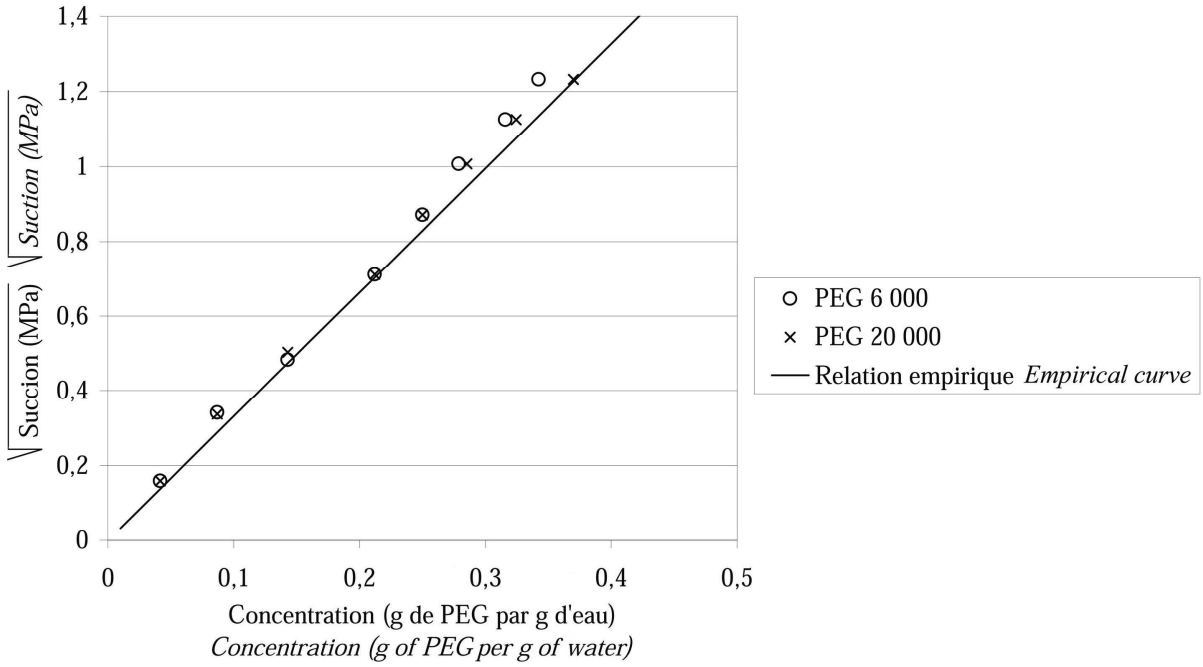

Figure II.2. Relation entre la concentration en PEG et la succion (Williams & Shaykewich, 1969 ; Cui, 1993).

Relationship between PEG concentration and suction (Williams & Shaykewich, 1969 ; Cui, 1993).

Cui (1993) a montré que cette relation d'étalonnage était ajustée par une relation parabolique empirique, ajoutée sur la figure II.2, de la forme :

$$s = 11\,c^2 \qquad \text{1II.13}$$

avec :

s : succion (MPa) ;

c : concentration de PEG exprimée en g de PEG par g d'eau.

Extension de la gamme de succion accessible avec cette méthode

La gamme de succion accessible avec la méthode osmotique a été étendue, l'utilisation des solutions salines étant limitée aux succions supérieures à 8,5 MPa (cf. II.2.2). Pour atteindre cette succion, il est nécessaire de préparer des solutions osmotiques très concentrées. Or, au-delà d'une concentration d'environ 0,3 g de PEG par g d'eau, les solutions élaborées à partir du PEG 20 000 deviennent très visqueuses et ne peuvent plus être utilisées. De plus, le PEG 20 000 n'est pas assez soluble pour atteindre des succions de l'ordre de 8,5 MPa. L'extension ne peut donc se faire qu'en utilisant un PEG de poids moléculaire inférieur.

Le choix de la macromolécule employée pour la réalisation de l'extension a été fait en considérant la différence entre le poids moléculaire des macromolécules disponibles et le MWCO des différentes membranes semi-perméables existantes. Le MWCO d'une membrane, *Molecular Weight Cut Off*, est le paramètre qui correspond à son seuil de coupure, c'est-à-dire au poids moléculaire minimum qu'elle peut retenir. Pour une efficacité maximale de la membrane, il est nécessaire que le rapport entre le poids moléculaire de la macromolécule et le seuil de coupure de la membrane soit maximal. Considérant ce dernier point, le PEG 6 000 semble ainsi le plus adapté, le seuil de coupure de la membrane lui correspondant étant de 3 500 Da.

L'étalonnage du PEG 6 000 dans la gamme des succions comprises entre 1,5 et 8,5 MPa a donc été entrepris. Delage *et al.* (1998) ont proposé une procédure d'étalonnage des solutions osmotiques : un échantillon de solution de PEG avec une concentration connue est introduit dans une enceinte close où l'humidité relative est maintenue constante par une solution saline saturée. Après équilibre, la mesure de la masse d'eau échangée permet d'évaluer la concentration finale de la solution osmotique et ainsi de compléter la courbe d'étalonnage. Un étalonnage supplémentaire a été réalisé en suivant la même technique. La concentration initiale de la solution est voisine de 0,790 g de PEG par g d'eau et la succion appliquée de 8,5 MPa. Tout au long de l'essai, la température a été maintenue à 20 ± 0,15 °C.

La masse de la solution de PEG a été mesurée chaque mois. Entre le 6ème et le 7ème mois d'essai, la masse d'eau échangée était inférieure à 0,1 % de la masse totale d'eau échangée : l'équilibre a donc été considéré comme atteint. La concentration finale est de 0,885 g de PEG par g d'eau. Cette valeur, ainsi que celles obtenues par Delage *et al.* (1998) avec le PEG 6 000, ont été reportées sur la figure II.3. Cette figure a été complétée en ajoutant la relation proposée par Cui (1993) étendue jusqu'à une succion de 9 MPa.

La figure II.3 montre que les étalonnages supplémentaires sont reproductibles entre eux. Un autre point intéressant concerne la relation de Cui qui (1993) qui apparaît valide jusqu'à la succion de 9 MPa. Cette relation a donc été utilisée pour préparer les solutions osmotiques.

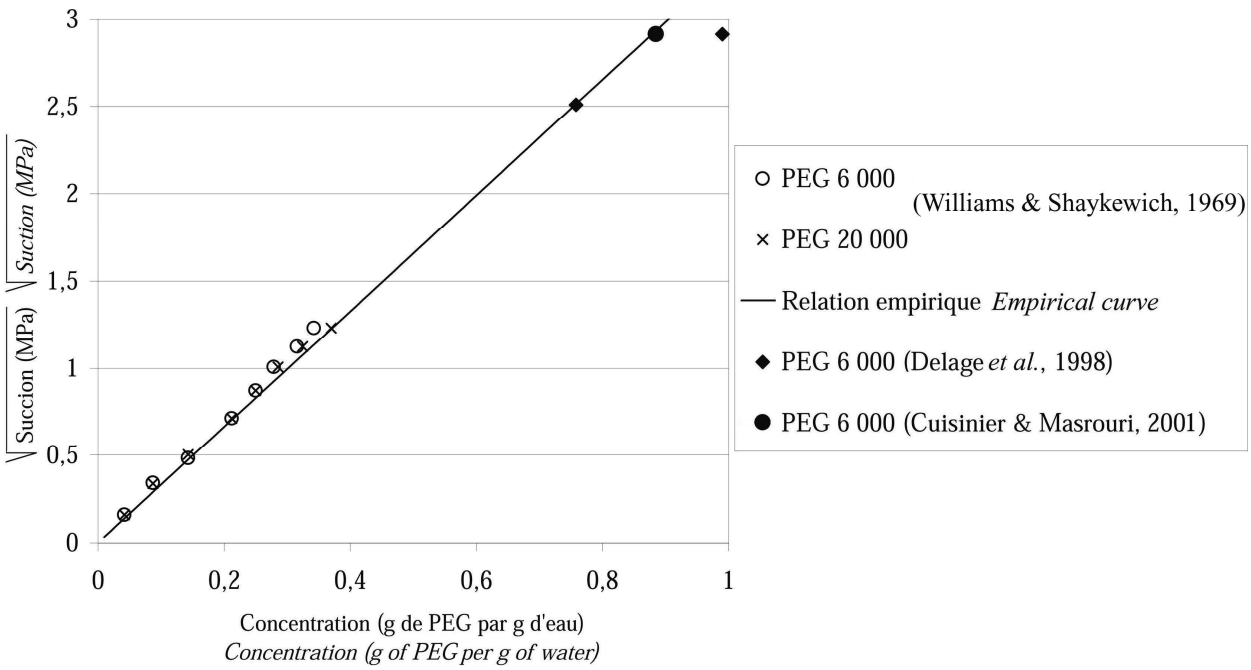

Figure II.3. Courbe d'étalonnage du PEG dans une gamme étendue de succion.

Calibration curve of PEG in an extended range of suctions.

Méthode de contrôle de la succion imposée

La concentration de chaque solution a été vérifiée en déterminant le degré de réfraction de la solution : le Brix. Le degré Brix est mesuré à l'aide d'un réfractomètre à compensation automatique de la température. Cet appareil est constitué d'un prisme sur lequel est disposée une goutte de la solution osmotique à analyser. Le prisme recouvert de solution est ensuite éclairé. Les rayons lumineux sont plus ou moins réfractés par le prisme en fonction de la concentration, le degré de réfraction étant inversement proportionnel à la concentration. Le prisme est monté sur une lunette qui comprend un objectif gradué permettant la mesure du Brix.

Le degré Brix relié à la concentration de la solution par les relations suivantes (Cui, 1993) :

$$c = \frac{\frac{Brix}{90}}{1 - \frac{Brix}{90}} \qquad 2II.14$$

avec :

Brix : degré de réfraction (%) ;

c : concentration de la solution en PEG (g de PEG par g d'eau).

Delage *et al.* (1998) ont donné la relation entre le degré Brix et la concentration de la solution jusqu'à une concentration maximale d'environ 1,5 g de PEG par g d'eau (fig. II.4). Cette figure montre qu'une fois encore le poids moléculaire du PEG utilisé n'influence pas la mesure.

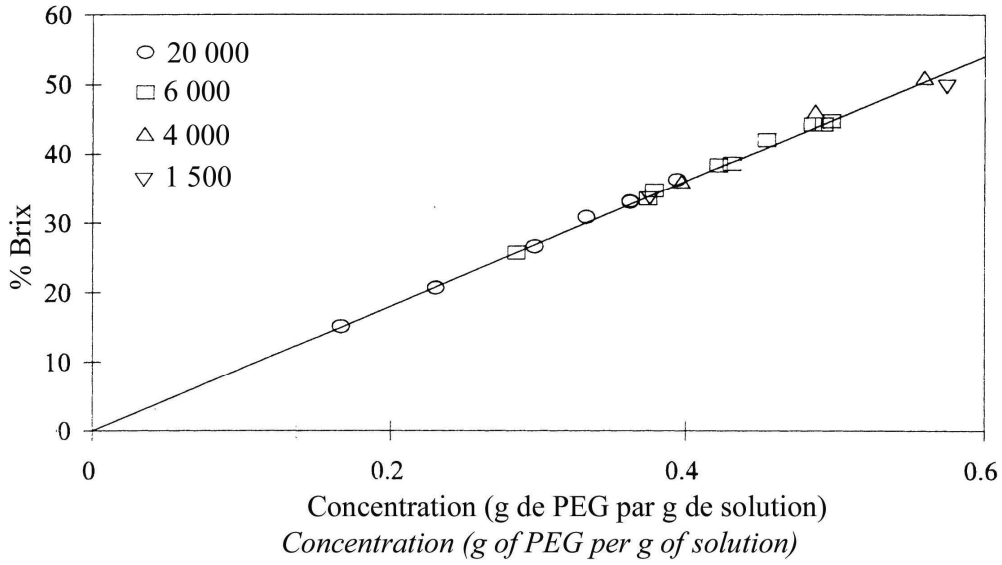

Figure II.4. Relation entre le degré Brix et la concentration de la solution osmotique (Delage *et al.*, 1998).

Relationship between Brix degree and the osmotic solution concentration (Delage* et al.*, 1998).

L'incertitude absolue sur la succion calculée à partir de cette méthode a été déterminée à partir de l'équation II.3, issue des équations II.1 et II.2. L'incertitude absolue sur la valeur lue du degré Brix avec le réfractomètre a été estimée à ± 0,2 %, ce qui correspond à une graduation du réfractomètre. Il apparaît ainsi que l'incertitude relative sur la succion mesurée ne dépasse pas 3 % dans le domaine des succions comprises entre 25 et 8 500 kPa.

$$\Delta s = 11\,c\,\frac{\Delta \mathrm{Brix}/90}{(1-\mathrm{Brix}/90)^2} \qquad 3\mathrm{II}.15$$

avec :

Δs : incertitude relative sur la succion imposée ;

ΔBrix : incertitude absolue sur la valeur de Brix déterminée au réfractomètre.

Description de l'appareil œdométrique osmotique

Le dispositif œdométrique employé pour la réalisation des essais de cette étude s'inspire de la cellule présentée par Kassif & Ben Shalom (1971) et modifiée par Delage *et al.* (1992). Cet appareil correspond en fait à une cellule œdométrique classique, transformée de manière à permettre la circulation de la solution osmotique au niveau de la face inférieure de l'éprouvette (fig. II.5).

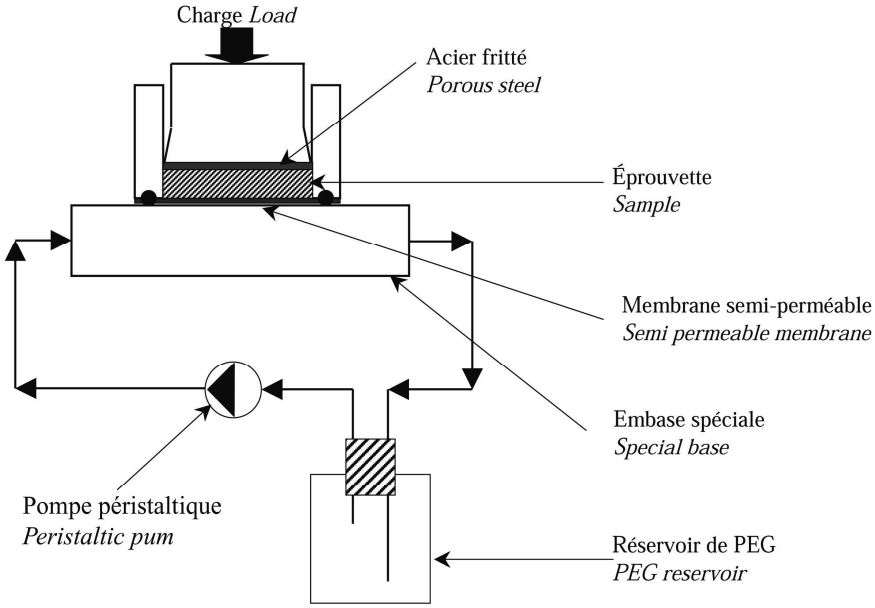

Figure II.5. Schéma de principe du dispositif œdométrique osmotique.

Schematic of the osmotic device.

L'ensemble du système (fig. II.6) comprend les éléments suivants :

- une cellule œdométrique à embase modifiée pour permettre la circulation de la solution ;
- un tamis collé sur l'embase qui permet d'éviter le comblement du système de circulation de l'embase lors du gonflement de l'éprouvette ;
- une membrane semi-perméable ;
- un piston à la base duquel est fixée une plaque poreuse en acier fritté qui permet de maintenir la pression de l'air de l'éprouvette à la pression atmosphérique tout au long de l'essai ;

- un système de pompe et de tuyaux assurant la circulation de la solution osmotique et assurer ainsi un renouvellement constant de celle-ci au niveau de l'éprouvette pendant toute la durée de l'essai ;
- un réservoir de solution osmotique de volume 1 L, ce qui est suffisamment important pour que les échanges d'eau entre la solution et l'éprouvette ne fassent pas varier significativement au cours de l'essai la concentration de la solution et donc, la succion imposée (Guiras-Skandaji, 1996),.

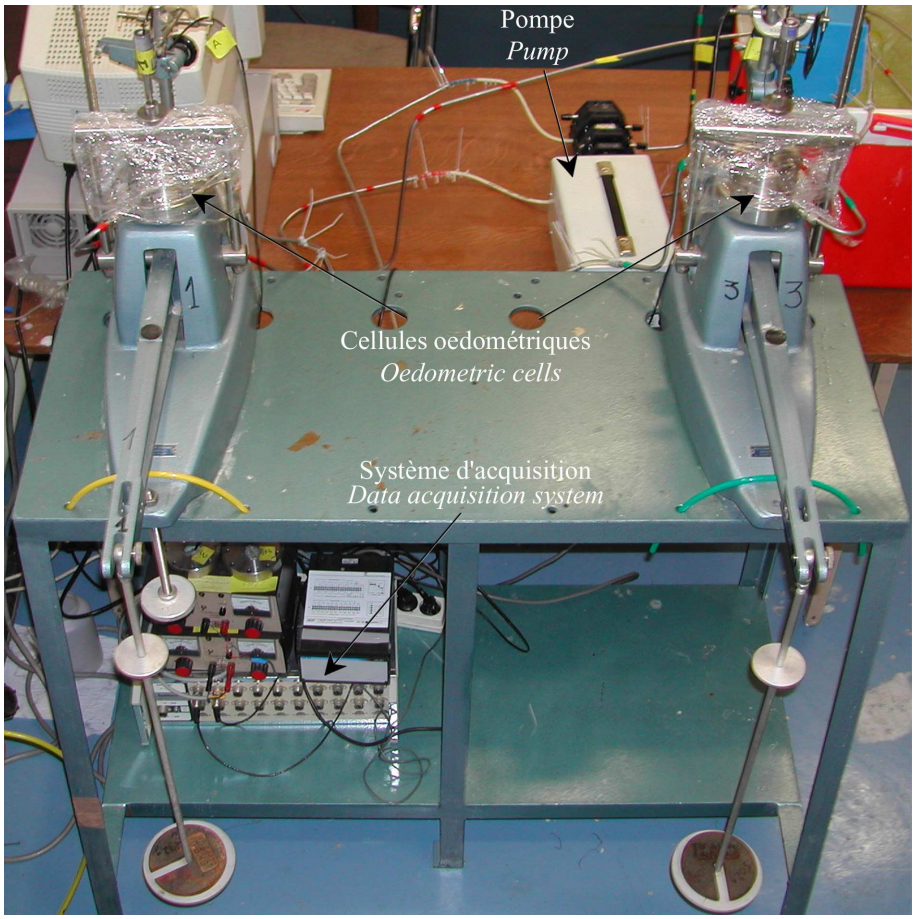

Figure II.6. Œdomètres osmotiques en cours d'essai.

Osmotic oedometer during a test.

Le diamètre de l'éprouvette est de 7 cm.

La cellule œdométrique modifiée est disposée sur un bâti œdométrique classique. Le chargement mécanique s'effectue par paliers successifs. La modification de la succion imposée est possible en changeant le réservoir auquel est connecté le circuit osmotique. L'ensemble du dispositif a été placé dans une salle climatisée à 20 ± 1,5°C, les réservoirs de solution osmotique étant eux-mêmes introduits dans un bain d'eau maintenu à une température de 20 ± 0,1°C. L'humidité relative de la salle d'expérience est comprise entre 60 et 70 %.

La macromolécule utilisée est le polyéthylène glycol (PEG), avec deux poids moléculaires : 20 000 ou 6 000 Da. Deux types de membrane semi-perméable ont été nécessaires à la réalisation des essais. Pour le PEG 20 000 une membrane en triacétate de cellulose de référence commerciale Spectra/Por® n° 4 avec un MWCO de 12 000 Da a été utilisée, et pour le PEG 6 000 une membrane Spectra/Por® n°3 de même composition mais avec un MWCO de 3 500 Da.

Les membranes semi-perméables utilisées peuvent être dégradées par les bactéries naturellement présentes dans le sol. Afin de limiter leur action et de prolonger la durée de vie de la membrane, quelques gouttes de pénicilline ont été ajoutées dans chaque solution élaborée. Dans la même optique, l'eau utilisée pour préparer les éprouvettes était aussi traitée par antibiotique. Cette méthode a permis la réalisation d'essais d'une durée de deux mois et demi sans constater de dégradation de la membrane.

Les solutions osmotiques sont préparées à partir d'eau distillée. Il est indispensable de laisser s'écouler environ deux jours entre la préparation et l'utilisation d'une solution ; ce délai permet en effet la stabilisation de la densité de la solution (Cui, 1993).

La pompe employée est une pompe péristaltique qui présente l'avantage de ne pas mettre directement en contact les pièces de la pompe et la solution. Cependant, ces pompes fonctionnent par écrasement d'un tuyau dont la durée de vie dépend pour beaucoup de la viscosité de la solution ; plus celle-ci est visqueuse, plus la durée de vie est courte. Afin d'augmenter la durée de vie du tuyau, des tuyaux en Norprène Pharmed® ont été employés, et la vitesse de circulation du fluide a été réduite au minimum. Avec ce type de tuyau, aucun signe de fatigue n'est visible au bout de 2 mois et demi d'essai, hormis un léger écrasement.

Les réservoirs de solution osmotique sont reliés à des capillaires gradués qui permettent l'estimation du volume d'eau échangé entre l'éprouvette et la solution osmotique au cours d'un essai. Cette mesure peut cependant être perturbée par l'évaporation qui peut avoir lieu au niveau des différentes parties du système de circulation. Pour limiter l'évaporation, les cellules œdométriques ont été entourées de papier cellophane, et le couvercle du piston rempli de solution osmotique, ce qui permet de maintenir une humidité relative importante au niveau de l'éprouvette. La mesure de volume peut aussi être affectée par une variation de la forme des tuyaux utilisés au fil d'un essai, phénomène qui a été limité grâce au recours à des tuyaux métalliques lorsque cela était possible. Afin d'évaluer l'évaporation résiduelle, Guiras-Skandaji (1996) a proposé l'utilisation d'un système de circulation étalon, identique au circuit réel mais ne comprenant pas de cellule œdométrique, les variations de

volume étant alors uniquement dues à l'évaporation à travers les différents raccords. L'efficacité de ce système de mesure des volumes d'eau a été testée (cf. chapitre III).

Les déplacements verticaux sont mesurés à l'aide d'un capteur de déplacement de type LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) relié à une centrale d'acquisition et un ordinateur. L'ensemble de la chaîne de mesure a été étalonné tous les 6 mois environ. Les capteurs de déplacements utilisés permettent d'avoir une précision sur les variations de l'indice de l'ordre de ± 0,5 %. Les déformations verticales ont été corrigées en prenant en compte les déformations du système "bâti cellule capteur" qui ont été évaluées en utilisant une cale en acier pouvant être considérée comme indéformable, la membrane semi-perméable étant en place.

Le détail du mode opératoire utilisé pour lancer chaque essai est donné dans l'annexe I.

Œdomètre à solutions salines

L'imposition d'une certaine humidité relative à une éprouvette de sol au moyen d'une solution saline permet de contrôler la succion de ce sol. Cependant, cette méthode requiert un certain nombre de précautions qui seront exposées dans le premier point de cette partie. Ensuite, les appareils œdométriques développés pour cette étude et employant cette méthode seront présentés. La dernière partie sera consacrée à la validation des dispositifs expérimentaux construits.

Quelques considérations sur la méthode des solutions salines

L'objet de ce point est d'exposer les limites de la méthode des solutions salines. Seront abordées, l'influence du type de solution, celle de la pression, de même que l'incertitude sur la succion imposée et le rôle des variations de température.

Variantes possibles

Il existe deux variantes de la méthode des solutions salines, l'une utilisant des solutions salines saturées et l'autre des solutions salines partiellement saturées. Dans le premier cas, différents sels sont utilisés, la nature du sel employé contrôle l'humidité relative. Dans l'autre cas, un seul sel est utilisé, sa concentration imposant l'humidité relative.

Cette dernière méthode présente cependant un inconvénient : la concentration de la solution peut évoluer au cours d'un essai. En effet, des échanges d'eau ont lieu entre la solution et l'éprouvette, ce qui entraîne soit une baisse, soit une augmentation de la concentration de la solution, donc une modification de l'humidité relative imposée, et finalement de la succion imposée. Cette méthode exige donc une grande précision sur la concentration de la solution. De plus, il est alors indispensable de vérifier la concentration de la solution au cours de l'essai, ou à défaut, en fin d'essai, afin de s'assurer que les échanges d'eau n'ont pas provoqué une variation significative de la concentration. Or, les solutions salines saturées ne présentent pas cet inconvénient. De fait, les volumes d'eau échangés n'ont pas d'effet sur la concentration de la solution si une quantité suffisante de sel en excès est introduite dans le récipient : la solution reste saturée tout au long de l'essai.

Pour cette dernière raison ainsi que pour leur facilité de préparation, les solutions salines saturées ont été sélectionnées et la suite ne développera que les recommandations à propos de leur utilisation.

Connaissance de l'humidité relative imposée par un sel donné

La valeur de l'humidité relative imposée par un sel est disponible dans différentes sources bibliographiques (Lide, 2002 ; AFNOR NF X 15-119, 1999 ; ISO 483, 1999). Ces valeurs sont données avec des incertitudes variables, généralement comprises entre 0,5 et 1 %. Cependant, la valeur d'humidité relative pour un sel donné peut varier de manière importante suivant la source employée. Ainsi, Delage *et al.* (1998) ont comparé les valeurs d'humidité relative fournies par différentes sources. Leur étude montre que pour la majorité des sels la différence est comprise entre 1 et 2 %, mais qu'elle atteint 3 % dans le cas $Na_2Cr_2O_7$. Considérant ces différences, il est finalement raisonnable de postuler que l'incertitude sur l'humidité relative imposée par un sel est comprise entre 1 et 2 % si le $Na_2Cr_2O_7$ est éliminé de la liste des sels potentiellement utilisables.

Afin d'étudier la pertinence de cette méthode pour l'imposition de la succion, les incertitudes engendrées sur la succion par cette mauvaise connaissance de la valeur de l'humidité relative ont été évaluées en utilisant la loi de Kelvin (équation I.3). L'incertitude absolue sur la succion est donnée par la relation suivante :

$$\Delta s = -\gamma_w \frac{R\,T}{M\,g} \frac{\Delta Hr}{Hr} \qquad 4II.16$$

avec :

Δs : incertitude absolue sur la succion (MPa);

ΔHr : incertitude absolue sur l'humidité relative (%) ;

Hr : humidité relative (%).

L'incertitude relative sur la succion imposée a été calculée en prenant deux valeurs d'incertitude absolue sur l'humidité relative : 1 et 2 %. Les résultats sont reportés sur la figure II.7. Cette figure permet de démontrer que l'incertitude sur la connaissance de l'humidité relative imposée par une solution saline est significative pour les succions inférieures à environ 40 MPa, ce qui correspond à une humidité relative d'environ 75 %. Afin de préciser ces résultats, la figure II.9 a été réalisée. Il semble ainsi qu'au-dessous d'une succion de 8 à 10 MPa, pour laquelle l'incertitude relative est très forte, la méthode des solutions salines semble inadaptée.

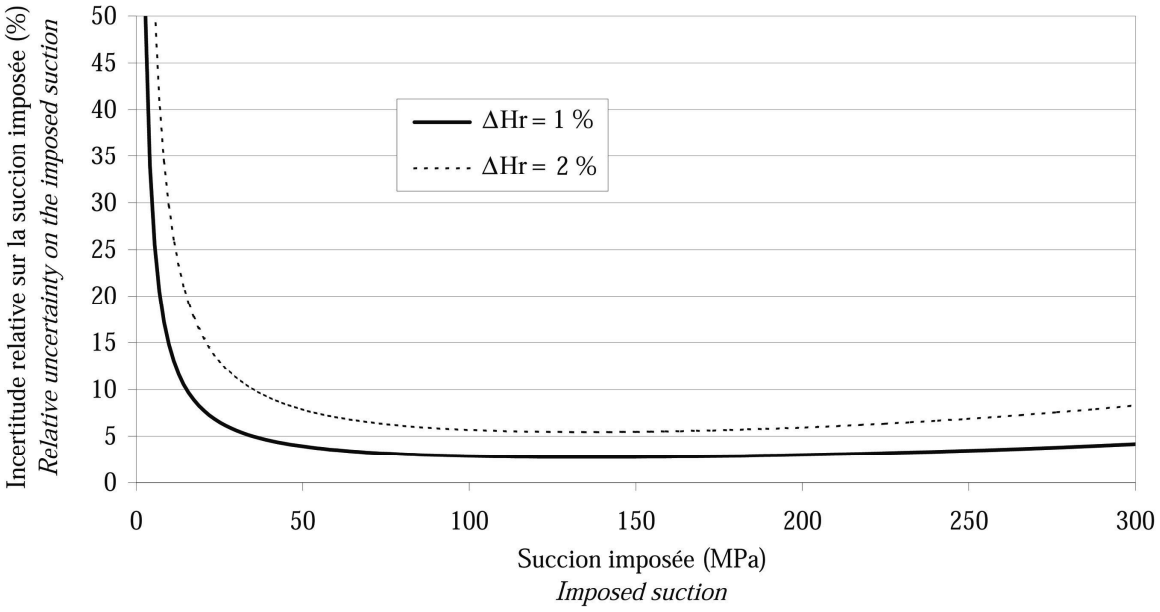

Figure II.7. Incertitude relative sur la succion imposée en fonction de la succion imposée.

Relative uncertainty on the imposed suction as a function of the imposed suction.

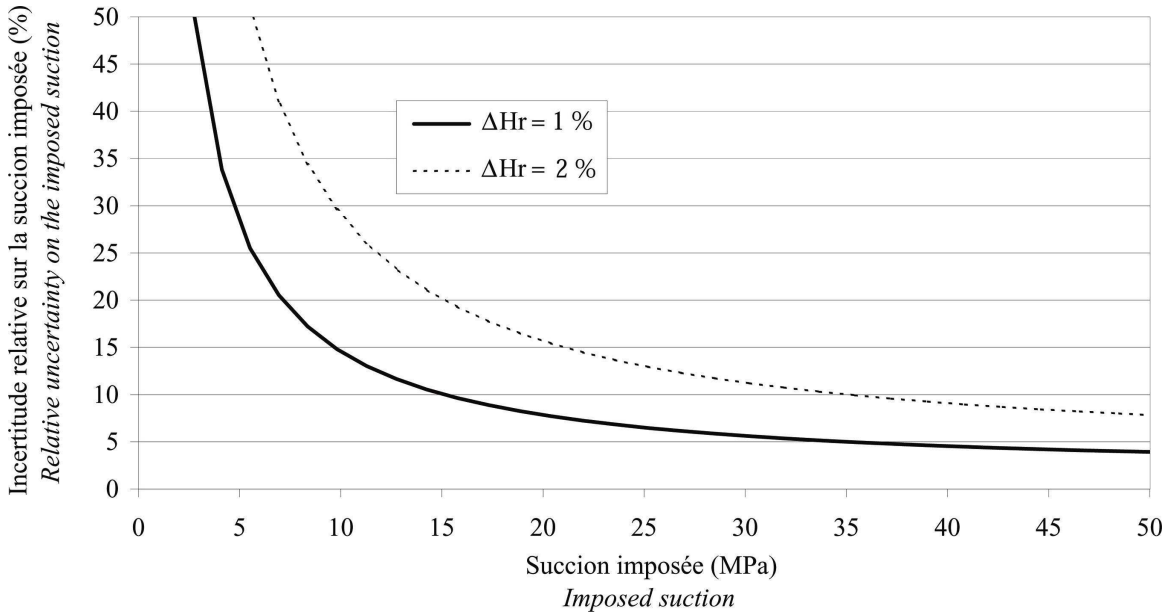

Figure II.8. Incertitude relative sur la succion imposée en fonction de la succion imposée (détail).

Relative uncertainty on the imposed suction as a function of the imposed suction (detail).

L'une des méthodes possibles pour réduire ces incertitudes est le recours à un capteur d'humidité relative. Cependant, la réduction significative de l'incertitude sur la succion imposée nécessiterait des capteurs d'une précision d'au moins 0,5 %, et ce pour les humidités relatives les plus fortes, au-dessus de 90 %. L'humidité relative reste toutefois un paramètre extrêmement difficile à mesurer, surtout dans la gamme des humidités relatives supérieures à 90 % où la mesure se heurte au phénomène de condensation. Parmi tous les capteurs existants les hygromètres à miroir sont les plus performants (Vivarat-Perrin, 1998) et cependant, entre 0 et 90 % l'incertitude absolue sur l'humidité relative est de l'ordre de 1 % mais elle passe à 2 % entre 90 et 100 % d'humidité relative. Les capteurs type capacitif à polymère ont des précisions moins bonnes, de l'ordre d'au maximum 2 % sur l'ensemble de la gamme de succion.

Considérant ces résultats, il a semblé préférable de limiter l'utilisation des solutions salines aux succions supérieures à environ 8 à 10 MPa, ce qui correspond à une humidité relative de 94 %.

Influence de la pression

L'humidité relative est le rapport entre deux pressions, la pression de vapeur saturante p_0, dans des conditions de pression et de température données, et la pression partielle de vapeur p, dans ces mêmes conditions de température et de pression. Si l'on imagine une enceinte dans laquelle la solution

saline destinée à imposer la succion est suffisamment distante de l'éprouvette pour que les conditions de température et de pression soient légèrement différentes entre la solution et l'éprouvette, deux cas sont possibles. Les propriétés de l'endroit où se situe la solution seront notées 1, celles régnant aux abords de l'éprouvette 2.

Le premier cas est celui où la pression de vapeur saturante est égale en tous points de l'enceinte, mais où les conditions sont telles que la pression partielle de vapeur d'eau est légèrement différente entre l'éprouvette et la solution saline, ce qui signifie que $p_0(1) = p_0(2)$ mais $p_1 \neq p_2$. L'humidité relative HR_2 au contact de l'éprouvette est donnée par :

$$HR_2 = HR_1 \frac{p_2}{p_1} \qquad 5II.17$$

avec :

HR_1 : humidité relative au contact de la solution saline ;

HR_2 : humidité relative au contact de l'éprouvette ;

p_1 : pression partielle de vapeur d'eau au niveau de la solution saline ;

p_2 : pression partielle de vapeur d'eau au niveau de l'éprouvette.

Le second cas est celui où la pression de vapeur saturante diffère légèrement entre la solution saline et l'éprouvette mais la pression partielle d'eau est identique en tous points du système. Cela signifie que $p_0(1) \neq p_0(2)$ et $p_1 = p_2$. L'humidité relative au contact de l'éprouvette est donnée par :

$$HR_2 = HR_1 \frac{p_0(1)}{p_0(2)} \qquad 6II.18$$

avec :

$p_0(1)$: pression de vapeur d'eau saturante au niveau de la solution saline ;

$p_0(2)$: pression de vapeur d'eau saturante au niveau de l'éprouvette.

Il est donc indispensable que les conditions de température et de pression soient homogènes dans l'ensemble d'un dispositif expérimental pour que la succion imposée à l'éprouvette soit identique à celle théoriquement appliquée par la solution saline.

Rôle de la température

Les valeurs d'incertitudes citées précédemment ne sont valables que si la température est maintenue à une valeur constante ± 0,1°C. Toute variation de température au-delà de cette gamme

augmentera l'incertitude relative sur la succion imposée. La température influence aussi directement la valeur de l'humidité relative imposée par un sel donné. À partir des données bibliographiques issues de la norme AFNOR NF X 15-119 (1999), la relation entre la succion et la température a été calculée pour différents sels. Les résultats sont reportés sur la figure II.9.

Cette figure montre que quel que soit le sel, la succion imposée augmente avec la température, la situation étant cependant très dépendante du sel considéré. Par exemple, pour imposer une succion de 300 MPa environ, deux sels sont possibles : le KOH et le LiCl. Lorsque la température augmente de 15 à 25°C, dans le cas du KOH, la succion imposée croît de 306 à 347 MPa alors que dans la cas du LiCl elle n'augmente que de 281 à 292 MPa. L'emploi du LiCl semble donc recommandé pour imposer une succion de 300 MPa environ.

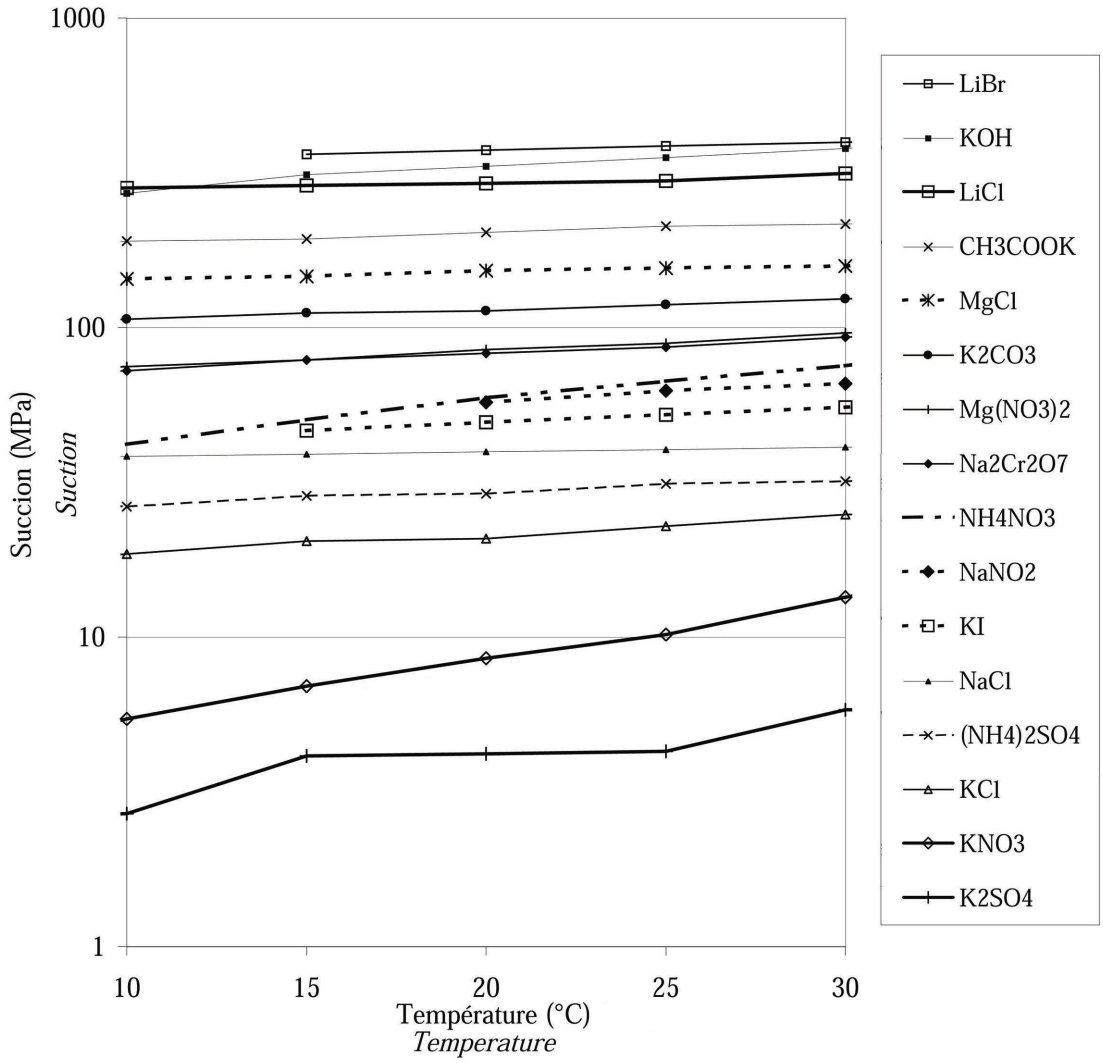

Figure II.9. Succion imposée par un sel donné en fonction de la température.

Imposed suction by a given salt as a function of temperature.

Le tableau II.1 donne un exemple de variation d'humidité relative imposée en fonction de la différence de température entre la solution saline et l'air au-dessus de la solution lorsque la température visée est de 20°C. Ce tableau montre que l'homogénéité des conditions de température est primordiale pour imposer une humidité relative constante et connue avec suffisamment de précision.

Tableau II.1. Humidité relative et succion imposée en fonction de la différence de température entre la solution saline et l'air de l'enceinte lorsque la température de la solution saline est de 20°C.

Relative humidity and imposed suction as a function of the temperature difference between the salt solution and the air of the chamber when the temperature of the salt solution is 20 °C.

Différence de température entre la solution saline et l'air au-dessus de la solution (°C)	Humidité relative de l'enceinte[a] (%)	Succion imposée (MPa)[b]
0,3	76,9	35,4
0,2	76,4	36,4
0,1	76,0	37,1
0	75,5	38
-0,1	75,0	38,9
-0,2	74,6	39,6
-0,3	74,1	40,6

a: données issues de la norme AFNOR NF X 15-119.

b : les succions ont été calculées en utilisant l'équation I.2.

Ces trois points montrent que des fluctuations incontrôlées de température produisent des variations de succion tout en augmentant l'incertitude relative sur la succion imposée. L'utilisation de cette technique d'imposition de la succion requiert donc une température très stable avec une fluctuation maximale la plus proche possible de ± 0,1°C.

Conclusion : choix des sels à utiliser pour l'imposition de la succion et recommandations

Afin de limiter l'influence de la température, les sels les moins sensibles à la température ont été sélectionnés en utilisant la figure II.9. Cependant, malgré leur meilleure stabilité, certains sels n'ont pu être retenus en raison d'une trop grande toxicité.

Les sels retenus sont donnés dans le tableau II.2. Ils permettent d'imposer la succion entre 8,5 et 287,9 MPa. L'humidité relative imposée par le sel KNO_3 se situe à la limite du domaine d'utilisation défini ci-dessus. Ce sont donc pendant les essais utilisant ce sel qu'il sera nécessaire de prendre les précautions les plus importantes pour le maintien de la température.

Tableau II.2. Caractéristiques des sels sélectionnés.

Selected salts characteristics.

Sel	Solubilité[a,c] (g de sel par litre d'eau)	Humidité relative[a,b] (%)	Succion imposée[a] (MPa)
LiCl, x H_2O	827	12	287,9
$MgCl_2$, 6 H_2O	567	33	150,6
$Mg(NO_3)_2$, 6 H_2O	689	54	83,6
NaCl	360	75	38,9
KCl	341	86	20,5
KNO_3	320	94	8,5

a : les valeurs de ce tableau sont données pour une température de 20 ± 0,1°C ;

b : norme ISO 483 ;

c : Lide (2002), pp. 8.108 – 8.116.

Les points précédents permettent de proposer quelques recommandations sur l'emploi des solutions salines pour imposer la succion :

- utilisation de la méthode des solutions salines saturées ;
- limitation des fluctuations de température ;
- restriction de l'emploi de cette méthode aux humidités relatives supérieures à au moins 94 % ;
- sélection des sels dont l'humidité relative imposée est la moins sensible aux fluctuations de la température.

Description des œdomètres à solutions salines conçus

Un certain nombre d'appareils utilisant cette méthode ont été présentés dans la bibliographie (cf. I.2.4). Le choix d'un appareil sans système de circulation de l'air a été fait en considérant les

limitations de la méthode des solutions salines saturées. En effet, le système de circulation utilisé dans certains appareils complique l'imposition d'une température constante, en raison notamment de l'échauffement produit par le moteur d'un ventilateur. De plus, un système de circulation permanente génère des pics de pression incompatibles avec la nécessité d'avoir des conditions de température et de pression identiques au contact de la solution saline et au niveau de l'éprouvette.

Le principe de l'appareil développé est d'enfermer un dispositif œdométrique dans une enceinte close où l'humidité relative est maintenue constante par une solution saline. La réalisation d'une telle enceinte est décrite dans la norme ISO 483 (1999), qui a servi de base pour définir le volume et la forme générale du dispositif. La hauteur de l'enceinte conçue est de 25 cm, son diamètre de 15 cm, ce qui donne un volume interne d'environ 4,4 L. Le volume de la solution saline introduite est de 1 L. Le schéma de principe des œdomètres conçus est donné sur la figure II.10.

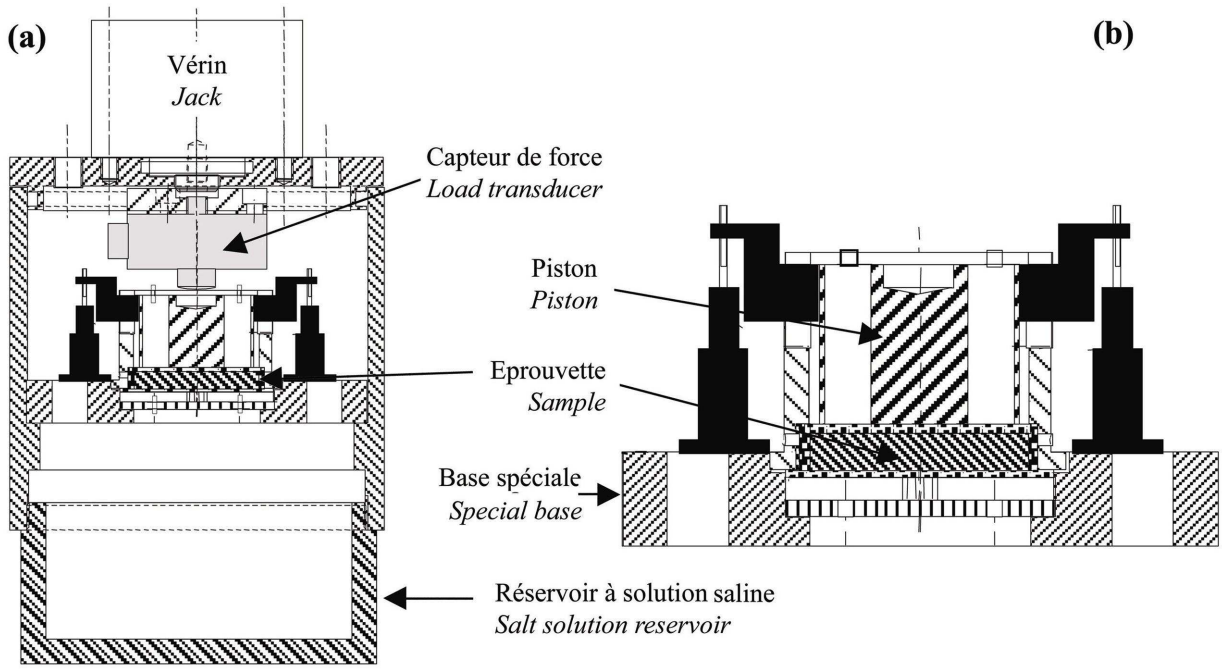

Figure II.10. Schéma d'un œdomètre à solutions salines : (a) vue générale ; (b) détail de l'emplacement de l'éprouvette.

Schematic of a salt solutions oedometer: (a) general view; (b) detail of the sample position.

Deux types d'appareils avec chacun une pression verticale maximale différente, 1,2 et 20 MPa, ont été conçus, et deux cellules œdométriques de chaque type ont été fabriquées. Dans le cas où la pression maximale est de 1,2 MPa, on parlera par la suite dans un cas d'œdomètre basses pressions et dans l'autre d'œdomètre hautes pressions.

Une vue générale de l'ensemble du dispositif expérimental à basses pressions est donnée sur la figure II.11. L'ensemble du dispositif expérimental comprend pour chaque appareil :

- un générateur/régulateur de pression pour imposer la pression verticale exercée sur l'éprouvette. Deux types sont employés : à air, ce qui permet l'imposition d'une pression de 1,2 MPa et à huile qui autorisent une pression maximale de 20 MPa ;
- un capteur de force ;
- deux capteurs de déplacements type LVDT ;
- une sonde de température dans la partie supérieure de l'enceinte ainsi qu'une sonde externe ;
- un réservoir amovible contenant la solution saline.

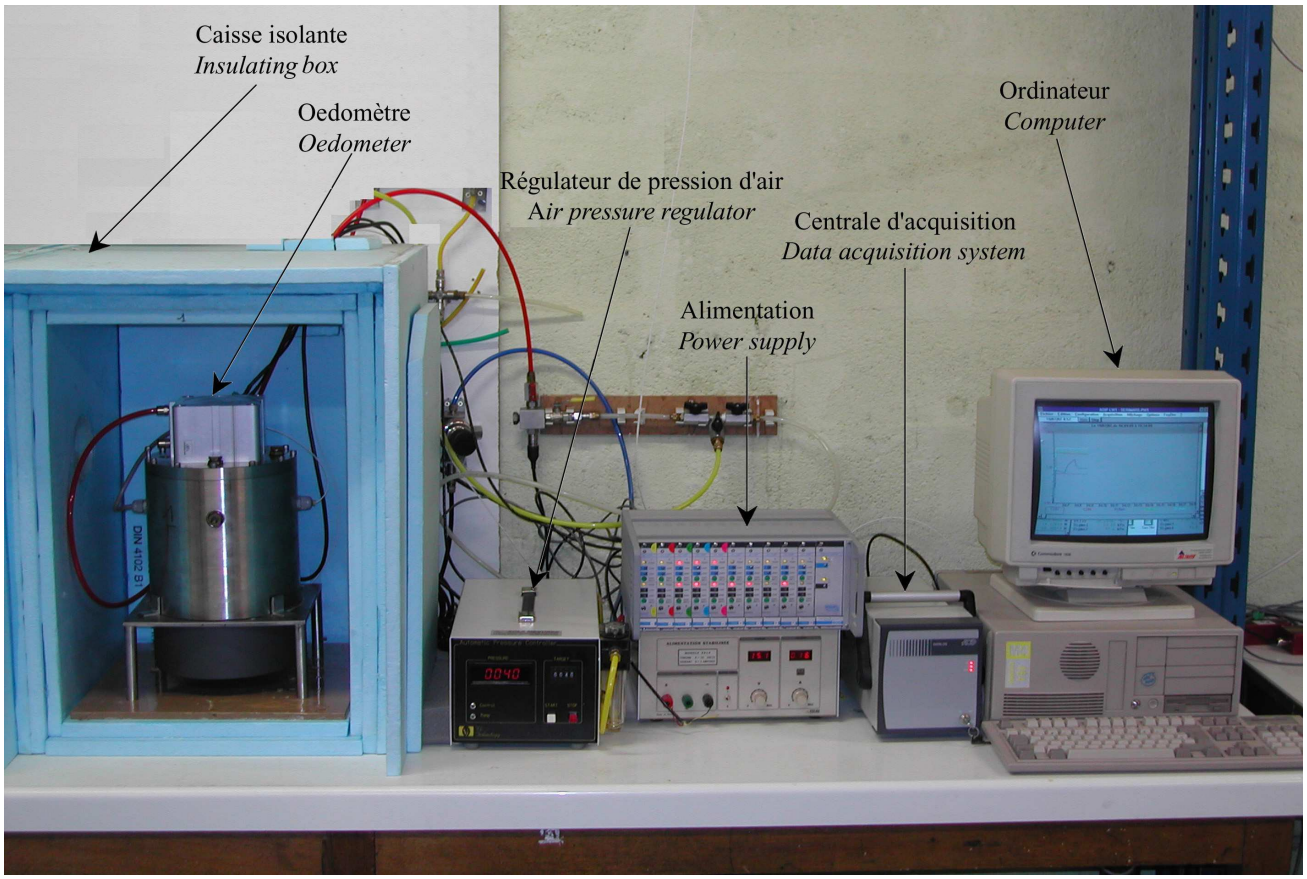

Figure II.11. Vue de l'ensemble du dispositif expérimental basses pressions.

General view of the whole low pressures device.

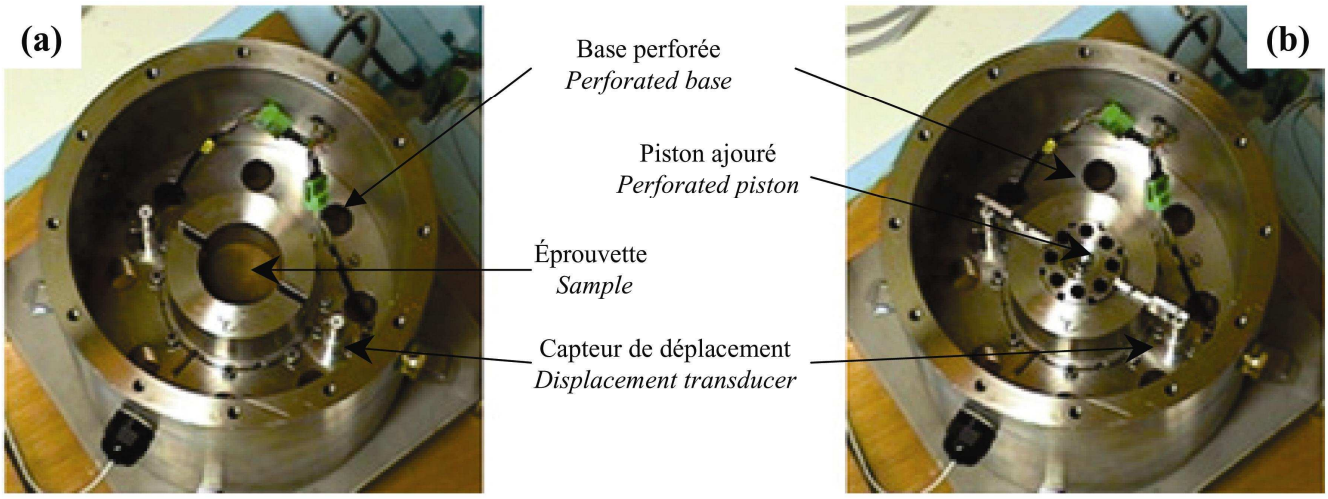

Figure II.12. Détails de l'intérieur d'une œdomètre à solutions salines : (a) avec éprouvette ; (b) piston en place.

Details of the salt solution device: (a) sample; (b) with the piston.

Le diamètre des éprouvettes est de 7,4 cm dans le cas des appareils basses pressions et de 5 cm dans les œdomètres hautes pressions.

Il est nécessaire de faciliter le passage de l'air entre l'éprouvette et l'air à proximité immédiate de la solution saline afin de ne pas influencer le temps d'équilibre. Pour cela, des orifices ont été ménagés dans la base qui supporte l'éprouvette ainsi que dans le piston. De plus, des plaques en acier fritté ont été utilisées en lieu et place des pierres poreuses classiquement employées dans les appareils œdométriques. Ces modifications sont visibles sur la figure II.12.

Les dispositifs ont été placés dans une salle climatisée, la température de la salle étant maintenue à 20 ± 1,5 °C. Cette régulation a été améliorée en plaçant chaque cellule œdométrique dans une boîte en polystyrène extrudé d'environ 8 cm d'épaisseur qui constitue en fait un système d'isolation. Avec ce système, la température des enceintes peut être régulées à 20 ± 0,15 °C sur de très longues périodes (plusieurs mois). L'humidité relative de la salle est comprise entre 60 et 70 %.

Il a été choisi de ne pas utiliser de capteur d'humidité relative placé à l'intérieur de l'enceinte pour détecter l'équilibre entre la solution saline et l'éprouvette a été fait. Pour que la mesure soit la plus pertinente possible, il faudrait un capteur situé au plus près de l'éprouvette et doté d'une précision optimale. Bien que les hygromètres à miroir soient les plus précis il n'est malheureusement pas possible de l'utiliser, en raison de leur encombrement et de la maintenance régulière du miroir incompatibles avec l'exigence de réaliser des mesures pendant plusieurs mois sans ouverture de l'œdomètre. Les capteurs de type capacitif sont plus souples d'utilisation mais Dueck *et al*. (2001) ont

montré qu'ils produisaient un échauffement du volume de mesure, ce qui est incompatible avec l'exigence sur la stabilité de la température déjà évoquée.

Les générateurs de pression imposent la pression à l'éprouvette en faisant circuler un fluide à un débit constant. Il est nécessaire d'insérer une vanne de fuite dans ce circuit de manière à limiter l'influence de variations de température même si celles-ci sont limitées par le système de climatisation. Au cours d'un essai, le chargement mécanique se fait par paliers successifs en augmentant la pression d'air ou d'huile imposée par le système de régulation. Le bac à solution saline est amovible, ce qui permet de modifier la succion imposée au cours d'un essai. Le mode opératoire détaillé suivi pour réaliser chaque essai est donné dans l'annexe II.

Les paliers mécaniques imposés ne sont pas identiques pour tous les essais qui seront présentés par la suite. En effet, les frottements qui s'exercent au niveau du chapeau de la cellule œdométrique entre le vérin et le piston sont différents pour chaque cellule, ce qui implique des différences au niveau de la pression effectivement appliquée sur l'éprouvette.

Les capteurs de déplacements utilisés dans les deux types d'œdomètre offrent une précision sur les variations de l'indice des vides de l'ordre de 0,5 %. Dans les appareils basses pressions, l'incertitude sur la pression verticale imposée est de l'ordre de ± 10 kPa. Pour les appareils hautes pressions, l'incertitude sur la pression verticale imposée est de ± 5 %. Les capteurs ont été étalonnés tous les 6 mois environ. Les déformations verticales ont été corrigées en prenant en compte les déformations du système "bâti cellule capteur", évaluées en utilisant une cale en acier qui pouvait être considérée comme indéformable.

AUTRES TECHNIQUES UTILISÉES

L'étude qui sera présentée dans le chapitre suivant a nécessité la réalisation d'un certain nombre d'essais supplémentaires, essentiellement dans le but de déterminer la courbe de rétention du matériau et la relation entre les paramètres du compactage, la succion et les propriétés de gonflement. L'ensemble des dispositifs employés est présenté dans cette partie. La technique de préparation des échantillons destinées à l'observation microscopique de la structure interne du matériau constitue le dernier point de cette partie.

Imposition de la succion

Les techniques d'imposition de la succion ont été employées pour déterminer la courbe de rétention du matériau. Pour les solutions salines, des dessiccateurs ont été utilisés avec les mêmes solutions salines que dans le cadre des essais hydromécaniques.

Afin de compléter la courbe de rétention dans la gamme des succions inférieures à 8,5 MPa, la méthode osmotique a été employée. Les éprouvettes sont introduites dans la membrane semi-perméable qui se présente sous la forme d'un tube, puis plongées dans la solution osmotique. La solution n'a pas été agitée en permanence par un agitateur magnétique qui aurait produit un échauffement significatif de la solution. Simplement, une agitation mécanique a été appliquée chaque jour.

Mesure de succion

Quelques mesures au papier filtre ont été réalisées. La procédure de détermination des composantes de la succion d'un sol par cette méthode est exposée dans la norme ASTM D 5298 – 94 (1995). Elle consiste à disposer au contact d'une éprouvette un papier filtre et à placer l'ensemble dans une enceinte close. Dans cette enceinte est introduit un autre papier qui n'est pas en contact avec l'éprouvette. Une fois l'équilibre atteint, la teneur en eau de chaque papier est déterminée. La succion correspondant à cette teneur en eau, évaluée en utilisant la courbe d'étalonnage du papier, est égale à celle du sol. Dans le cas où le papier filtre est en contact avec le sol, on mesure la succion matricielle, en revanche, s'il n'y a pas de contact, on détermine alors la succion totale du sol. Le papier filtre utilisé est le papier Whatman n° 42. Ils ont initialement desséchés dans un dessiccateur sous une succion de 287,9 MPa. Les succions ont été calculées à partir de la courbe d'étalonnage de ce papier filtre déterminée par Amraoui (1996).

Préparation des éprouvettes destinées à l'observation microscopique

La réalisation de lames minces a permis l'étude de la structure interne du matériau en fonction de son état hydrique. Ces lames minces réclament une technique spéciale pour leur préparation. Il faut en effet réussir à préparer des coupes de matériau suffisamment fines pour être « transparentes » en microscopie optique, la fabrication de la lame mince devant se faire en modifiant le moins possible la structure interne de l'éprouvette. Ces préparations ont été réalisées au sein l'unité FR633 Eau - sol – terre du CNRS[1]. Des détails sur la technique employée peuvent être trouvés dans Foster & De (1971), et seul le principe général de la préparation sera présenté ici.

[1] Ces expériences ont été réalisées en collaboration avec M. Bartoli, Directeur de Recherche au CNRS, et Mme Villemin, Ingénieur de Recherche au CNRS.

La technique de préparation retenue consiste à faire pénétrer à l'intérieur des éprouvettes en plusieurs étapes une résine époxy très fluide. Une fois polymérisée, cette résine permet de « fixer » la structure interne des éprouvettes en durcissant. Elle autorise la réalisation de lames minces de notre matériau suffisamment fines pour être exploitables en microscopie optique.

L'infiltration de la résine se fait selon les étapes suivantes :

- prélèvement de fragments d'éprouvette qui sont ensuite disposés dans de la gélose liquéfiée par un chauffage préalable. Cette gélose se solidifie en refroidissant, ce qui permet d'éviter les variations de volume du fragment lors des phases de préparation ultérieures ;
- introduction du fragment dans une solution d'acétone diluée avec de l'eau, l'acétone ayant tendance à pénétrer dans le sol maintenue par la gélose. Cette étape est répétée plusieurs fois, la concentration en acétone étant augmentée progressivement jusqu'à obtenir une solution d'acétone pure ;
- introduction des fragments dans une solution d'acétone et de résine époxy (faible concentration de résine). Suivant le même principe que précédemment, la concentration en résine est augmentée progressivement jusqu'à 100 % ;
- polymérisation de la résine par chauffage à l'étuve à 60 °C environ ;
- préparation de lames minces d'une épaisseur de 32 µm d'épaisseur, directement utilisables au microscope optique.

Il est important d'éviter toute exposition des échantillons à l'air au cours de cette préparation afin d'éviter la dessiccation qui produirait un retrait irréversible des échantillons. Avec cette méthode, on peut considérer que la structure interne de l'éprouvette n'est pas perturbée de manière significative lors de la préparation (Kim *et al.*, 1995 ; Elsass *et al.*, 1998).

CONCLUSION

Ce chapitre a été l'occasion de présenter l'ensemble des techniques expérimentales qui seront employées dans la suite du travail. La réflexion conduite a permis de mettre en évidence qu'il était préférable d'utiliser la méthode des solutions salines saturées pour les succions supérieures à 8,5 MPa. En deçà de cette valeur, l'incertitude sur la connaissance de l'humidité relative, les variations de température et de pression ne permettent pas d'imposer une succion donnée avec suffisamment de précision. Le domaine d'utilisation de la méthode osmotique a été augmenté jusqu'à 8,5 MPa grâce à

l'utilisation du PEG 6 000. L'emploi combiné des deux méthodes d'imposition de la succion permet donc d'imposer la succion entre 0 et 300 MPa environ.

De même une technique de préparation des matériaux gonflants pour leur observation au microscope optique a été décrite. Elle présente l'avantage de limiter l'influence du processus de préparation sur la structure interne des éprouvettes.

La validation des dispositifs œdométriques sera présentée au cours du chapitre suivant.

Chapitre III :

Caractérisation des matériaux utilisés et validation des dispositifs œdométriques

INTRODUCTION

L'objectif du travail qui sera présenté au chapitre suivant est d'étudier l'influence d'une série de paramètres sur le comportement d'un matériau gonflant compacté. La conduite d'une telle étude nécessite de disposer pour chacun des essais d'éprouvettes dont les caractéristiques initiales sont les plus proches possible. Dans ce contexte, un soin particulier a été porté à la technique de conception des éprouvettes, ce point sera abordé lors de la première partie de ce chapitre.

Les dispositifs décrits au chapitre précédent ont fait l'objet d'une série de tests de validation. Une attention particulière a été portée au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de la modification de la pression ou de la succion dans chacun des appareils. De plus, les deux techniques expérimentales étant très différentes dans leur principe d'imposition de la succion, des essais supplémentaires ont été conduits pour évaluer la qualité de la continuité entre ces deux méthodes. Ces considérations feront l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

Le comportement mécanique d'un sol gonflant non saturé dépend d'un ensemble de paramètres comme la structure du matériau et ses propriétés hydriques. Afin de faciliter l'interprétation des essais mécaniques à succion contrôlée qui seront présentés par la suite, un grand nombre d'essais additionnels a été entrepris notamment pour caractériser les propriétés de gonflement du matériau de

même que l'influence de la succion sur la structure interne des éprouvettes. Ces points seront développés dans la troisième partie de ce chapitre.

MATÉRIAUX EMPLOYÉS ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Le matériau support de l'étude est un mélange d'un limon de la région de Nancy (limon de Xeuilley) et de bentonite calcique. Ces matériaux ont été choisis car ils ont déjà servi de support à de nombreuses études au sein du laboratoire (Guiras-Skandaji, 1996 ; Tabani, 1999 ; Rolland, 2002).

Paramètres d'identification des matériaux

Les matériaux sont desséchés avant leur emploi par un étuvage à 60-70 °C durant plusieurs jours. Ensuite, le limon de Xeuilley est broyé puis tamisé (< 400µm). La bentonite a été tamisée de manière à retirer les différentes impuretés qu'elle peut contenir (débris de roche, …). Le mélange des deux matériaux dans la proportion massique de 60 % de bentonite et de 40 % de limon est réalisé par malaxage manuel, les deux matériaux étant totalement secs.

L'analyse par diffractométrie X a permis de caractériser la minéralogie de la bentonite et du limon (tab. III.3). La bentonite est composée de smectite dioctaédrique (montmorillonite ou beidellite) à compensation calcique (Rolland, 2002).

Les principales propriétés géotechniques des matériaux ont été déterminées et sont reportées dans le tableau III.4.

Tableau III.3. Caractéristiques minéralogiques des matériaux étudiés.

Mineralogical characteristics of the studied materials.

	Limon de Xeuilley (%)	Bentonite (%)
Quartz	60	5-10
Montmorillonite	20	90
Kaolinite	4 à 5	traces
Feldspath	11	-
Mica	4 à 5	-
Calcite	-	1

Tableau III.4. Caractéristiques géotechniques des matériaux étudiés.

Geotechnical characteristics of the studied materials.

	Limon de Xeuilley	Bentonite	Mélange
Limite de liquidité (%)	42	111	87

Limite de plasticité (%)	37	81	65
Indice de plasticité (%)	5	30	22
Limite de retrait (%)	-	-	14-15
Valeur de bleu (g/100 g)	4,4	24,0	13,1
Densité des grains solides	2,71	2,63	2,67

Courbes de compactage

Les caractéristiques de compactage des différents matériaux ont été déterminées par compactage statique (fig. III.13 et tab. III.5). La pression de compactage est de 1 000 kPa, la vitesse de déplacement de la presse étant fixée à 1,14 mm.mn^{-1}.

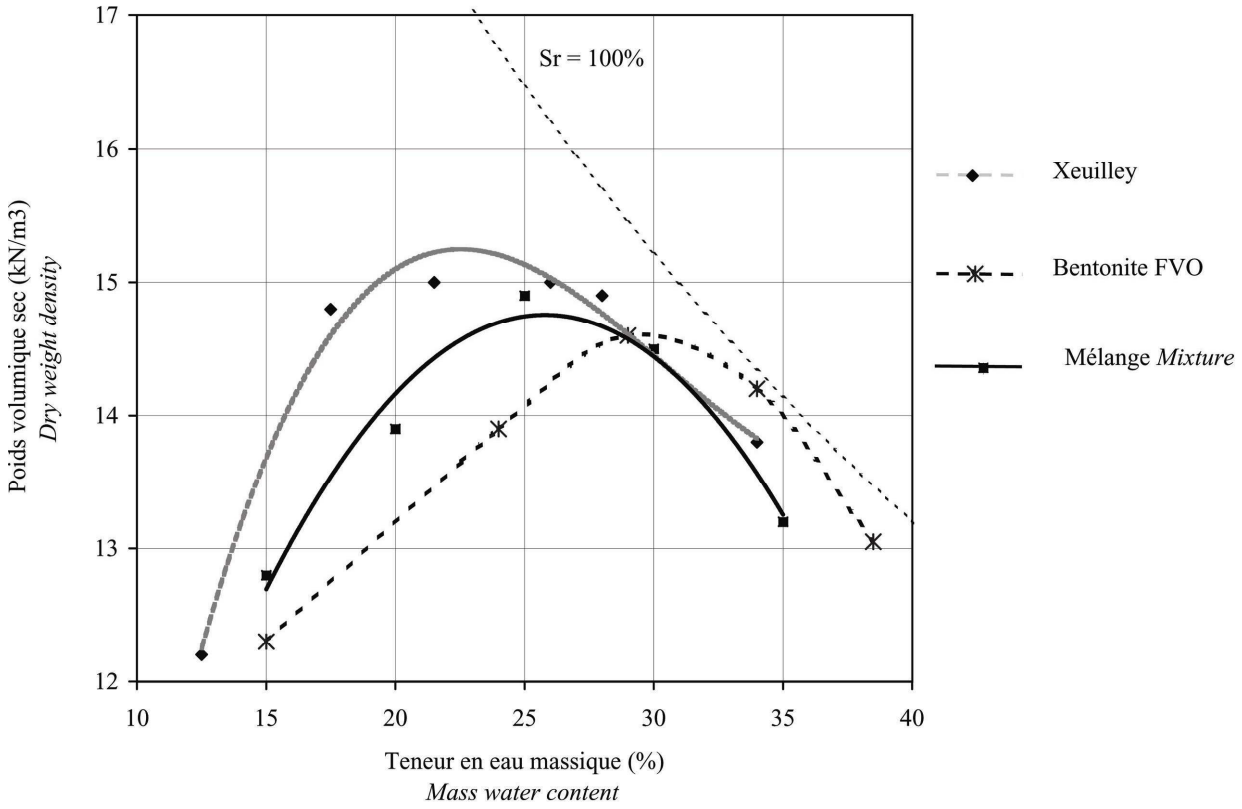

Figure III.13. Courbes de compactage statique des matériaux étudiés.

Static compaction curves of the studied materials.

Tableau III.5. Caractéristiques de compactage des différents matériaux.

Compaction characteristics of the studied materials.

Paramètres à l'optimum	Limon de Xeuilley	Bentonite	Mélange
Teneur en eau (%)	22,5	30,0	26,0
Poids volumique sec (kN.m^{-3})	15,2	14,6	15,2

Méthode de préparation des éprouvettes testées

La préparation de toutes les éprouvettes utilisées par la suite dans les essais hydromécaniques a été réalisée en respectant toujours la même procédure de manière à optimiser la répétabilité entre les éprouvettes produites. Cette procédure a été définie à l'origine par Aboushook (1984), puis reprise par Guiras-Skandaji (1996) et légèrement modifiée dans ce travail pour inclure la phase de mélange de la bentonite et du limon. Elle comprend les étapes suivantes :

1- étuvage des deux matériaux (T = 65 / 70°C) ;
2- broyage du limon de Xeuilley puis tamisage séparé des deux matériaux (< 400 µm) ;
3- mélange manuel dans la proportion massique de 60 % de bentonite et de 40 % de limon ;
4- ajout de la quantité d'eau distillée nécessaire à l'obtention d'une teneur en eau initiale de 15 %[1], le matériau étant malaxé vigoureusement de manière à obtenir un mélange homogène tout en évitant la formation de mottes ;
5- conservation du mélange pendant 10 jours dans des récipients hermétiques placés dans une salle climatisée pour homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau ;
6- passage au tamis de 4 mm pour retirer les agrégats les plus massifs formés lors du mouillage du mélange ;
7- compactage statique[2] directement dans la cellule œdométrique choisie ou dans un moule spécial, les différentes pièces métalliques étant graissées au préalable. Le mode de compactage est similaire à celui retenu pour déterminer les caractéristiques de compactage de chacun des matériaux.

Les éprouvettes fabriquées ont les mêmes caractéristiques initiales, leur diamètre dépend du type d'œdomètre employé. Le poids volumique sec initial visé est de 12,7 $kN.m^{-3}$. Afin de vérifier la répétabilité de la procédure expérimentale, le poids volumique sec et la teneur en eau massique d'une grande partie des éprouvettes produites ont été analysés *a posteriori*. Sur un total de 28 essais, la teneur en eau moyenne est de 15 ± 0,3 % et le poids volumique sec s'établit à 12,7 ± 0,1 $kN.m^{-3}$. Ces observations démontrent la bonne fiabilité de la technique de préparation retenue.

Succion initiale des éprouvettes

La succion initiale des éprouvettes a été mesurée à l'aide de la technique du papier filtre (ASTM D 5298-94, 1995). Une éprouvette de matériau de 2 cm de hauteur a été compactée en deux couches, trois papiers filtre étant insérés entre les deux couches. L'ensemble a ensuite été placé dans un récipient

[1] La teneur en eau initiale des éprouvettes a été choisie proche de la limite de retrait du mélange de manière à réduire la rétraction des éprouvettes lors de l'application de très fortes succions.

[2] Le compactage statique a été retenu car il permet d'obtenir des éprouvettes plus homogènes et une meilleure reproductibilité qu'avec le compactage dynamique (Romero, 1999 ; Tabani, 1999).

hermétique pour une durée de 15 jours. Un autre papier filtre a été introduit dans le récipient sans contact avec le sol de manière à mesurer la succion totale. La succion matricielle initiale des éprouvettes est d'environ 20 ± 2 MPa, la composante osmotique de la succion est de l'ordre de $1,5 \pm 0,5$ MPa.

Remarque

La densité initiale des éprouvettes qui a été retenue, 12,7 $kN.m^{-3}$, est plutôt faible par rapport à la densité des matériaux argileux gonflants lorsqu'ils sont utilisés d'une manière industrielle. L'objectif de ce choix, outre l'intérêt de limiter le retrait lors de la dessiccation, est que les éprouvettes fabriquées ont une structure interne type double structure comme nous le verrons par la suite, et de pouvoir étudier la relation entre ses caractéristiques initiales particulières et l'ensemble des propriétés du matériau qui seront étudiées.

VALIDATION DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX À SUCCION CONTRÔLÉE

Au cours du chapitre précédent, les limitations à l'utilisation de la méthode osmotique et de la technique des solutions salines ont été exposées. Deux types d'œdomètres ont été développés, chacun exploitant une de ces méthodes. La première étape, une fois les propriétés du matériau présentées ci-dessus connues, a été de valider les dispositifs expérimentaux. Ce travail a porté sur la détermination du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'application d'une succion ou d'une pression dans chacun des appareils. De plus, un essai spécifique a été entrepris pour valider le principe d'imposition de la succion par la technique des solutions salines. Les deux types de méthode d'imposition de la succion sont très différents dans leur principe. Deux essais ont été réalisés pour vérifier l'influence de chacune de ces techniques sur le comportement hydromécanique du matériau testé.

Œdomètres osmotiques

La connaissance du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée est un élément déterminant pour décider des chemins de contrainte qu'il est possible de réaliser avec ces appareils. En effet, la durée de vie limitée des membranes osmotiques impose de ne pas dépasser un temps d'essai d'environ deux mois et demi. Ce temps d'équilibre a donc été déterminé en même temps que l'efficacité du système de mesure des échanges d'eau. Ce point sera traité en premier dans cette partie du chapitre. En complément, la question du temps d'équilibre lors de l'application d'une charge donnée est abordée.

L'extension de la gamme de succion accessible avec cet appareil a été réalisée avec du PEG 6 000 alors que la macromolécule classiquement utilisée est le PEG 20 000. Deux essais, présentés dans le second point de cette partie, ont donc été entrepris pour vérifier l'influence éventuelle du poids moléculaire du PEG utilisé.

Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée

Lorsqu'une succion est appliquée à une éprouvette, un certain temps est nécessaire pour que la valeur de la succion à l'intérieur de l'éprouvette s'équilibre avec la succion imposée. Ce temps dépend des propriétés des matériaux testés et de la différence entre la succion initiale de l'éprouvette et la succion imposée. Vicol (1990) signale une durée de palier hydrique de l'ordre de 70 h en utilisant un limon non gonflant compacté. Kassif & Ben Shalom (1971) indiquent une durée de palier hydrique d'une journée seulement sur une argile gonflante alors que Guiras-Skandaji (1996) estime que ce temps est compris entre 8 et 10 jours en travaillant sur une bentonite calcique. Tous ces auteurs ont travaillé avec des œdomètres osmotiques.

Considérant cette grande disparité de valeurs, un essai d'application de la succion a été réalisé afin d'évaluer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre hydrique au sein d'une éprouvette. Pour cela, le volume d'eau échangé ainsi que le gonflement de l'éprouvette ont été enregistrés en fonction du temps. Après sa préparation, l'éprouvette a été soumise en une seule étape à une succion de 1,2 MPa, la solution osmotique ayant été préparée avec du PEG 6 000. Les résultats sont donnés en fonction du temps écoulé depuis l'application de la succion (fig. III.14). Le volume d'eau échangé a été corrigé en retirant le volume d'eau évaporé estimé à partir du circuit étalon.

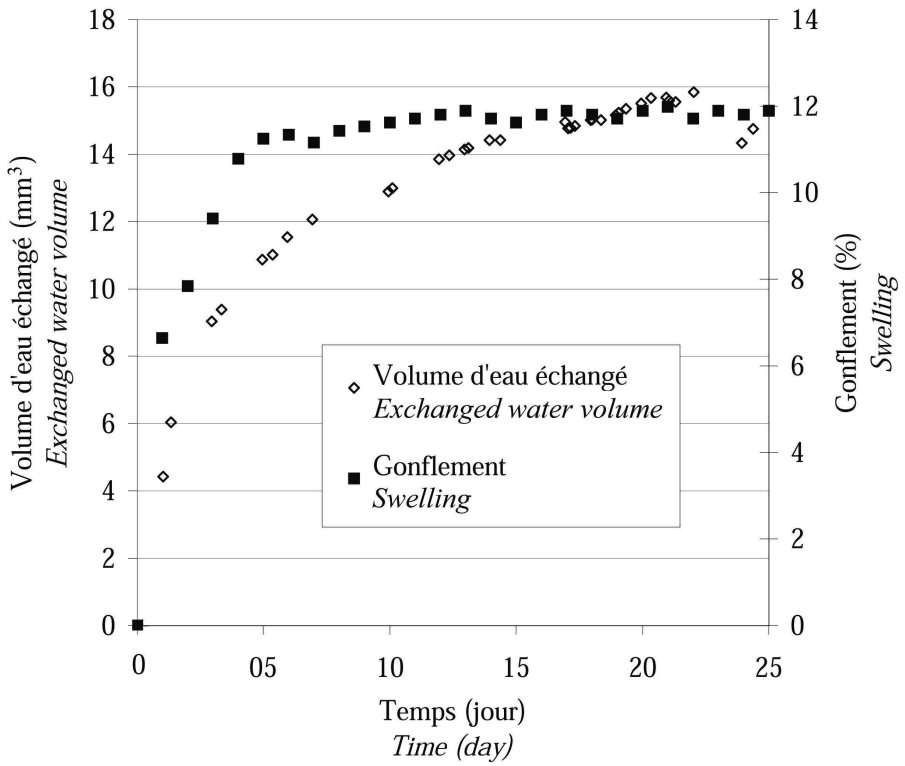

Figure III.14. Volume d'eau échangé après l'application d'une succion de 1,2 MPa (PEG 6 000).

Exchanged water volume after the imposition of a suction of 1.2 MPa (PEG 6 000).

La figure permet de voir qu'au bout de 7/8 jours, le gonflement est stabilisé. En revanche, le volume d'eau continue à augmenter jusqu'à la fin de l'essai (25 jours). Cependant, au-delà de 10 jours environ, le volume d'eau échangé augmente linéairement avec le temps, ce qui est sans doute la marque d'un phénomène d'évaporation supplémentaire non pris en compte par le circuit étalon. Dans ces conditions, le volume total d'eau échangé peut être évalué à environ 13,5 cm^3. La teneur en eau massique estimée de cette manière est alors de 42,5 %.

Pour valider la méthode de mesure du volume d'eau, l'éprouvette a été démontée et sa teneur en eau massique mesurée. La valeur trouvée est de 38,5 %. Les volumes d'eau échangés déterminés par le système de mesure sont donc surestimés de manière significative par rapport à la réalité.

Une origine possible de cette différence est l'évaporation qui peut avoir lieu au niveau de l'espace annulaire qui existe entre le piston et la chemise. Afin de vérifier cette hypothèse, une succion de 4 MPa a été appliquée à une éprouvette placée dans une cellule œdométrique osmotique à l'aide d'une solution de PEG 6 000. Après une dizaine de jours, les teneurs en eau des parties inférieure et supérieure de l'éprouvette ont été mesurées. La comparaison des deux montre une différence de teneur en eau de l'ordre de 0,5 %, la partie la plus humide étant celle au contact de la membrane. Ce résultat

semble confirmer l'hypothèse de l'évaporation au niveau de la partie supérieure de l'éprouvette. Une autre explication possible est que, même au bout de ce délai, l'équilibre hydrique au sein de l'éprouvette n'est pas atteint en raison de la très faible perméabilité du matériau. Cependant, cette hypothèse n'explique pas la différence entre les teneurs en eau mesurées et calculées à partir de la mesure du volume d'eau échangé.

Cette partie montre tout d'abord qu'il est nécessaire d'attendre 10 jours pour atteindre l'équilibre hydrique lorsqu'une succion de 1,2 MPa est imposée à une éprouvette dont la succion initiale est de 20 MPa. Il est vraisemblable que si la différence entre la succion initiale et la succion imposée est inférieure, le temps d'équilibre s'en trouve réduit. On peut donc penser que ce temps de 10 jours représente un maximum. Ensuite, cette partie montre qu'il est difficile en l'état actuel d'évaluer tout au long d'un essai la teneur en eau ou le degré de saturation d'une éprouvette. Ceci est d'autant plus vrai que la succion appliquée est forte, les volumes d'eau à mesurer étant alors très faibles. Pour les mêmes raisons, le suivi de la saturation au cours d'un chargement œdométrique semble difficile. Cependant, au cours des essais réalisés avec ces appareils, les volumes d'eau échangés ont servi de repère pour évaluer l'équilibre hydrique et détecter d'éventuelles fuites dans le système de circulation.

Mode de chargement mécanique

Le mode de chargement mécanique qui a été retenu dans les essais utilisant les œdomètres osmotiques est le chargement par paliers successifs, les dispositifs ne permettant pas d'appliquer un chargement continu. Cependant, le chargement par paliers peut perturber l'interprétation d'essais hydromécaniques. En effet, les différents paramètres mécaniques qui peuvent être obtenus à partir des courbes de compressibilité dépendent du mode de chargement adopté. Ainsi, Guiras-Skandaji (1996) a montré selon que les incréments de charge étaient effectués toutes les 24 h ou bien après avoir atteint l'équilibre des déformations, les paramètres étaient significativement différents. Un temps d'attente de 24 h conduit à sous-estimer la pression de préconsolidation apparente ainsi que les pentes de compressibilité. De même, Cui (1993) a comparé les résultats d'essais à succion contrôlée avec chargement par paliers ou quasi-continu. Dans le cas de chargement discontinu, la pression de préconsolidation apparente est sous-estimée de même que les pentes de compressibilité.

Afin de limiter l'influence du mode de chargement retenu, il a été décidé d'attendre la stabilisation des déformations de l'éprouvette avant d'appliquer l'incrément de charge suivant. La figure III.15 permet de voir que l'équilibre des déformations peut être considéré comme atteint au bout d'un délai compris entre 1 et 3 jours.

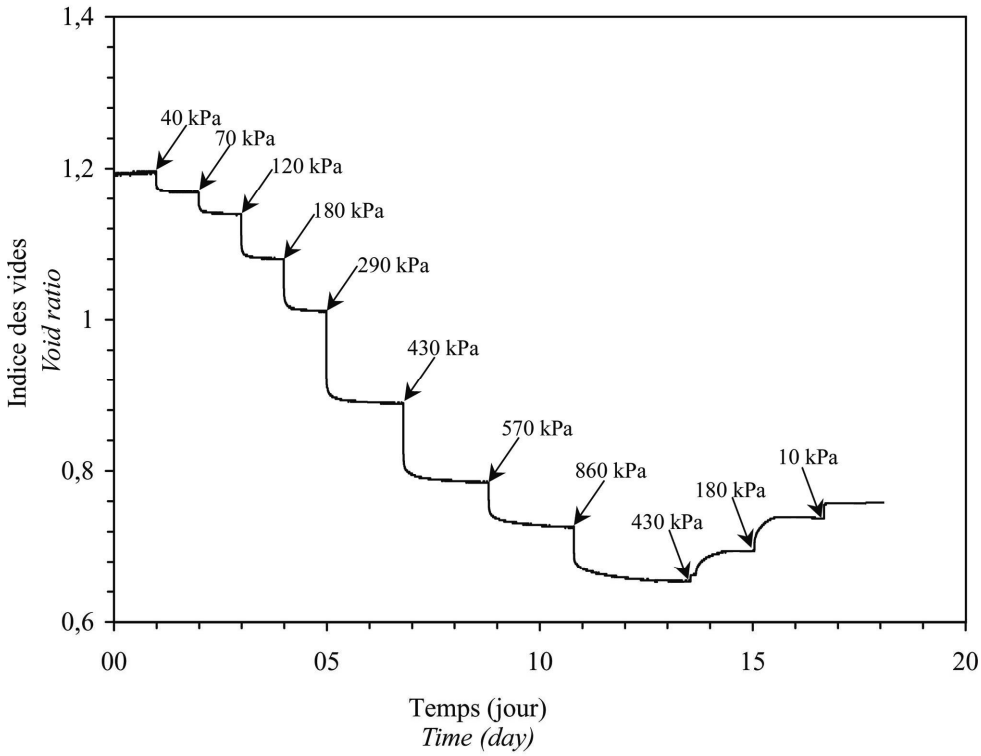

Figure III.15. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'application du chargement mécanique (les valeurs indiquées correspondent à la pression verticale imposée).

Necessary time to reach deformation equilibrium during the mechanical loading (the values on the graph indicate the imposed vertical pressure).

Influence du type de PEG

En raison de l'utilisation de deux types de PEG, l'influence de l'une ou l'autre de ces macromolécules sur le comportement du matériau a été étudiée. Deux essais similaires ont été entrepris, chacun respectant le même chemin de contrainte mais utilisant une macromolécule différente pour préparer la solution osmotique. Les caractéristiques initiales et finales des éprouvettes utilisées sont reportées dans le tableau III.6. Le degré de saturation final est celui de l'éprouvette une fois déchargée. Au cours des essais, les éprouvettes sont soumises à une succion de 1,2 MPa en une seule étape sous une faible contrainte, puis elle sont chargées et déchargées mécaniquement en plusieurs paliers.

Les résultats obtenus (fig. III.16) montrent qu'il n'y a pas d'influence significative du type de PEG sur le comportement hydromécanique du matériau.

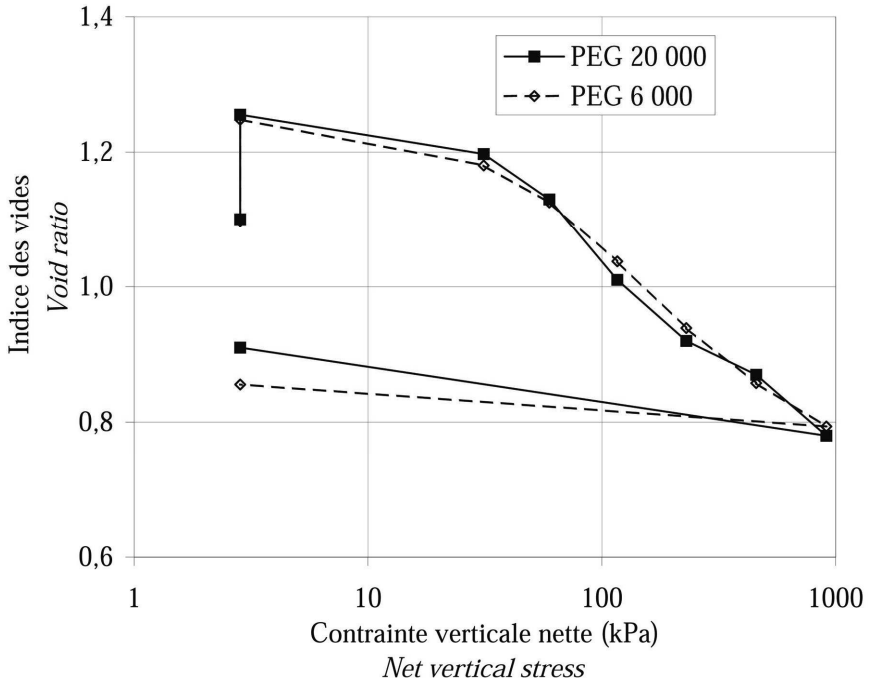

Figure III.16. Influence du poids moléculaire du PEG sur la compressibilité.

Influence of the molecular weight of the PEG on compressibility.

Tableau III.6. Caractéristiques initiales des éprouvettes utilisées pour vérifier l'influence du type de PEG.

Initial characteristics of the tested samples used to check the influence of the PEG molecular weight.

Type de PEG utilisé	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	Sr_i (%)	w_f (%)	$\Delta H/H$ (%)	Sr_f (%)
PEG 20 000	14,6	12,7	35,2	27,7	7,3	84,9
PEG 6 000	14,9	12,9	37,0	26,5	7,4	86,1

Œdomètres à solutions salines

Le premier point de cette partie est consacré à l'évaluation du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre hydrique au sein des éprouvettes lors de la modification de la succion. Ensuite, plusieurs essais destinés à la validation du principe d'imposition de la succion par solutions salines et du fonctionnement des appareils construits sont introduits.

Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée

Le temps d'équilibre lors de l'imposition d'une succion donnée dépend des caractéristiques de l'éprouvette de sol ainsi que de la facilité que l'air a de circuler entre la solution saline et l'éprouvette. Ainsi, Villar (1999) donne un temps d'équilibre moyen de 20 jours par palier avec des éprouvettes de diamètre 4,95 cm et de hauteur 1,2 cm faites à partir de bentonite, alors que Lagny (1996) signale sur

un sol fin qu'au bout de 200 jours l'équilibre n'est toujours pas atteint avec des éprouvettes de 4 cm de diamètre et de hauteur 4,5 cm.

Avec deux types d'appareils différents, avec ou sans système de circulation d'air, et des éprouvettes de hauteur identique mais un diamètre légèrement différent, Villar (1999) et Robinet *et al*. (1997), travaillant tous les deux sur des montmorillonites, obtiennent des temps d'équilibre sensiblement voisins, soit 20 jours. Les résultats de Guiras-Skandaji (1996) semblent confirmer ce point. Cet auteur a mesuré dans un dessiccateur l'évolution de la masse d'une éprouvette de bentonite calcique compactée à l'optimum. La hauteur des éprouvettes était de 1,2 cm et leur diamètre de 3,5 cm. Dans ces conditions, la teneur en eau de l'éprouvette se stabilise au bout d'une durée d'environ 20 jours.

En raison des temps extrêmement importants, il n'a pas été possible d'étudier l'évolution de la teneur en eau d'une éprouvette au sein d'un œdomètre à solutions salines lors de l'application d'une succion donnée. Afin d'évaluer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre, la variation de l'indice des vides d'une éprouvette soumise à une succion de 38,9 MPa a été enregistrée. La figure III.17 donne l'évolution de l'indice des vides en fonction du temps écoulé depuis l'application de la succion. Cet essai a été réalisé dans un appareil basses pressions, l'éprouvette ayant un diamètre de 7,4 cm et une hauteur initiale de 1 cm. On constate qu'au bout d'environ trois semaines, l'équilibre des déformations peut être considéré comme atteint. Cette valeur est en accord avec les données issues de la bibliographie. Cependant, le temps d'équilibre dépend certainement de la valeur de l'incrément de succion : plus celui-ci est important, plus le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre doit être élevé. Il a donc été décidé d'attendre, dans tous les cas, la stabilisation des déformations avant de procéder à la poursuite de l'essai.

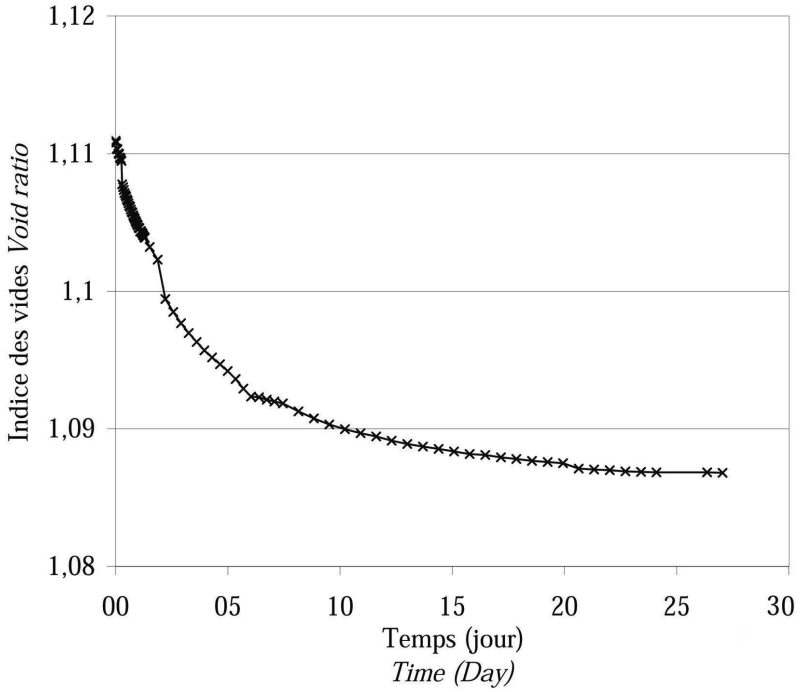

Figure III.17. Variation de l'indice des vides lors de l'application d'une succion de 38,9 MPa à une éprouvette dont la succion est d'environ 20 MPa.

Void ratio variation due to the imposition of a suction of 38.9 MPa to a sample with an initial suction of about 20 MPa.

Mode de chargement mécanique

Les mêmes observations que pour la méthode osmotique peuvent être faites sur le mode de chargement mécanique par paliers successifs dans le cas des œdomètres à solutions salines (cf. III.3.1.2). Il a donc été décidé d'attendre l'équilibre des déformations avant de procéder à la suite du chargement mécanique. La figure III.18 permet de voir les résultats obtenus au cours d'un chargement mécanique sous une succion imposée constante de 38,5 MPa. On constate que le « temps d'équilibre » est plus long que dans le cas des appareils osmotiques et qu'il est au maximum de 4 jours environ pour les incréments de chargement les plus importants.

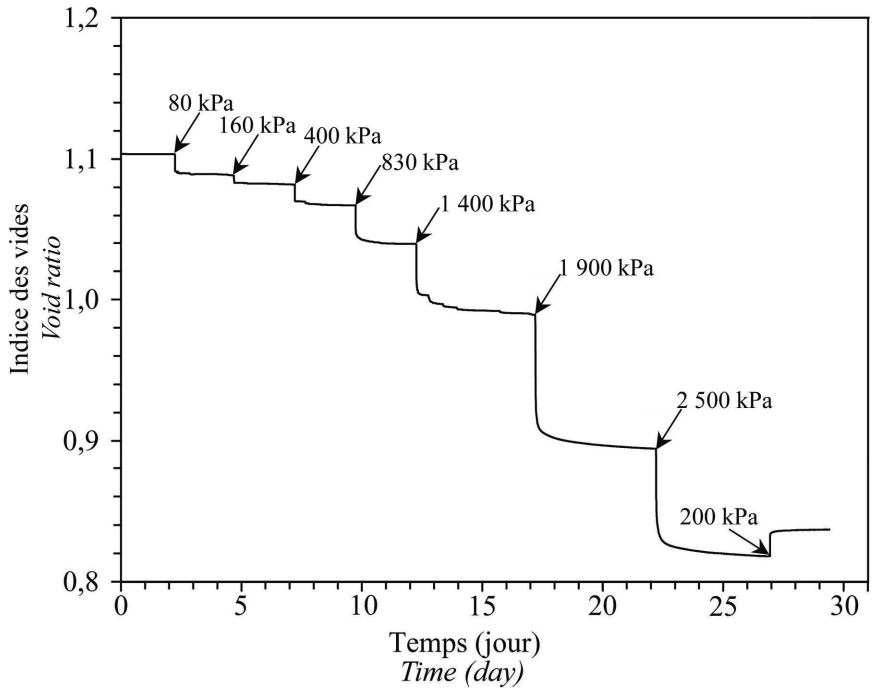

Figure III.18. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors de l'application du chargement mécanique (les valeurs indiquées correspondent à la pression verticale imposée).

Necessary time to reach deformation equilibrium during the mechanical loading (the values on the graph indicate the imposed vertical pressure).

Validation des appareils œdométriques développés

Les appareils développés étant nouveaux, une série d'essais a été conduite pour vérifier, d'une part, le principe d'utilisation des solutions salines pour imposer la succion, et d'autre part, la bonne répétabilité entre les résultats d'essais. Ces deux points seront traités successivement dans cette partie.

Principe des solutions salines

La pression de compactage des éprouvettes est de 1 000 kPa, la succion mesurée à ce stade étant d'environ 20 MPa. Cette pression correspond à la pression de préconsolidation initiale des éprouvettes. Un essai a été entrepris afin de vérifier la procédure expérimentale établie pour réaliser un essai, notamment pour évaluer l'influence du mode de chargement mécanique retenu.

Pour cet essai, une éprouvette a été compactée directement dans un œdomètre hautes pressions. Une succion de 20,5 MPa a ensuite été imposée tout en maintenant une faible pression verticale tout au long de l'essai (10 kPa). Passé un délai de 3 semaines, nécessaire pour établir l'équilibre éventuel entre la solution et l'éprouvette, celle-ci a été chargée et déchargée mécaniquement. Le résultat de l'essai est donné sur la figure III.19.

À partir de cette courbe, différents paramètres ont été déterminés (tab. III.7) : la teneur en eau initiale w_i, la teneur en eau finale w_f, le gonflement de l'éprouvette lors de l'application de la succion $\Delta H/H$, la pente de compression vierge $\lambda(s)$, la pente de la partie surconsolidée de la courbe κ, et la pression de préconsolidation apparente $p_0(s)$. Le mode de détermination des paramètres mécaniques est détaillé dans le chapitre suivant (cf. IV.3.2).

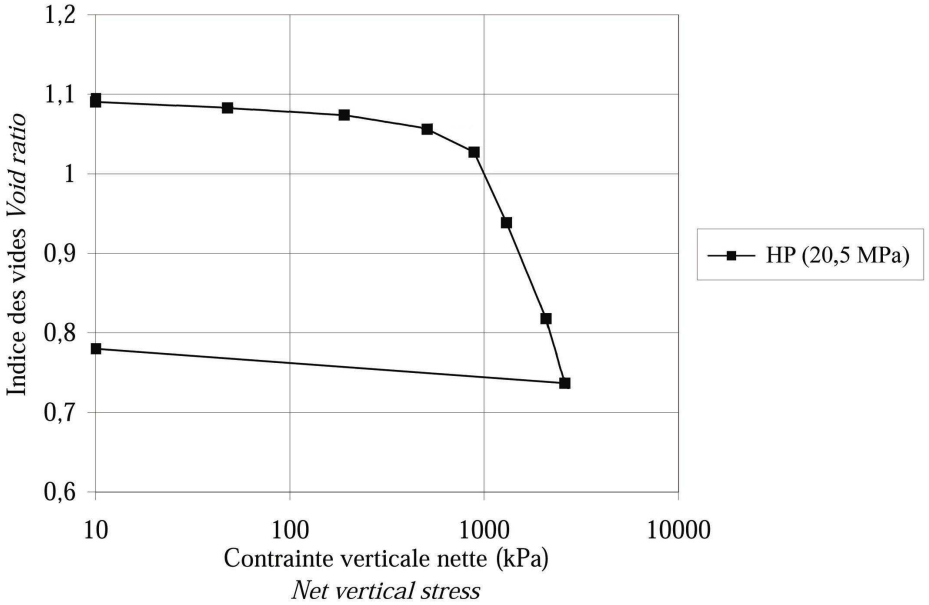

Figure III.19. Essai de compression œdométrique sous une succion de 20,5 MPa.

Compression curve under a suction of 20.5 MPa.

Tableau III.7. Paramètres déterminés lors des essais conduits pour valider les œdomètres à solutions salines.

Determined parameters during the tests conducted to validate the salt solutions oedometers.

Essai	w_i (%)	w_f (%)	γ_d initial (kN.m^{-3})	$\Delta H/H$ (%)	κ	$\lambda(s)$	$p_0(s)$ (kPa)
HP (20,5)	15,1	14,9	12,7	0	0,03	0,27	1 000
BP (20,5)	14,9	15,0	12,6	0,1	0,03	0,28	950
BP1 (8,5)	15,0	16,8	12,6	0,5	0,03	0,31	450
BP2 (8,5)	15,0	17,0	12,6	0,5	0,03	0,30	490

Au cours de la phase d'imposition de la succion, aucune variation significative de l'indice des vides de l'éprouvette n'a été enregistrée. La pression de préconsolidation apparente est de l'ordre de 1 000 kPa (essai HP (20,5)). Cet essai valide donc le principe des appareils développés ainsi que la procédure expérimentale.

Répétabilité et influence de la taille des éprouvettes

L'influence du diamètre de l'éprouvette sur le comportement hydromécanique du matériau a été testée. L'essai BP (20,5 MPa) équivalent à l'essai précédent a été réalisé dans un œdomètre basses pressions. Le résultat de cet essai est reporté sur la figure III.20 où il est comparé à celui réalisé dans la cellule hautes pressions. Cette figure permet de constater qu'il n'y a pas d'influence significative de la taille de l'éprouvette, la répétabilité entre les deux types d'œdomètres à solutions salines est donc satisfaisante.

Cette procédure de validation des dispositifs a été complétée par un test de répétabilité entre les deux appareils basses pressions : une succion de 8,5 MPa a été appliquée puis les deux éprouvettes ont été chargées et déchargées mécaniquement. Les résultats, représentés sur la figure III.20, montrent que la répétabilité entre les appareils basses pressions est également satisfaisante.

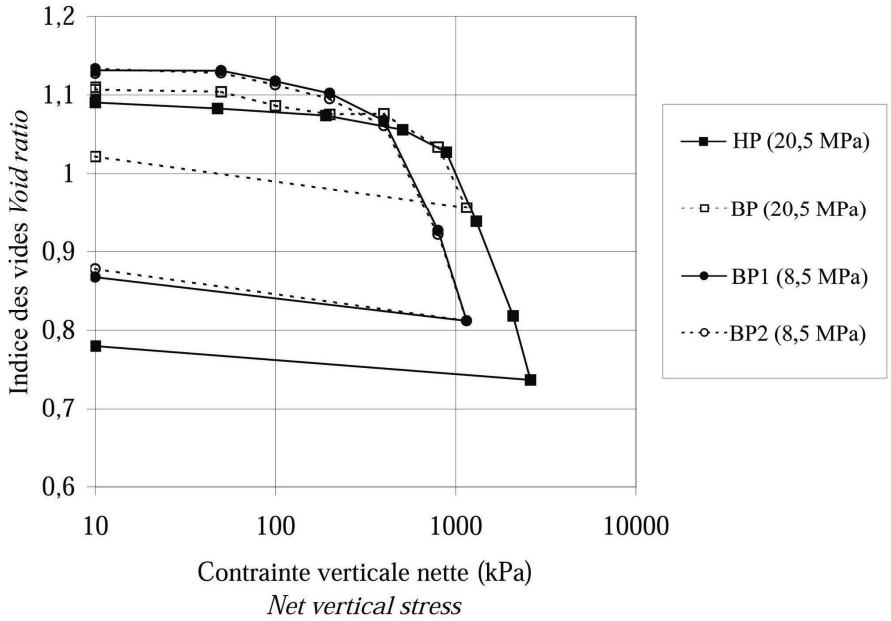

Figure III.20. Vérification de la répétabilité entre les différents œdomètres à solutions salines.

Check of the repeatability between the different salt solutions oedometers.

Continuité entre les deux techniques expérimentales

La dernière étape de validation des deux méthodes d'imposition consiste à évaluer l'influence de la technique employée sur le comportement hydromécanique du matériau. En effet, il est nécessaire de vérifier la qualité de la continuité des résultats entre les domaines accessibles par chacune de ces méthodes.

Essais réalisés

La continuité entre les deux techniques a été testée en effectuant deux essais respectant le même chemin de contrainte, un par type de méthode d'imposition de la succion. Chaque essai comprend une phase d'application d'une succion de 8,5 MPa, puis une phase de chargement/déchargement mécanique sous une succion imposée constante. La succion de 8,5 MPa a été retenue car elle constitue la succion maximale pour la méthode osmotique et la succion minimale pour la technique des solutions salines. Pour les solutions salines, l'appareil basses pressions a été utilisé. Les résultats des deux essais sont reportés sur la figure III.21. Ces courbes de compressibilité ont permis la détermination d'un certain nombre de paramètres (tab. III.8).

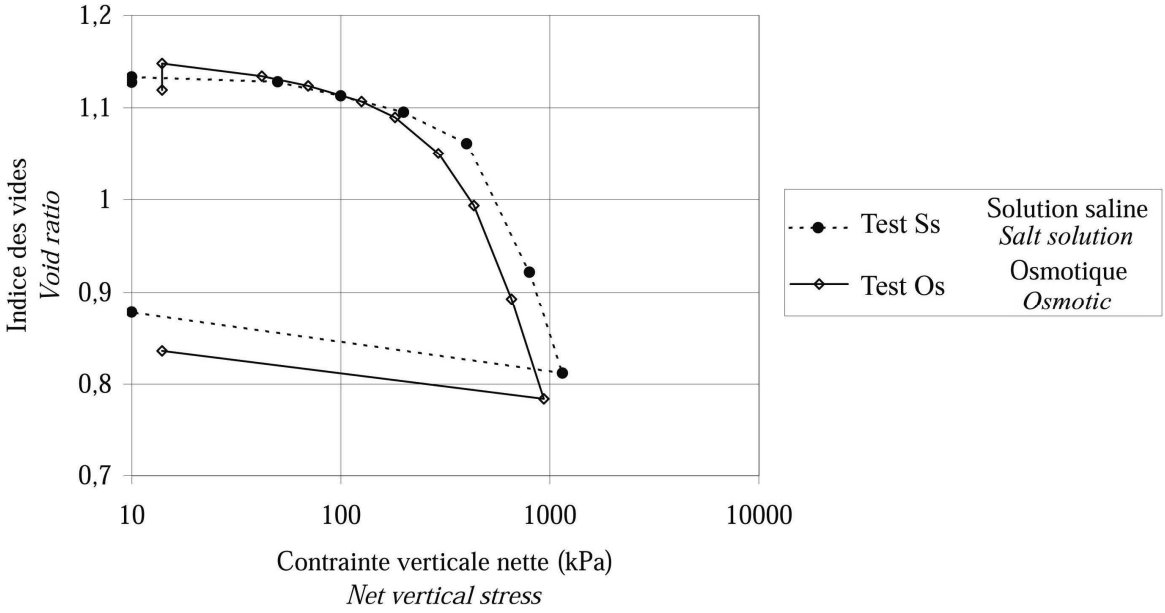

Figure III.21. Résultats des essais Ss et Os.

Results of tests Ss and Os.

Tableau III.8. Influence de la méthode d'imposition de la succion.

Influence of the suction control method

	w_i (%)	γ_{di} (kN.m^{-3})	Sr_i (%)	w_f (%)	$\Delta H/H$ (%)	Sr_f (%)	κ	$\lambda(s)$	$p_0(s)$ (kPa)
Essai Ss (solution saline)	15	12,6	36,2	16,8	0,5	58,8	0,03	0,29	450
Essai Os (osmotique)	14,7	12,7	35,5	17,7	1,2	61,2	0,03	0,31	370

La figure III.21 et le tableau III.8 montrent que le gonflement est légèrement supérieur dans le cas de l'essai osmotique. L'éprouvette ayant le plus gonflé, est celle qui présente la pression de préconsolidation apparente la plus faible et la pente de compression vierge la plus importante.

L'éprouvette testée avec la cellule osmotique apparaît donc plus compressible que l'éprouvette testée avec l'appareil à solution saline. Il faut noter que l'influence de la technique d'imposition de la succion sur les pentes de compressibilité est relativement faible.

Interprétation des résultats

La compréhension des différences mises en évidence par les essais Ss et Os nécessite de considérer les composantes de la succion imposées par chacune des méthodes employées. La méthode des solutions salines impose la succion totale alors que la technique osmotique ne permet d'imposer que la succion matricielle. L'objectif de cette partie est de montrer comment ce point peut expliquer la tendance observée.

La solution osmotique, puisque préparée avec de l'eau distillée, ne contient pas de cations contrairement à l'éprouvette de matériau. Il y a donc un gradient de concentration entre la solution osmotique et l'éprouvette. Olsen (1985) a démontré qu'un tel gradient induisait un flux osmotique : les ions diffusent vers la solution, phénomène associé à une pénétration de l'eau dans le sol. Une certaine quantité d'eau est donc absorbée par l'éprouvette en raison de cet échange de sel, un tel échange n'étant pas possible dans les appareil à solutions salines.

Pour cette raison, la composante osmotique de la succion n'est pas maîtrisée dans les appareils osmotiques. Elle tend donc à s'annuler au cours de l'essai Os, ce qui correspond en fait à une diminution de la concentration de l'eau contenue dans l'éprouvette. Les conséquences d'une diminution de la concentration de l'eau d'un sol ont été étudiées par Barbour & Fredlund (1989). Ces auteurs ont montré qu'une telle réduction produisait une augmentation du potentiel de gonflement. Ces considérations permettent d'expliquer une partie des différences observées tel que la pression de préconsolidation plus faible dans l'essai Os que dans l'essai Ss.

Le fait que les pentes $\lambda(s)$ et κ ne soient pas significativement affectées par la méthode est peut-être à relier à la nature de l'argile gonflante employée. En effet, Olson & Mesri (1971) ont montré que la concentration de l'eau du fluide n'avait pas d'influence significative sur ces pentes lorsqu'une smectite calcique était employée ce qui est le cas dans les essais présentés.

Commentaires

L'utilisation de ces deux techniques de manière complémentaire est donc sujette à quelques limitations, la technique osmotique et la méthode des solutions salines ne permettant pas d'imposer les mêmes composantes de la succion. Il est vraisemblable que si la continuité avait été testée sous une succion appliquée plus faible, la composante osmotique d'un sol augmentant avec le degré de saturation, les différences de comportement observées auraient été amplifiées. Dans le cas du matériau testé, la succion de 8,5 MPa semble adaptée pour que les effets de la composante osmotique de la succion sur le comportement mécanique ne soient pas trop importants.

Cette observation ne semble pas *a priori* généralisable à tous les matériaux. Il est en effet vraisemblable que pour des matériaux avec une composante osmotique de la succion plus grande, cette observation ne soit plus vérifiée.

Conclusion

Cette partie a tout d'abord permis de montrer qu'il n'est pas possible de mesurer les volumes d'eau échangés au cours d'un essai conduit dans un œdomètre osmotique en raison d'une évaporation trop importante. La procédure expérimentale pour réaliser un essai œdométrique osmotique a été définie. Pour atteindre l'équilibre, il est nécessaire d'attendre dix jours dans le cas d'une modification de succion et trois jours représentent un maximum dans le cas d'une modification de la charge appliquée. La procédure d'utilisation des œdomètres a été validée par un essai spécifique. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre lors d'une modification de succion imposée est d'au moins trois semaines alors que quatre jours sont nécessaires dans le cas de l'imposition d'un incrément de charge verticale. La continuité entre les deux méthodes d'imposition de la succion a été testée, ce qui a mis en évidence le rôle de la composante osmotique sur le comportement mécanique d'un matériau gonflant.

ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU SÉLECTIONNÉ

Le chapitre I avait permis de montrer que le comportement mécanique des sols non saturés, gonflants ou non, était influencé d'une manière importante par les propriétés hydriques du matériau et par sa structure interne. Cette partie constitue en fait un préalable à l'étude du comportement mécanique du matériau sélectionné. Son objectif premier est d'apporter le plus d'informations possibles en vue de faciliter l'interprétation des résultats qui seront présentés ultérieurement.

Le premier point de cette partie sera consacré à l'étude des propriétés hydriques des éprouvettes et à la détermination de leur courbe de rétention. Le second point sera réservé à la caractérisation de la

relation qui existe entres les paramètres de compactage et la succion initiale du matériau. Le dernier point de cette partie est consacré à l'étude structurale des éprouvettes.

Courbe de rétention

La courbe de rétention du matériau a été déterminée en utilisant les solutions salines et la méthode osmotique. Les éprouvettes destinées à ces essais ont été préparées selon la méthode exposée précédemment (cf. III.2.3) mais en utilisant un compacteur spécial. Leur diamètre est de 3,5 cm et leur hauteur de 1,2 cm. La teneur en eau initiale est de 15 % environ. Après la préparation, la succion des éprouvettes a été augmentée par paliers jusqu'à 287,9 MPa puis diminuée jusqu'à 0,01 MPa. Une fois la succion de 0,01 MPa atteinte, il n'a pas été possible de retourner à la succion initiale des éprouvettes, celles-ci étant alors sous la forme d'une pâte inutilisable. À chaque palier, la teneur en eau d'une ou deux éprouvette(s) a été déterminée de même que leurs dimensions.

En raison des temps d'équilibre mis en jeu avec la méthode des solutions salines et du nombre élevé de paliers, le temps total nécessaire à l'obtention de la courbe est d'environ 40 semaines. Quatre plans de représentation ont été utilisés pour exploiter les résultats, reportés sur la figure III.22, ces données étant complétées par la figure III.23 qui donne la relation entre la teneur en eau volumique et la succion. Sur la figure III.22, le point I représente l'état initial des éprouvettes.

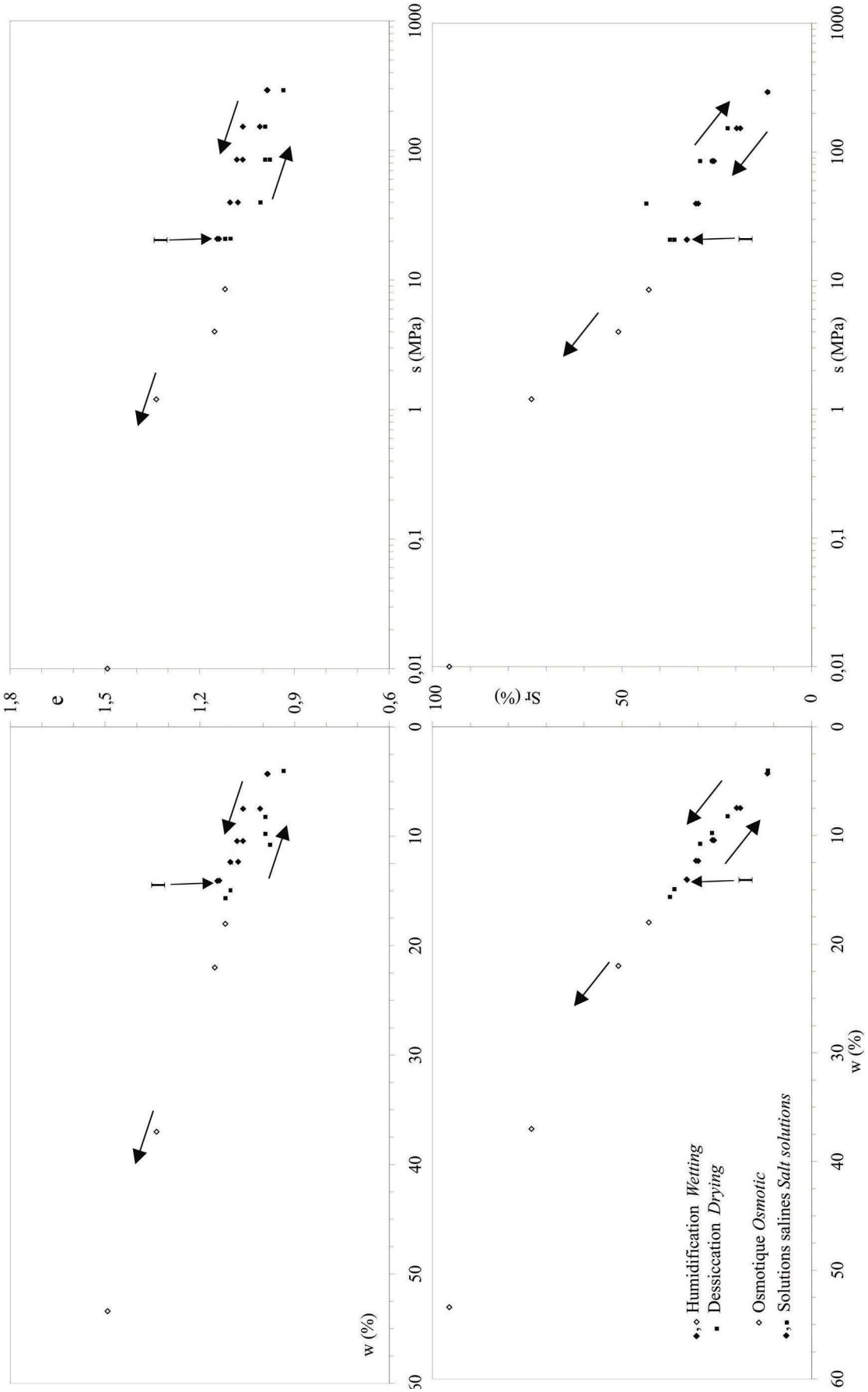

Figure III.22. Courbes d'humidification et de dessiccation d'une éprouvette de mélange compacté.

Wetting and drying curves of a compacted sample of mixture.

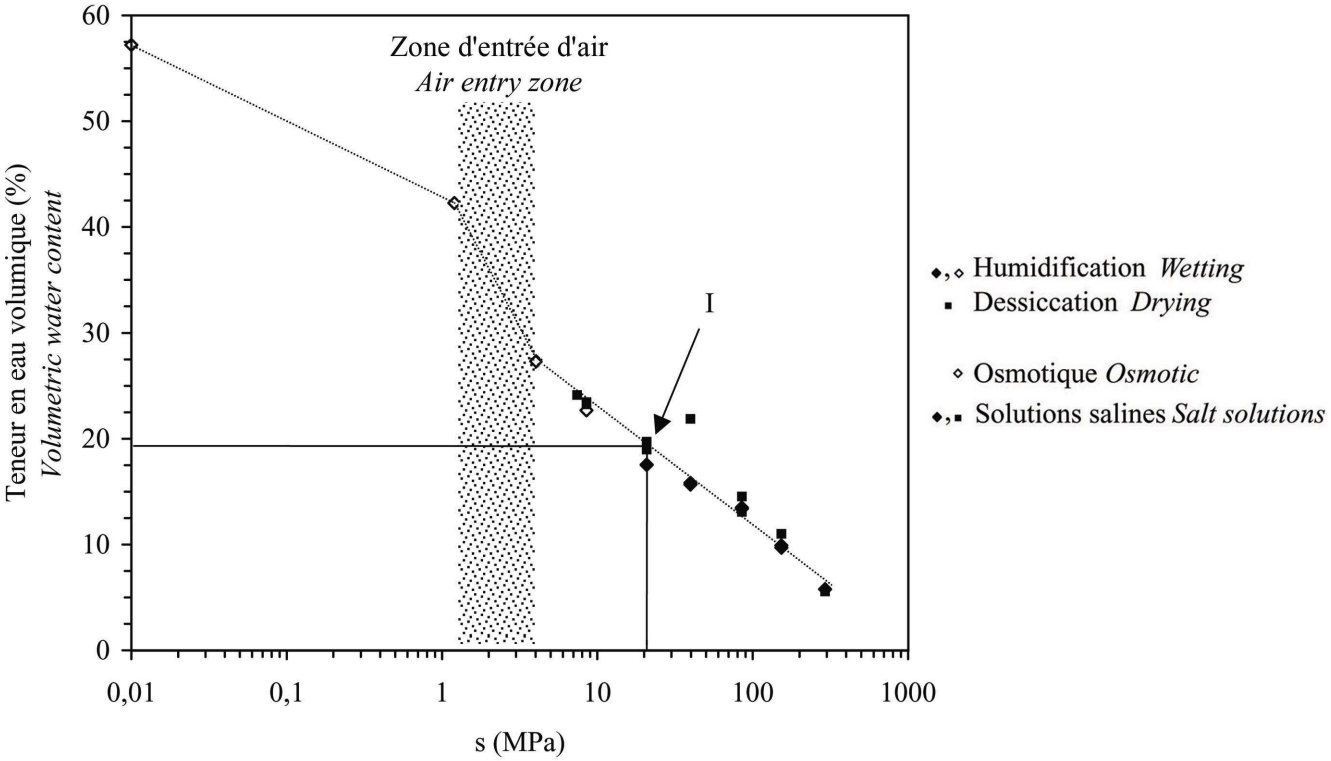

Figure III.23. Courbe de rétention des éprouvettes.

Soil water characteristic curve of the samples.

Le premier point que mettent en évidence ces résultats est le fait qu'il n'y a pas d'hystérésis marquée pour les éprouvettes dans le domaine des succions comprises entre la succion initiale et 287,9 MPa. Dans ce domaine de succion, les variations de teneur en eau et d'indice des vides sont surtout le fait des particules argileuses, dont le processus de dessiccation/humectation est parfaitement réversible sans hystérésis (Ben Rhaiem *et al.*, 1986).

L'identification du point d'entrée d'air des éprouvettes est assez difficile au vu de ces résultats, il n'existe en effet pas de domaine de succion où la saturation soit très proche de 100 %. La figure III.23 permet cependant d'identifier une zone de succion dans laquelle se situe le point d'entrée d'air. Cette zone correspond à la partie grisée sur la figure III.23. Une meilleure détermination du point d'entrée d'air nécessiterait de réaliser une dessiccation du matériau lorsque celui-ci a été totalement saturé, chose qui n'a pas été possible ici.

Compactage et succion initiale

Les essais ont tous été réalisés entre 10 et environ 26 % de teneur en eau massique. Le matériau a été préparé selon la méthode déjà exposée (cf. II .2.3), la quantité d'eau ajoutée et l'énergie de compactage étant modifiées. Pour chaque couple teneur en eau – énergie de compactage, une éprouvette a été compactée en deux couches pour réaliser la mesure de succion par la méthode du papier filtre. Trois énergies de compactage ont été sélectionnées : 800, 1 000 et 1 200 kPa.

Les résultats des mesures de succion et de densité sèche initiale sont reportés sur la figure III.24 à partir de laquelle les paramètres de compactage ont été estimés (tab. III.9).

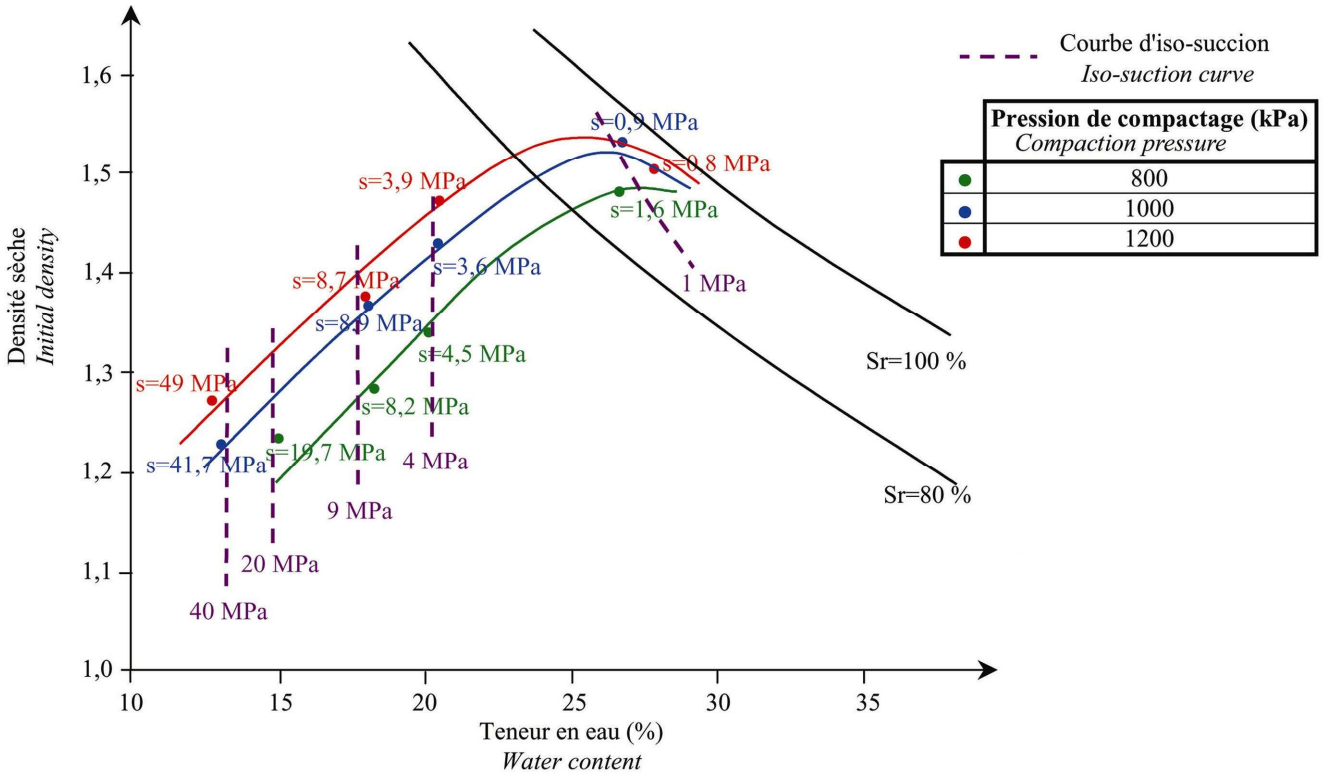

Figure III.24. Relation entre le compactage et la succion initiale des éprouvettes (Londres, 2001 ; Carof, 2002).

Relationship between compaction and the initial suction of the samples (Londres, 2001 ; Carof, 2002).

Tableau III.9. Caractéristiques de compactage du mélange en fonction de la pression de compactage.

Compaction characteristics of the mixture as a function of the compaction pressure.

	Énergie de compactage (kPa)	800	1 000	1 200
Paramètres à l'optimum	Teneur en eau (%)	27,5	26,0	25,1
	Poids volumique sec ($kN.m^{-3}$)	14,7	15,2	15,3

Il est intéressant de noter que la succion ne semble pas dépendre de la densité sèche du matériau du côté sec de l'optimum, les lignes d'iso-succion pouvant raisonnablement être prises parallèles à l'axe des ordonnées. Au-delà de l'optimum, les courbes d'iso-succion ont tendance à s'incliner, traduisant ainsi une dépendance de la succion vis-à-vis de la densité sèche. Ces résultats vont dans le sens des observations faites par différents auteurs sur des matériaux gonflants ou non (Gens *et al.*, 1995 ; Li, 1995).

Évolution de la structure interne des éprouvettes en fonction de la succion

Cette étude a pour objectif l'obtention de données qualitatives sur la modification de la structure interne des éprouvettes au cours de l'humidification. La structure interne des éprouvettes a été étudiée sous trois succions différentes : 0 MPa, 4 MPa et la succion initiale (20 MPa). La valeur de 4 MPa a été choisie car elle est proche de la valeur du point d'entrée d'air estimé et elle correspond à la succion à partir de laquelle la réduction de succion provoque un gonflement significatif. Trois éprouvettes ont été préparées à une teneur en eau initiale voisine de 15 % directement dans les œdomètres osmotiques. Deux d'entre elles ont ensuite été humidifiées en plusieurs paliers, chacune jusqu'à une succion différente (4 et 0 MPa). Durant l'humidification, le gonflement était libre dans la direction verticale. Les caractéristiques des trois éprouvettes sont indiquées dans le tableau III.10.

Une fois l'équilibre hydrique atteint, chacune des éprouvettes a été préparée de manière à réaliser des lames minces selon la technique exposée au chapitre précédent. Les résultats sont indiqués sur les figures III.25 à III.30. Pour chaque succion, deux grossissements sont donnés. Sur ces figures, les plages très claires correspondent aux vides du matériau, la résine époxy étant transparente. Les plages plus ou moins grises sont les particules d'argile et de quartz. La teinte très sombre des lames s'explique par la présence d'une certaine quantité de matière organique.

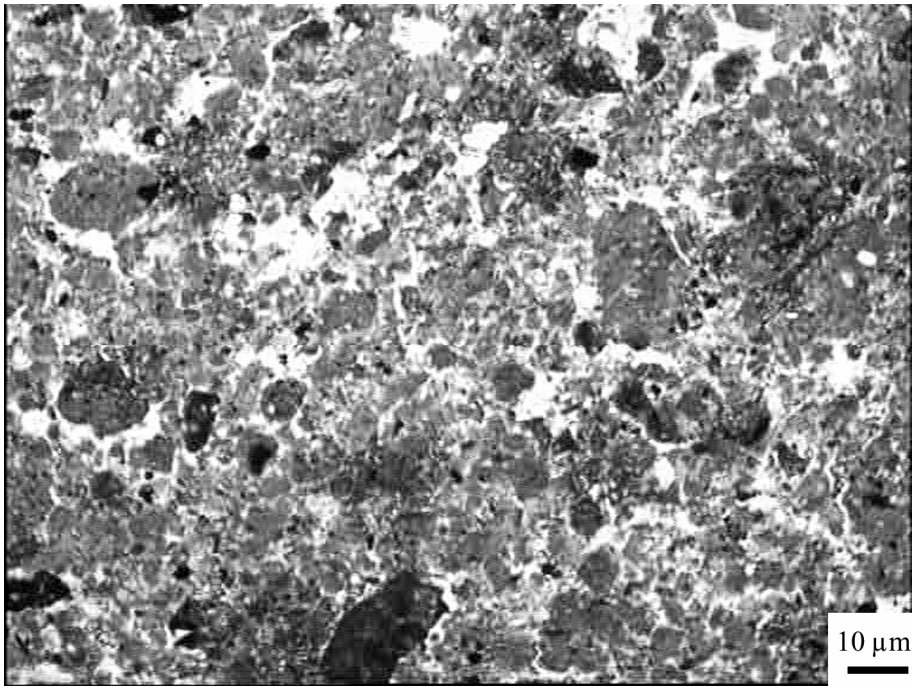

Figure III.25. Structure sous la succion initiale (×4).

Structure under the initial suction (×4).

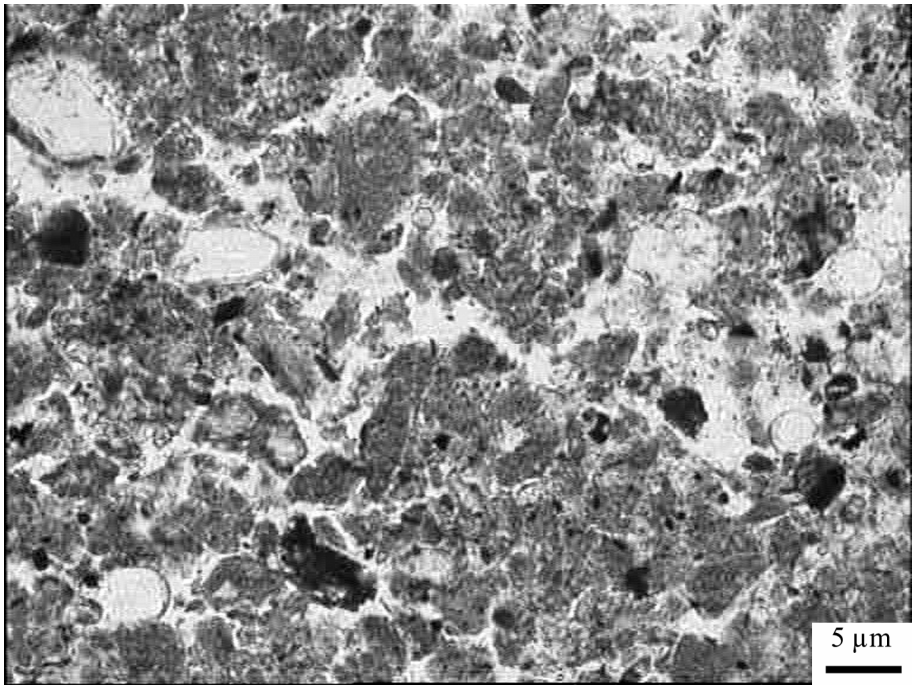

Figure III.26. Structure sous la succion initiale (×10).

Structure under the initial suction (×10).

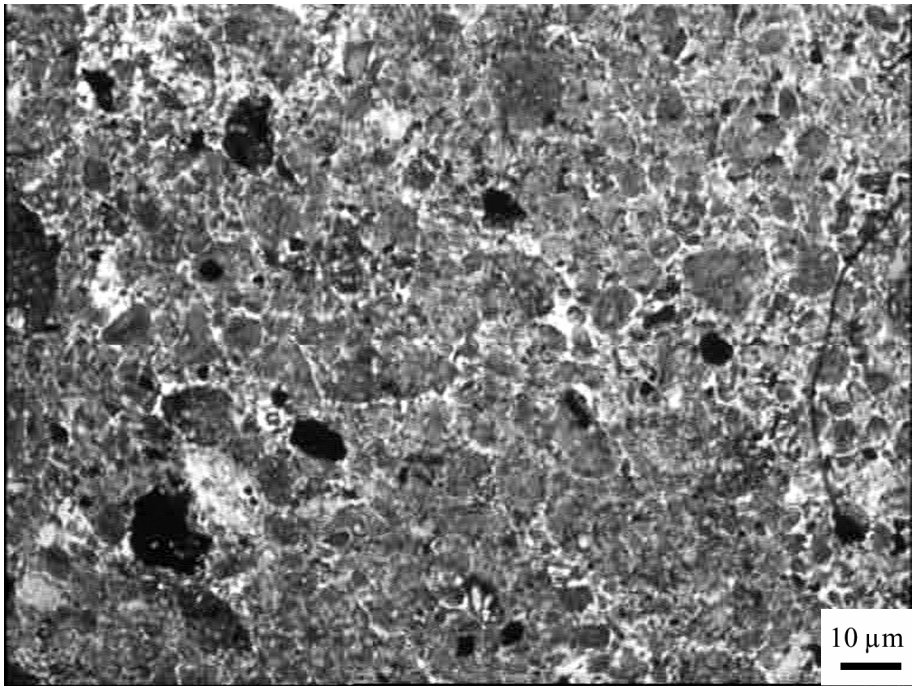

Figure III.27. Structure sous une succion de 4 MPa (×4).

Structure under a suction of 4 MPa (×4).

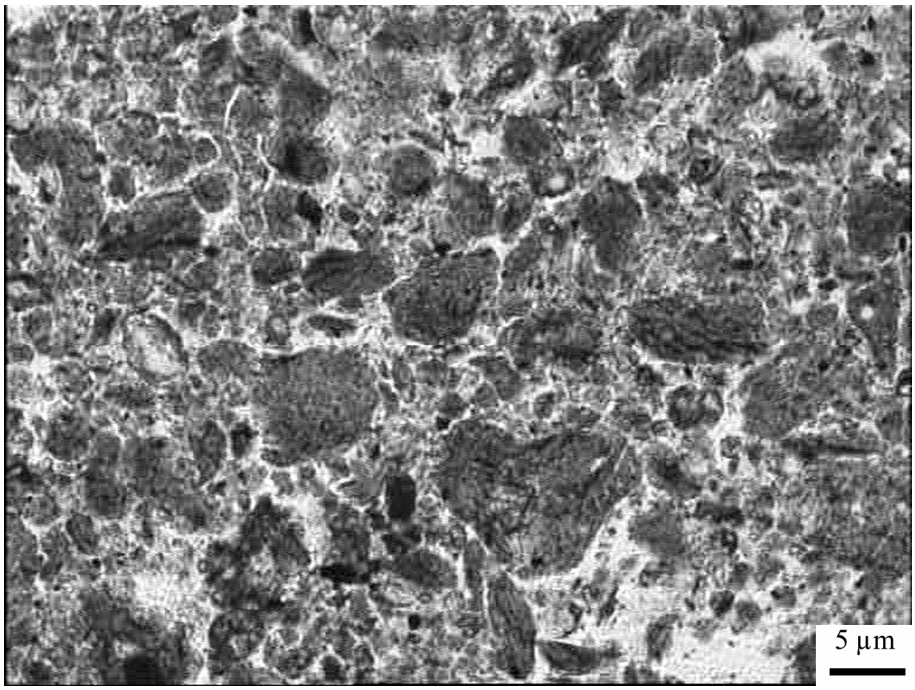

Figure III.28. Structure sous une succion de 4 MPa (×10).

Structure under a suction of 4 MPa (×10).

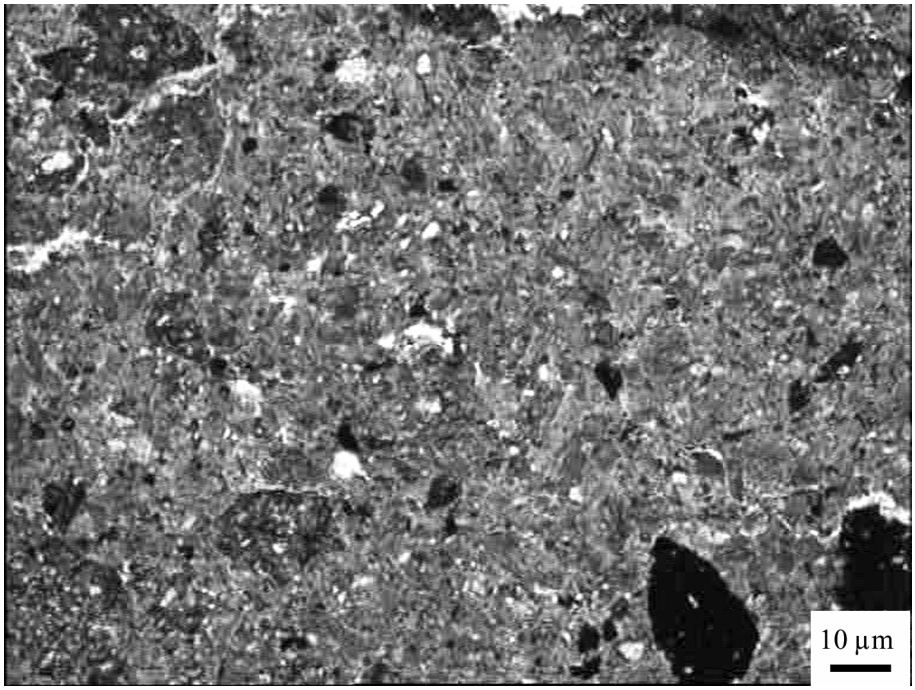

Figure III.29. Structure sous une succion de 0 MPa (×4).

Structure under a suction of 0 MPa (×4).

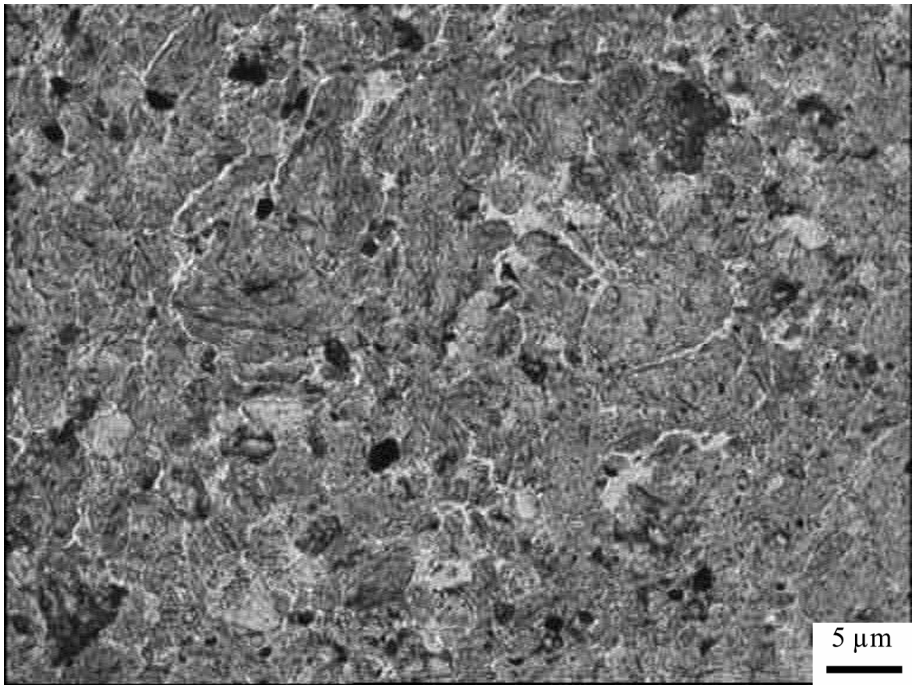

Figure III.30. Structure sous une succion de 0 MPa (×10).

Structure under a suction of 0 MPa (×10).

Tableau III.10. Caractéristiques des éprouvettes destinées aux observations microscopiques.

Main characteristics of the samples used in the microscopic investigations.

Succion	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	Sr_i (%)	w_f (%)	$\Delta H/H$ (%)	Sr_f (%)
20 MPa	15,1	12,7	36,4	-	-	-
4 MPa	14,9	12,6	35,4	22,1	4,0	50,0
0 MPa	14,9	12,7	37,0	52,5	16,9	96,4

Les photographies réalisées sur les éprouvettes après compactage (fig. III.25 et III.26) montrent clairement une double structure, structure définie sur la figure I.16c : les particules argileuses sont regroupées avec les autres constituants du sol, ce qui individualise des agrégats. Entre ces agrégats, on observe des pores relativement larges et bien développés.

Sous une succion de 4 MPa, le grossissement le plus faible (fig. III.27) permet de voir que la structure de l'éprouvette semble plus resserrée que pour l'état initial. Le plus fort grossissement permet de voir des agrégats et des macropores au sein du matériau (fig. III.28). Entre l'état initial et une succion de 4 MPa, la structure interne des éprouvettes n'est donc pas fondamentalement différente. Les différences par rapport à l'état initial se situent au niveau de la dimension des agrégats qui semble plus importante et de la taille des macropores ainsi que de leur quantité qui a été réduite de manière significative par l'humidification.

La structure observée sur l'éprouvette humidifiée jusqu'à une succion de 0 MPa est totalement différente des autres éprouvettes (fig. III.29 et III.30.) Il est très difficile d'individualiser un agrégat ou de distinguer un macropore au sein de la lame et ce pour les deux grossissements. L'ensemble de l'éprouvette correspond à une matrice argileuse homogène, la double structure caractéristique des états précédents a disparu. La structure est voisine de ce qui avait été représenté sur la figure I.16b.

Il est donc possible de distinguer deux types de structure des éprouvettes en fonction de leur état hydrique. Pour des succions supérieures à 4 MPa au moins, la structure est une double structure bien marquée avec des agrégats et des macropores. Au-dessous de cette valeur de succion, la structure interne des éprouvettes du mélange étudié apparaît beaucoup plus homogène à ces échelles d'observations. Il n'y a plus ni agrégats ni macropores, mais seulement une matrice argileuse. Il n'est cependant pas possible de définir avec précision la succion au-dessous de laquelle la structure interne des éprouvettes peut être considérée comme totalement homogène, des investigations complémentaires seront donc nécessaires.

Commentaires

Les résultats qui viennent d'être présentés mettent en avant la complexité des phénomènes qui gouvernent le gonflement d'un matériau argileux. Ils montrent l'impossibilité d'isoler un paramètre qui permettrait de prédire à lui seul les propriétés de gonflement d'un matériau. L'interprétation de tels résultats nécessite d'avoir au moins une information sur l'état hydrique, succion ou teneur en eau, et la structure, densité ou énergie de compactage, du matériau.

L'étude microstructurale permet de voir qu'entre la succion initiale et 4 MPa, une humidification correspond à un comblement des macropores des éprouvettes. Ce point explique ainsi la faible variation de l'indice des vides dans cette gamme de succion mise en évidence à partir de la courbe de rétention. On peut donc estimer qu'entre 20 et 4 MPa de succion les agrégats gonflent progressivement et absorbent toute l'eau qui pénètre dans l'éprouvette. Lorsque la double structure disparaît, les particules argileuses de tous les agrégats entrent en contact. On passe donc d'un état où l'eau est discontinue à un état ou l'eau est continue. Ces commentaires devront être complétés par une étude plus précise du gonflement en fonction de la succion.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, la procédure de fabrication des éprouvettes destinées aux essais hydromécaniques a été présentée. Elle permet de fabriquer des éprouvettes dont les caractéristiques initiales peuvent être considérées identiques entre elles. La préparation retenue permet de concevoir des éprouvettes avec une structure interne initiale de type double structure dont l'influence sur le comportement hydrique et mécanique sera par la suite étudiée.

Le deuxième point de ce chapitre a été consacré à la validation des dispositifs expérimentaux, étape indispensable avant leur utilisation pour engager la caractérisation du matériau et pour entreprendre l'étude de son comportement hydromécanique. Concernant la méthode osmotique, il apparaît que le système de mesure des échanges d'eau n'est pas assez précis pour permettre le suivi de la teneur en eau d'une éprouvette tout au long d'un essai en raison de phénomènes d'évaporation difficiles à contrôler et des faibles volumes d'eau échangés. En revanche, le poids moléculaire de la macromolécule n'affecte pas le résultat d'un essai mécanique. La répétabilité des résultats d'essais effectués dans les œdomètres à solutions salines a été vérifiée. Un essai spécifique a aussi permis de valider le principe d'utilisation des solutions salines pour imposer la succion au cours d'un essai œdométrique.

Un point important de ce chapitre concerne l'étude de la continuité entre les deux techniques expérimentales. Les essais conduits ont permis de montrer l'importance de la composante osmotique sur le comportement mécanique du matériau testé lorsque la succion imposée au cours du chargement mécanique est de 8,5 MPa. Cette composante affecte surtout la pression de préconsolidation apparente, les pentes de compressibilité n'étant pas influencées significativement. Il semble que si cette continuité avait été testée sur un matériau avec une succion osmotique plus forte ou une succion imposée inférieure à 8,5 MPa, les différences constatées auraient sans doute été plus fortes. L'utilisation combinée des deux techniques est donc sujette à quelques précautions, elle doit être entreprise lorsque la composante osmotique du matériau est suffisamment limitée.

Les principales propriétés des éprouvettes ont été mesurées en réalisant un nombre important d'essais. La courbe de rétention du matériau a aussi été déterminée, elle permet l'identification d'un intervalle de succion dans lequel se situe le point d'entrée d'air du matériau (entre 2 et 4 MPa). L'étude de la structure interne des éprouvettes montre qu'au-dessus d'une succion de 4 MPa les éprouvettes ont une double structure. Si la succion est réduite au-dessous de 4 MPa, la double structure disparaît totalement.

Au cours du chapitre suivant, ces données seront utilisées pour interpréter les résultats des différents essais œdométriques.

Chapitre IV :

Comportement mécanique d'un sol gonflant compacté dans une gamme étendue de succion

INTRODUCTION

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais œdométriques conduits à l'aide des œdomètres à succion contrôlée décrits dans les chapitres précédents. Il est organisé selon trois axes principaux : étude du comportement mécanique du matériau en fonction de la succion appliquée, caractérisation de l'influence d'une sollicitation hydrique complexe et enfin interprétation de l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du modèle de Barcelone.

Partant de la constatation que la quantité d'informations sur le comportement hydromécanique des sols gonflants dans une large gamme de succion était limitée, une étude de l'influence de la succion sur la compressibilité d'un matériau gonflant compacté a été entreprise pour des succions comprises entre 0 et 300 MPa. Ce point fera l'objet de la première partie de ce chapitre. Afin de compléter ces données, un certain nombre d'essais additionnels sera introduit, ce qui facilitera l'interprétation du comportement mis en évidence.

L'étude de l'influence de sollicitations hydriques complexes sur le comportement mécanique des sols gonflants constitue le cœur de la seconde partie de chapitre. Des essais comprenant des modifications de succion plus ou moins complexes, menées sous différentes pressions mécaniques verticales constantes seront introduits dans cette partie. Les résultats des essais seront interprétés en considérant, d'une part, les déformations volumiques, et d'autre part, l'influence du chemin de contrainte sur les paramètres mécaniques.

La troisième partie de ce chapitre sera consacrée à une tentative d'interprétation de l'ensemble des résultats d'essais dans la cadre du modèle de Barcelone pour sols non saturés. Ce point sera traité en comparant les capacités du modèle de Barcelone initial à celle du modèle développé pour les sols gonflants. La détermination des surfaces de charge sera d'abord réalisée puis, à partir de celles-ci, les résultats expérimentaux seront comparés aux prévisions de chacun des modèles.

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Dans cette partie, la nomenclature utilisée pour référencer les essais qui seront introduits tout au long de ce chapitre est d'abord expliquée. Ensuite, les caractéristiques générales de l'ensemble des essais sont regroupées sous la forme de trois tableaux synthétiques.

Nomenclature des essais

La référence utilisée pour appeler chaque essai a été élaborée de manière à fournir des indications générales sur le chemin de contrainte suivi. Ces références sont composées par l'assemblage de lettres dont la disposition indique de manière sommaire les sollicitations, hydriques ou mécaniques, imposées à l'éprouvette. La signification de chacune des lettres employées est indiquée dans le tableau IV.11.

À titre d'exemple, la référence SLDWL indique tout d'abord que l'essai a été réalisé dans un œdomètre à solutions salines (S). Il a commencé par une phase de chargement mécanique sous une succion constante (L), l'éprouvette a ensuite été successivement desséchée (D) et humidifiée (W) sous une pression verticale constante. La grande majorité des essais qui seront introduits dans ce chapitre se terminent par une phase de chargement/déchargement mécanique sous une succion imposée constante (L).

Tableau IV.11. Nomenclature des essais.

Test specifications.

Lettre	Signification
S	réalisation de l'essai dans un œdomètre à solutions salines
O	réalisation de l'essai dans un œdomètre osmotique
W	humidification conduite sous une pression verticale maintenue constante
D	dessiccation conduite sous une pression verticale maintenue constante
L	Chargement/déchargement mécanique sous une succion constante
P	utilisation de matériau non compacté (poudre)
R	emploi de matériau remanié
Vc	essai à volume constant

Caractéristiques de l'ensemble des essais réalisés

Dans cette partie, l'ensemble des essais est décrit. Les tableaux IV.12, IV.13 et IV.14 résument les caractéristiques de chacun de ces essais. Les détails sur les paliers suivis dans chaque essai seront donnés par la suite. Les essais dont la référence est annotée d'un astérisque (*) sont ceux dont une partie des résultats a déjà été exploitée au chapitre précédent.

Tableau IV.12. Essais réalisés pour caractériser le comportement hydromécanique du matériau dans le domaine des succions comprises entre 0 et 287,9 MPa.

Performed tests in order to characterize the hydromechanical behaviour of the material in the range of suctions comprised between 0 and 287,9 MPa.

Essai	Œdomètre	Chemin de contrainte	Description détaillée	Temps (semaine)
SDL5	S	dessiccation/chargement	- augmentation succion ➔ 287,9 MPa - chargement/déchargement mécanique	10
SDL4	S	dessiccation/chargement	- augmentation succion ➔ 150,6 MPa - chargement/déchargement mécanique	10
SDL3	S	dessiccation/chargement	- augmentation succion ➔ 83,6 MPa - chargement/déchargement mécanique	10
SDL2	S	dessiccation/chargement	- augmentation succion ➔ 38,9 MPa - chargement/déchargement mécanique	6
SDL1*	S	chargement	- chargement sous une succion voisine de la succion initiale (20,5 MPa)	6
SWL1*	S	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 8,5 MPa - chargement/déchargement mécanique	6
OWL1*	O	idem SWL1	Idem SWL1	6
OWL2	O	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 4 MPa - chargement/déchargement mécanique	6
OWL3	O	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 2 MPa	8

			- chargement/déchargement mécanique	
OWL4	O	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 1,2 MPa - chargement/déchargement mécanique	10
OWL5	O	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 0,5 MPa - chargement/déchargement mécanique	10
OWL6	O	humidification/chargement	- diminution succion ➔ 0 MPa - chargement/déchargement mécanique	10

Tableau IV.13. Essais réalisés pour caractériser les couplages hydromécaniques.

Performed tests to characterize hydromechanical couplings.

Essai	Œdomètre	Chemin de contrainte	Description détaillée	Temps (semaine)
SDWL	S	cycle hydrique puis chargement	a- augmentation succion ➔ 38,9 MPa sous σ^*_v = 10 kPa b- retour succion initiale c- chargement/déchargement mécanique	10
SWDL	S	cycle hydrique puis chargement	a- baisse succion ➔ 8,5 MPa sous σ^*_v = 10 kPa b- retour succion initiale c- chargement/déchargement mécanique	10
SLWL	S	chargement puis humidification	a- augmentation σ^*_v ➔ 800 kPa b- baisse succion ➔ 8,5 MPa c- fin du chargement puis déchargement	8
SLDWL	S	chargement puis cycle hydrique	a- augmentation σ^*_v ➔ 800 kPa b- augmentation succion ➔ 38,9 MPa c- baisse succion ➔ 8,5 MPa d- fin du chargement puis déchargement	15
SLWDL	S	chargement puis cycle hydrique	a- augmentation σ^*_v ➔ 800 kPa b- augmentation succion ➔ 38,9 MPa c- baisse succion ➔ 8,5 MPa d- fin du chargement puis déchargement	15
OLWL1	O	chargement puis humidification	a- augmentation σ^*_v ➔ 100 kPa b- baisse succion ➔ 0 MPa c- chargement mécanique	10
OLWL2	O	chargement puis humidification	a- augmentation σ^*_v ➔ 200 kPa b- baisse succion ➔ 0 MPa c- chargement mécanique	10

Tableau IV.14. Récapitulatif des essais complémentaires.

Additional tests.

Essai	Œdomètre	Chemin de contrainte	Description détaillée	Temps (semaine)
SP1	S	essai sur poudre	- chargement d'une poudre de matériau sous une succion de 20,5 MPa	4
SP2	S	essai sur poudre	- chargement d'une poudre de matériau	4

			sous une succion de 287,9 MPa	
R	Classique	essai œdométrique sur matériau remanié	- chargement du matériau remanié ($1,5 \times w_L$)	4
V_C	Volume constant	essai à volume constant	- humidification non contrôlée	1
B1	classique	essai œdométrique sur bentonite pure	- humidification non contrôlée puis chargement	3
X1	Classique	essai œdométrique sur limon pur	- humidification non contrôlée puis chargement	3

CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE D'UN MATÉRIAU GONFLANT POUR DES SUCCIONS COMPRISES ENTRE 0 ET 300 MPa

La caractérisation du comportement mécanique du matériau en fonction de la succion appliquée lors du chargement a été réalisée à partir de 12 essais œdométriques à succion contrôlée (tab. IV.12). Les courbes de compressibilité obtenues ont servi de support à la détermination d'un certain nombre de paramètres mécaniques dont l'évolution en fonction de la succion sera commentée en intégrant notamment les informations concernant les caractéristiques initiales et finales des éprouvettes. À partir de ces résultats, une interprétation de l'influence de la succion sur le comportement du matériau étudié est proposée, ce qui permettra la mise en évidence de l'influence de l'état initial des éprouvettes sur le comportement mécanique qui a été observé.

Chemins de contrainte suivis

Les essais comprennent tous une phase de modification de la succion sous une faible pression verticale suivie d'un chargement/déchargement mécanique à succion constante. Les chemins de contrainte suivis sont indiqués de manière précise sur la figure IV.1 et dans les tableaux IV.15 et IV.16. L'état initial est représenté par le point A qui correspond à l'état des éprouvettes une fois insérées dans l'œdomètre : la succion est d'environ 20 MPa, la pression verticale appliquée est de l'ordre de 10 kPa.

En raison de la représentation logarithmique, il n'a pas été possible de tracer sur la figure IV.1 l'essai OWL6 pour lequel la succion appliquée est nulle. Pour des commodités de représentation, les données obtenues avec une succion nulle seront reportées avec une succion de 0,01 MPa.

Autant que possible, l'application de la succion s'est faite en respectant l'ensemble des paliers de succions représentés sur la figure IV.1. Cependant, certains ont dû être supprimés afin de limiter le temps nécessaire à la réalisation de l'essai, notamment dans le cas des œdomètres osmotiques qui sont

confrontés au problème de dégradation de la membrane semi-perméable. Dans ce cas, la durée maximale d'un essai a été d'environ 10 semaines.

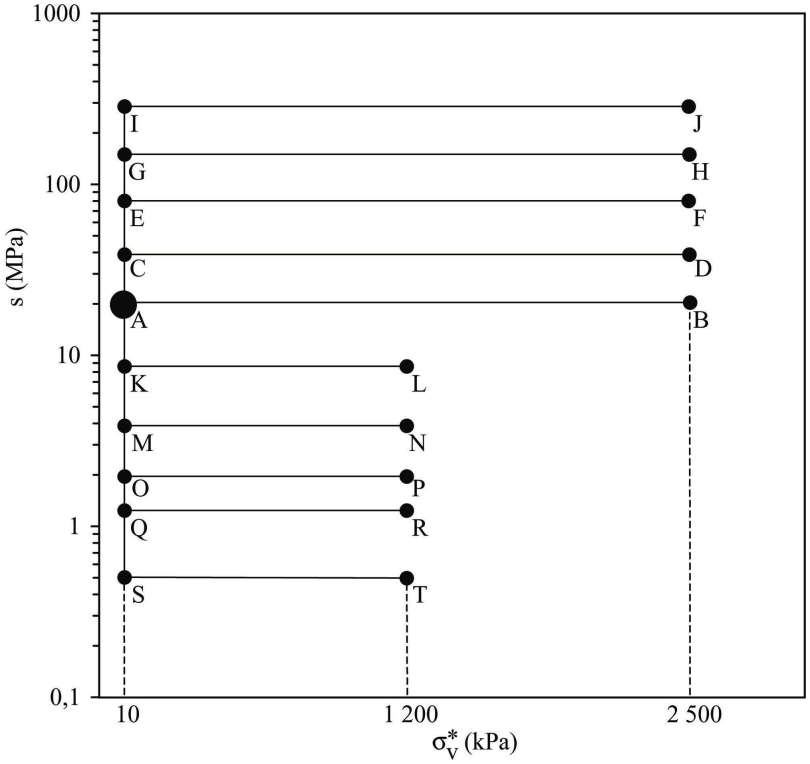

Figure IV.1. Chemins de contrainte dans le plan (σ_v^* - s).

Stress paths followed in the (σ_v^* - s) plan.

Tableau IV.15. Description des chemins suivis (technique des solutions salines).

Stress paths description (salt solutions technique).

SDL5	SDL4	SDL3	SDL2	SDL1	SWL1
A-E-I-J-I	A-C-G-H-G	A-C-E-F-E	A-C-D-C	A-B-A	A-K-L-K

Tableau IV.16. Description des chemins suivis (méthode osmotique).

Stress paths description (osmotic method).

OWL2	OWL3	OWL4	OWL5
A-K-M-N-M	A-K-M-O-P-O	A-K-M-Q-R-Q	A-K-O-S-T-S

Exemple d'interprétation d'un essai

L'interprétation des résultats qui sera proposée dans la suite de ce mémoire se base, pour une grande partie, sur des paramètres mécaniques qui doivent être déterminés à partir de chacune des courbes œdométriques obtenue. Cette détermination est entachée d'une certaine erreur, l'objet de cette partie étant de l'évaluer.

À titre d'exemple, l'interprétation de l'essai SDL2 est proposée. Cet essai a consisté à appliquer une succion de 38,9 MPa sous une pression verticale de 10 kPa puis à effectuer un chargement/déchargement œdométrique sous une succion constante de 38,9 MPa. Les indices des vides obtenus à la fin de chaque étape (hydrique ou mécanique) permettent de tracer la courbe de compressibilité du matériau sous la succion correspondante (fig. IV.2).

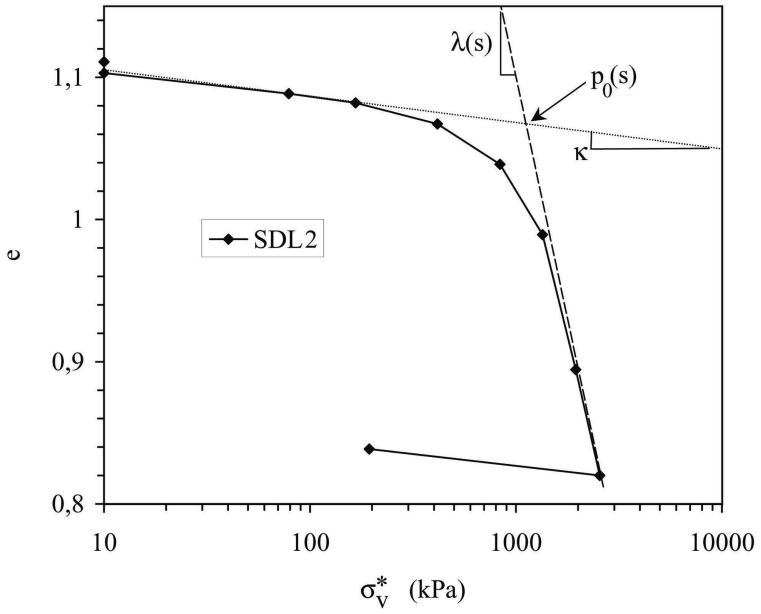

Figure IV.2. Courbe de compressibilité de l'essai SDL2.

Compression curve of test SDL2.

L'application d'une succion sous une faible charge verticale provoque une modification de l'indice des vides du matériau. Le variation de hauteur de l'éprouvette, notée ΔH/H, a été mesurée. Elle correspond au rapport entre la hauteur initiale de l'éprouvette et sa hauteur après stabilisation du gonflement.

La pente de la partie surconsolidée de la courbe de compressibilité κ, ainsi que la pente de compression vierge λ(s), sont déterminées comme indiquées sur la figure IV.2. L'intersection des deux droites ainsi définies donne la pression de préconsolidation apparente des éprouvettes $p_0(s)$. Cette procédure de détermination de la pression $p_0(s)$ a été choisie pour sa simplicité d'utilisation et afin de limiter les erreurs liées à l'emploi des procédures graphiques plus complexes (méthodes de Casagrande, Schmertmann, …).

La procédure consiste en fait à diviser la courbe de compressibilité en deux portions de droite. L'existence de plusieurs solutions pour placer ces droites compliquent la détermination de chacun des

paramètres mécaniques. Afin d'évaluer l'influence de l'opérateur sur cette détermination, le calcul de chacun des paramètres a été réalisé par une vingtaine de personnes différentes auxquelles le schéma de principe de la figure IV.2 avait été communiqué. Ce travail a été réalisé sur un total de douze essais. Le résultat est que l'on peut considérer que l'incertitude associée à la valeur des pentes $\lambda(s)$ et κ est de l'ordre de 0,01 alors que l'incertitude relative sur la pression $p_0(s)$ de l'ordre de 5 %.

Essais menés avec des succions comprises entre 0 et 287,9 MPa

L'ensemble des résultats des essais œdométriques à succion contrôlée sera d'abord présenté dans cette partie. Ils correspondent aux différentes courbes de compressibilité obtenues ainsi qu'aux divers paramètres hydriques ou mécaniques qui ont été déterminés au cours de chaque essai. Ces résultats seront ensuite commentés puis interprétés en considérant notamment les informations acquises sur le matériau au cours des chapitres précédents.

Courbes de compressibilité

Dans un souci de clarté, les courbes de compressibilité ont été séparées en deux groupes distincts, d'un côté celles obtenues avec les œdomètres osmotiques et de l'autre celles obtenues avec les œdomètres à solutions salines.

Résultats et commentaires

Les courbes des essais osmotiques sont réunis sur la figure IV.3, les résultats des essais conduits avec les œdomètres à solutions salines sont donnés sur la figure IV.4. Toutes les courbes ont été corrigées en fonction des déformations de l'ensemble "bâti-cellule-capteur".

Dans le cas de l'essai SDL5, succion appliquée de 287,9 MPa, l'éprouvette a été chargée jusqu'à une pression verticale de 1 000 kPa environ et, en raison d'un problème expérimental survenu dans le système d'imposition de la pression, elle a due être déchargée. Elle a pu être rechargée jusqu'à une valeur d'environ 4 500 kPa puis déchargée. Lors de l'essai OWL4, le chargement mécanique n'a pas pu être mené à son terme en raison de problème sur le système d'acquisition des données. Les résultats de ces essais seront donc utilisés avec précaution par la suite.

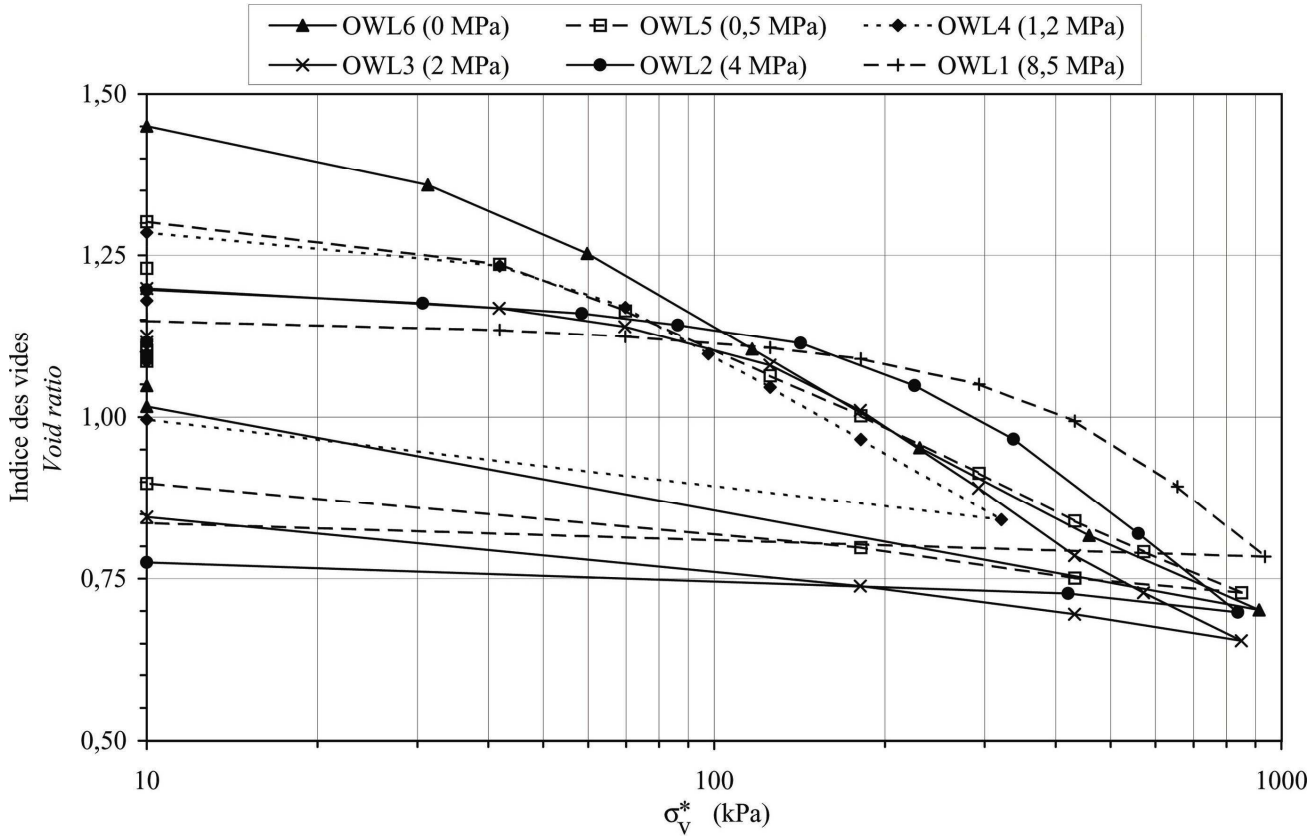

Figure IV.3. Courbes de compressibilité en fonction de la succion appliquée – méthode osmotique.

Compression curve as a function of the applied suction – osmotic method.

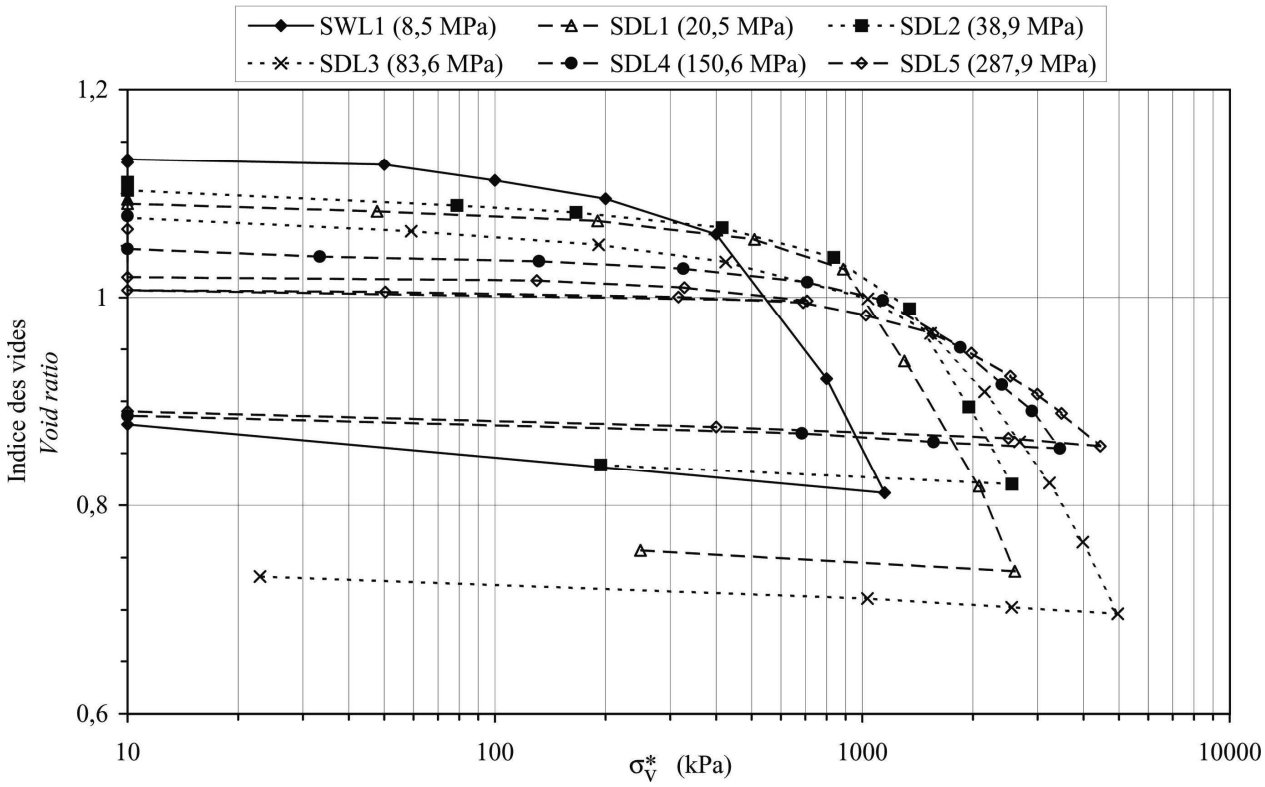

Figure IV.4. Courbes de compressibilité en fonction de la succion appliquée –méthode des solutions salines.

Compression curve as a function of the applied suction – salt solutions technique.

Les courbes de compressibilité peuvent être organisées selon deux groupes distincts. Lorsque la succion appliquée est inférieure ou égale à 2 MPa, les courbes de compressibilité correspondantes tendent vers la courbe de compressibilité obtenue sous une succion nulle (essai OWL6). La pression pour laquelle elles rejoignent la courbe de l'essai OWL6 est d'autant plus forte que la succion appliquée est élevée. Le deuxième groupe de courbes correspond aux essais où la succion imposée est supérieure à 2 MPa, ces courbes de compressibilité traversant la courbe de l'essai OWL6 sans la rejoindre. La courbe de compressibilité obtenue dans le cas de l'essai OWL2 (s = 4 MPa) est particulière dans le sens où elle traverse la courbe de l'essai OWL6 mais les deux se rejoignent à partir d'une pression verticale appliquée de 550 kPa environ.

Paramètres calculés

À partir des éprouvettes et des courbes de compressibilité obtenues plusieurs paramètres ont été déterminés (tab. IV.17). Outre ceux décrit en 0, il s'agit de la teneur en eau initiale w_i, du poids volumique sec initial γ_{di}, du degré de saturation initial Sr_i, du gonflement lors de la phase d'imposition de la succion $\Delta H/H$, de la teneur en eau finale w_f ainsi que du degré de saturation final Sr_f. Les paramètres finaux ont été mesurés sur les éprouvettes une fois celles-ci sorties de la cellule œdométrique.

L'imposition d'une succion très supérieure à la succion initiale pourrait provoquer un retrait latéral de l'éprouvette, qui ne serait donc dans ce cas plus confinée latéralement. Lors du démontage en fin d'essai, il est possible de vérifier si un espace annulaire s'est créé entre l'éprouvette et la chemise de la cellule œdométrique. Même dans le cas d'une succion imposée de 287,9 MPa, l'éprouvette est apparue toujours bien en place dans la cellule œdométrique. Ceci est dû au fait que la teneur en eau initiale des éprouvettes est voisine de la limite de retrait. On peut donc supposer que, dans tous les essais, la condition œdométrique a été respectée de manière satisfaisante.

Tableau IV.17. Caractéristiques initiales et finales des éprouvettes et paramètres mécaniques.

Initial and final characteristics of the tested samples and mechanical parameters.

Essai	Succion appliquée (MPa)	w_i (%)	γ_{di} (kN.m^{-3})	Sr_i (%)	$\Delta H/H$ (%)	w_f (%)	Sr_f (%)	κ	$\lambda(s)$	$p_0(s)$ (kPa)
SDL5	287,9	15,1	13,0	38,0	-3,1	3,1	14,9	0,005	0,09	1 200
SDL4	150,6	15,0	12,9	37,3	-2,1	6,9	20,2	0,01	0,14	1 200
SDL3	83,6	15,1	12,6	35,9	-1,7	10,4	37,7	0,03	0,24	1 200
SDL2	38,9	15,1	12,6	35,9	-0,4	11,5	36,1	0,03	0,26	1 150

SDL1	20,5	15,1	12,7	36,4	0	14,9	48,8	0,03	0,27	1 000
SWL1	8,5	15,0	12,6	36,2	0,5	16,8	58,8	0,03	0,31	450
OWL1	8,5	14,7	12,7	35,5	1,2	17,7	61,2	0,03	0,31	370
OWL2	4	14,5	12,7	35,0	3,9	24,7	85,4	0,03	0,30	200
OWL3	2	15,0	12,7	36,2	4,5	25,5	88,1	0,03	0,25	110
OWL4	1,2	15,4	12,8	37,7	9,5	27,7	94,3	0,03	0,23	65
OWL5	0,5	15,0	12,8	37,7	10,4	29,7	95,3	0,06	0,23	65
OWL6	0	14,6	12,6	34,7	17,2	45,6	100	0,07	0,23	55

Variation des caractéristiques des éprouvettes en fonction de la succion appliquée

L'ensemble des résultats précédents a été interprété en étudiant l'évolution de chaque paramètre en fonction de la succion imposée avant et après le chargement mécanique. Les données obtenues à partir des essais ci-dessus seront complétées par les résultats présentés lors du chapitre précédent, notamment ceux concernant la structure interne du matériau.

Étude du gonflement au cours de la phase d'application de la succion

La figure IV.5 donne la variation du paramètre $\Delta H/H$ dans le cas où la succion appliquée est inférieure à la succion initiale, ce qui correspond donc à une humidification de l'éprouvette. Dans tous les essais, l'imposition de la succion a été réalisée en plusieurs étapes. Afin de compléter les données du tableau IV.17, les valeurs du gonflement obtenues pour chacun de ces paliers ont été ajoutées sur la figure IV.5.

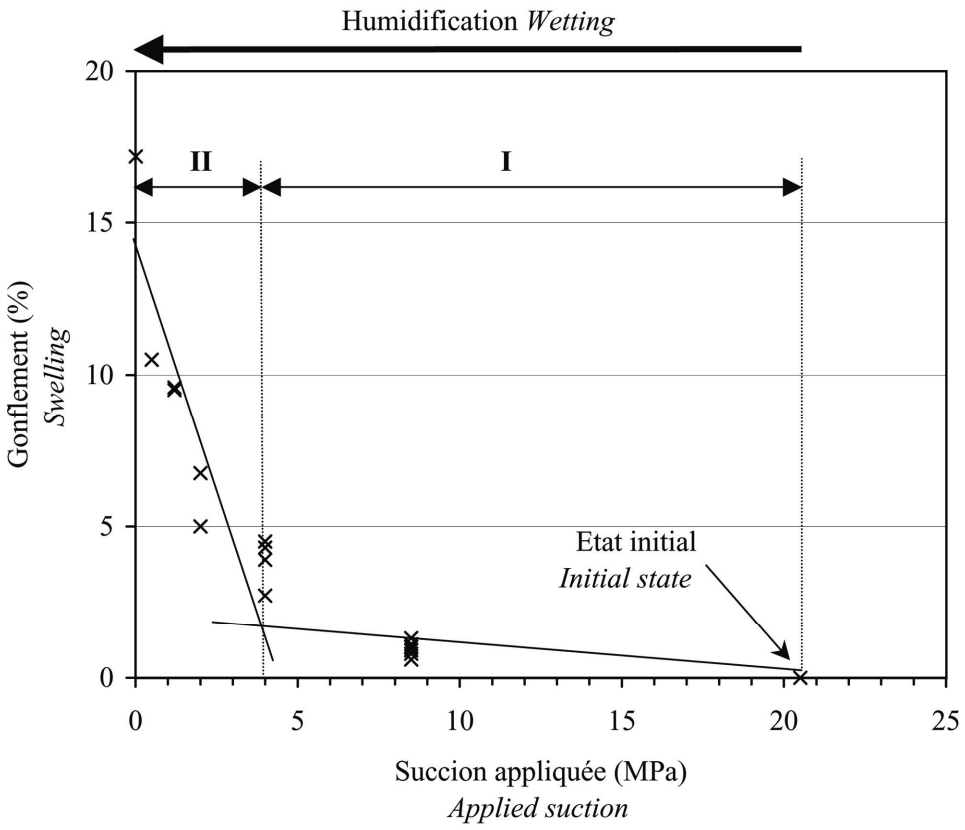

Figure IV.5. Gonflement en fonction de la succion appliquée (humidification).

Swelling as a function of the applied suction (wetting).

Cette figure peut être interprétée en considérant la structure interne des éprouvettes. En effet, il est généralement possible d'identifier deux phases de gonflement au cours de l'humidification d'un sol gonflant. Une phase initiale de comblement des pores de l'éprouvette par les argiles, ce qui induit une phase de faible gonflement macroscopique. Ensuite, le gonflement macroscopique devient significatif, les particules argileuses n'ayant plus d'espace disponible entre les agrégats pour gonfler. Dans le cadre des essais présentés ici, la limite entre ces deux domaines peut être fixée à une succion comprise entre 4 et 2 MPa environ. En effet, lorsque la succion est réduite de 4 à 2 MPa le gonflement augmente de 4 à 5 % alors que lorsque la succion est abaissée de 2 MPa jusqu'à 1,2 MPa, la valeur du gonflement passe de 5 à 10 % environ. Les modifications observées de la structure interne des éprouvettes lorsque la succion est réduite de 20 à 4 MPa confirme l'hypothèse du remplissage de la macrostructure par les particules argileuses (cf. III.4.3).

Ces informations peuvent être croisées avec les résultats de l'étude de la structure interne des éprouvettes conduite au chapitre précédent afin de préciser la succion pour laquelle la double structure initiale des éprouvettes est détruite par le processus d'humidification. Ceci permet de supposer que la structure des éprouvettes lorsque la succion appliquée est supérieure à 4 MPa est du type double

structure. Lorsque la succion descend au-dessous de cette valeur, les éprouvettes ont une structure interne homogène, voisine de ce qui avait été observé sous une succion nulle (cf. chapitre III).

Le processus de dessiccation imposé provoque une faible diminution de volume de l'éprouvette. Deux raisons peuvent être avancées pour l'expliquer. D'une part, dans ce domaine de succion, l'augmentation de succion provoque le départ de l'eau qui est adsorbée au niveau des espaces interfoliaires, le volume d'eau concerné par ce processus étant très limité et, d'autre part, la teneur en eau initiale proche de la limite de retrait atténue l'influence de la dessiccation sur le volume. On peut penser que dans ce domaine de succion la double structure est préservée, avec cependant une augmentation de la taille des macropores par retrait des argiles.

L'étude du gonflement initial des éprouvettes permet donc de préciser l'état de leur structure interne avant le début du chargement mécanique. Si la succion est inférieure à 4 MPa, la structure des éprouvettes est une structure homogène au début du chargement mécanique, alors qu'au-dessus de cette succion les éprouvettes ont une double structure au début du chargement mécanique.

Teneur en eau massique et degré de saturation des éprouvettes avant et après le chargement mécanique

L'objectif de cette partie est d'étudier la variation de ces deux paramètres au cours des différentes étapes de chacun des essais sachant que le degré de saturation initial est d'environ 36 % pour toutes les éprouvettes et la teneur en eau initiale de 15 %.

La première étape des essais est une phase d'imposition de la succion sous une pression verticale faible. À ce stade, le degré de saturation ainsi que la teneur eau des éprouvettes peuvent être estimés en utilisant les données de la courbe de rétention du matériau (cf. III.4.1). Ces valeurs, reportées sur les figures IV.6 et IV.7, correspondent au degré de saturation et à la teneur en eau des éprouvettes avant le début de la phase de chargement mécanique. Il est possible que ces valeurs diffèrent légèrement du degré de saturation et de la teneur en eau réelles des éprouvettes utilisées pour les essais mécaniques, l'imposition de succion se faisant dans ces essais en conditions œdométriques alors que la courbe de rétention a été déterminée en conditions de gonflement libre (cf. I.4.5.2).

La deuxième étape des essais est le chargement mécanique sous une succion constante, étape qui est suivie par un déchargement. Les valeurs de la teneur en eau et du degré de saturation à la fin de cette deuxième étape ont été rajoutées sur les figures IV.6 et IV.7. L'interprétation de ces dernières

données doit cependant tenir compte du fait que le chargement mécanique était légèrement différent dans chaque essai, ce qui peut altérer l'interprétation des données. En effet, pour une même succion imposée, le degré de saturation final dépendra aussi de la valeur de la charge maximale appliquée à l'éprouvette.

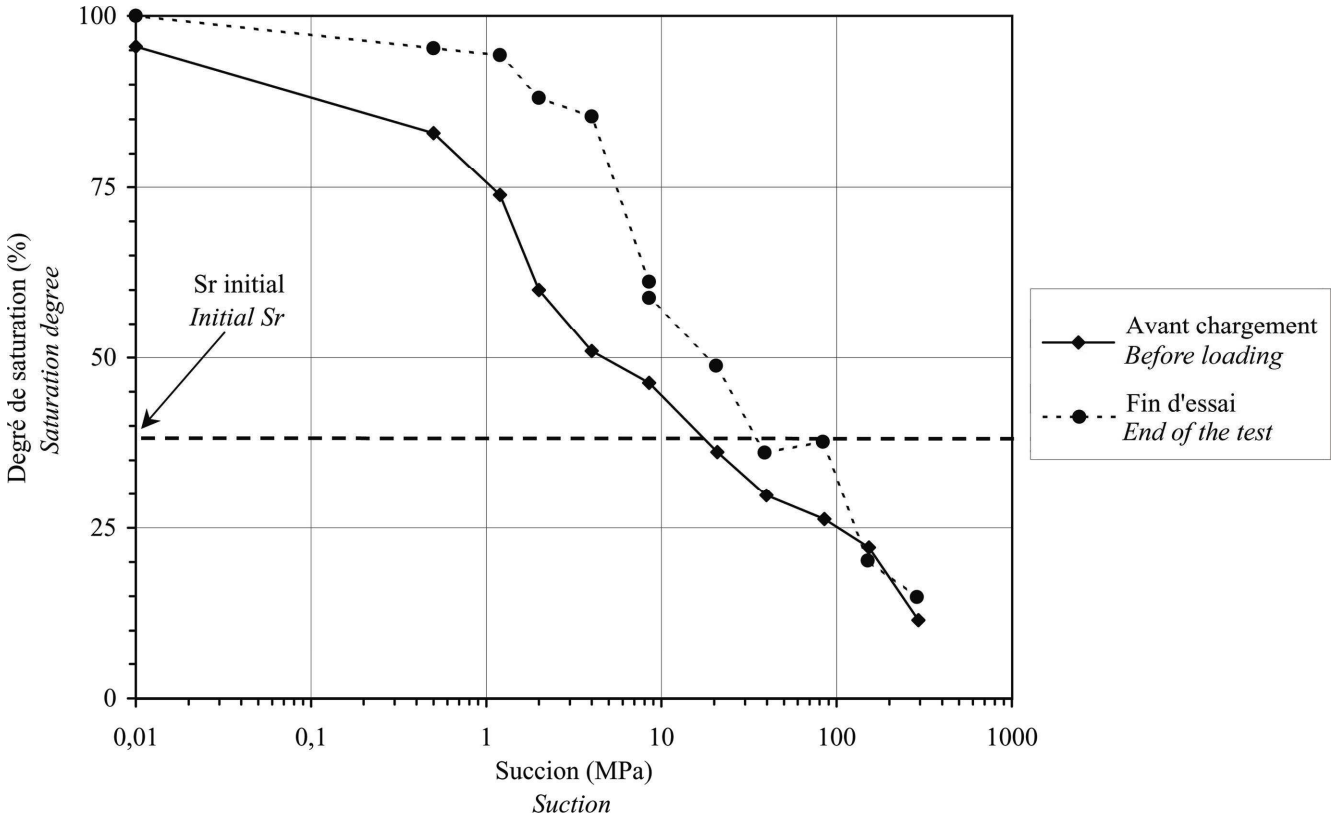

Figure IV.6. Variation du degré de saturation durant chaque essai.

Saturation degree variation during each test.

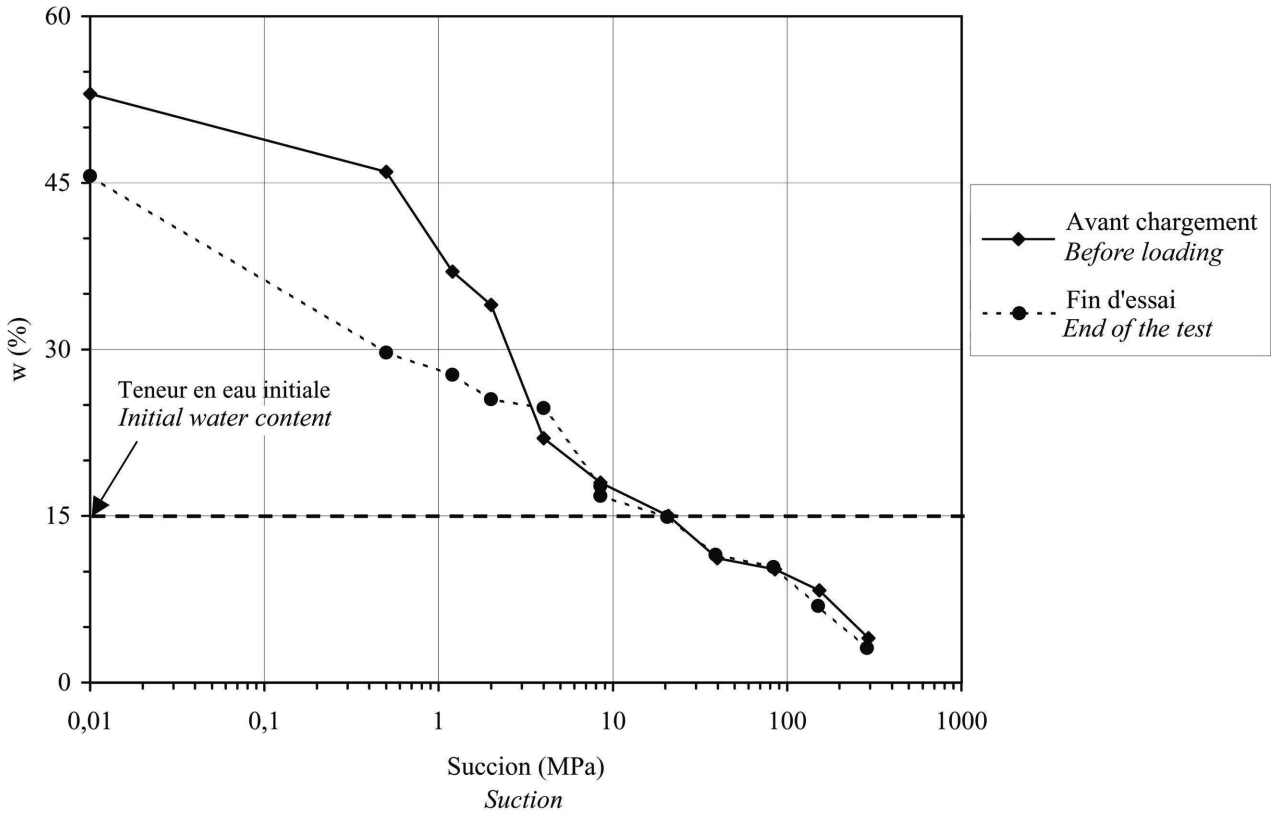

Figure IV.7. Variation de la teneur en eau massique au cours de chaque essai.

Mass water content variation during each test.

Les figures IV.6 et IV.7 permettent de commenter l'influence du chargement mécanique sur le degré de saturation et de la teneur en eau. Il est ainsi possible de mettre en évidence deux types de comportement en fonction de la succion appliquée. Lorsque celle-ci est supérieure à 4 MPa, le chargement mécanique ne produit pas de variation significative de la teneur en eau et induit une augmentation limitée du degré de saturation. En revanche, lorsque la succion imposée est inférieure à 4 MPa, la teneur en eau est réduite d'une manière importante par le chargement mécanique, le degré de saturation final étant lui augmenté fortement par le chargement, tendant vers la saturation.

Le cas de l'essai OWL2 (s = 4 MPa) est intéressant car il semble mettre en évidence un comportement intermédiaire entre les deux domaines ainsi définis : le degré de saturation final est élevé, alors que la teneur en eau n'a pas été modifiée de manière significative au cours de l'essai.

On peut donc conclure que si la succion appliquée est supérieure à 4 MPa le chargement mécanique se produit à teneur en eau constante avec une augmentation limitée du degré de saturation alors que si la succion est inférieure à 4 MPa, le chargement est associé à un départ d'eau et à une forte augmentation du degré de saturation.

Commentaires sur l'ensemble des données recueillies sur les caractéristiques des éprouvettes

Lorsque tous les résultats obtenus jusqu'à présent sont comparés (structure, courbe de rétention, courbes de compressibilité et caractéristiques des éprouvettes), on constate qu'à chaque fois deux domaines avec un comportement différent peuvent être mis en évidence en fonction de la succion appliquée. Ces observations permettent de formuler quelques hypothèses pour interpréter l'évolution de la teneur en eau et du degré de saturation des éprouvettes au cours des essais.

Dans le cas où la succion est inférieure à 4 MPa, la structure des éprouvettes est homogène. L'application d'un incrément de charge provoque une augmentation du degré de saturation et donc une baisse de succion. Cette baisse est compensée par le système d'imposition de la succion, ce qui se traduit par un départ d'eau. De plus, le tassement consécutif au chargement provoque une diminution de la proportion de vides de l'éprouvette. Ces considérations permettent ainsi d'expliquer la baisse de la teneur en eau et l'augmentation du degré de saturation constatées.

Dans la gamme des succions supérieures à 8,5 MPa, l'eau est surtout localisée au contact des particules argileuses au sein des agrégats, l'énergie avec laquelle est retenue l'eau étant très forte en raison des succions élevées. Les éprouvettes ayant une double structure, le chargement mécanique produit une diminution progressive du volume des macropores, les agrégats eux-mêmes n'étant que peu affectés par l'application du chargement mécanique (cf. I.4.4).

Le comportement mis en évidence lors de l'essai OWL2 (s = 4 MPa) est intermédiaire entre ce qui est observé dans les deux domaines précédents. Ceci est sans doute dû au fait que la succion de 4 MPa est relativement proche de la zone limite entre les deux types de comportement mis en évidence. Il est possible qu'au cours de l'essai la totalité des macropores initiaux a été écrasée, la structure finale se rapprochant donc d'une structure homogène. Cette hypothèse semble confirmée par l'augmentation très forte du degré de saturation induite par le chargement mécanique dans cet essai, cette augmentation étant associée à une faible modification de la teneur en eau de l'éprouvette au cours de l'essai.

Ces considérations permettent d'expliquer la disposition des courbes de compressibilité par rapport à la courbe de l'essai OWL6 (s = 0 MPa). Dans le cas où les éprouvettes sont très proches de la saturation, les courbes de compressibilité tendent à se confondre avec la courbe OWL6 (s = 0), ce qui est caractéristique du comportement des sols quasi saturés.

Variation des paramètres mécaniques en fonction de la succion imposée

Dans cette partie, les données mécaniques obtenues dans chacun des essais vont être commentées en fonction de la succion appliquée. Chacune des figures indiquera également si les éprouvettes ont été humidifiées ou desséchées avant le chargement mécanique.

Pente de déchargement κ

Le tableau IV.17 et la figure IV.8 permettent de constater que l'hypothèse qui consiste à supposer la pente κ constante sur l'ensemble de gamme de succion (cf. I.4.5.2) n'est pas applicable au matériau gonflant étudié. La valeur de κ diminue entre la saturation et une succion de 2 MPa, pour ensuite se stabiliser à une valeur d'environ 0,03 entre 2 et 83,6 MPa. Au-delà de cette succion, la pente κ diminue encore.

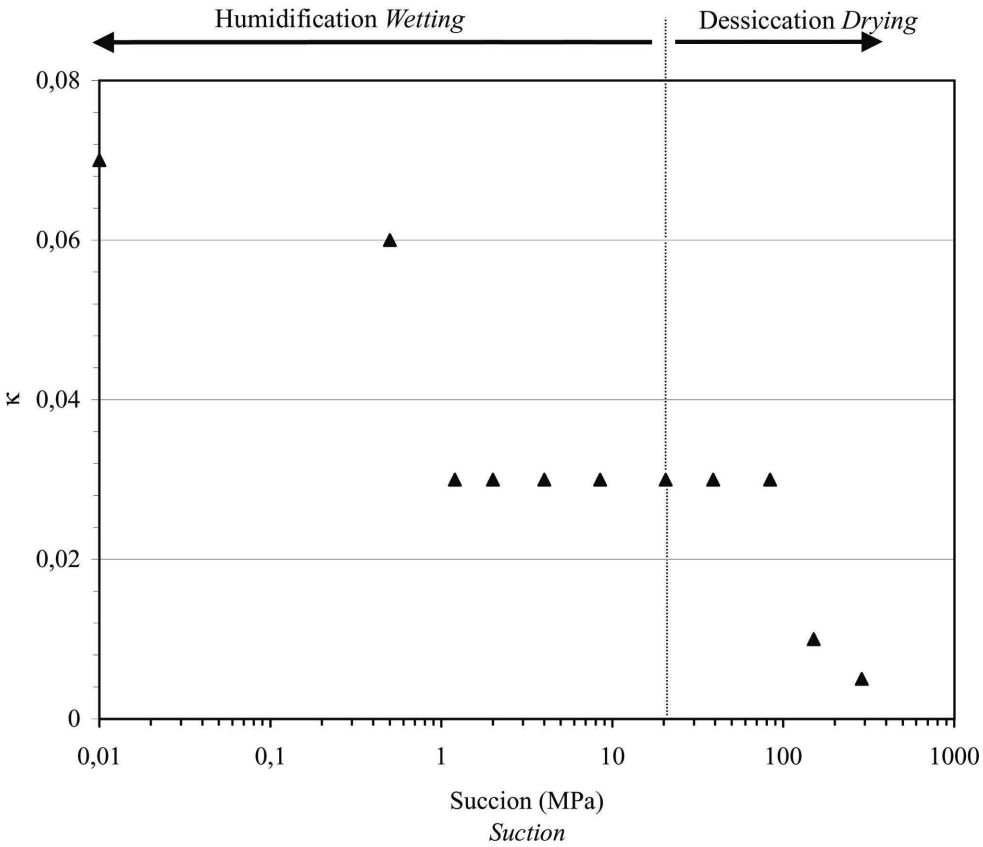

Figure IV.8. Variation de κ avec la succion.

Variation of κ versus suction.

Cependant, les variations constatées pour le matériau étudié sont relativement limitées, il est donc possible de supposer que l'hypothèse d'admettre la pente κ constante en fonction de la succion

n'affecte pas d'une manière significative la qualité de la modélisation du comportement des sols gonflants.

Pente de compression vierge λ(s)

Les données, issues du tableau IV.17, concernant la pente de compression vierge λ(s) ont été tracées en fonction de la succion appliquée sur la figure IV.9.

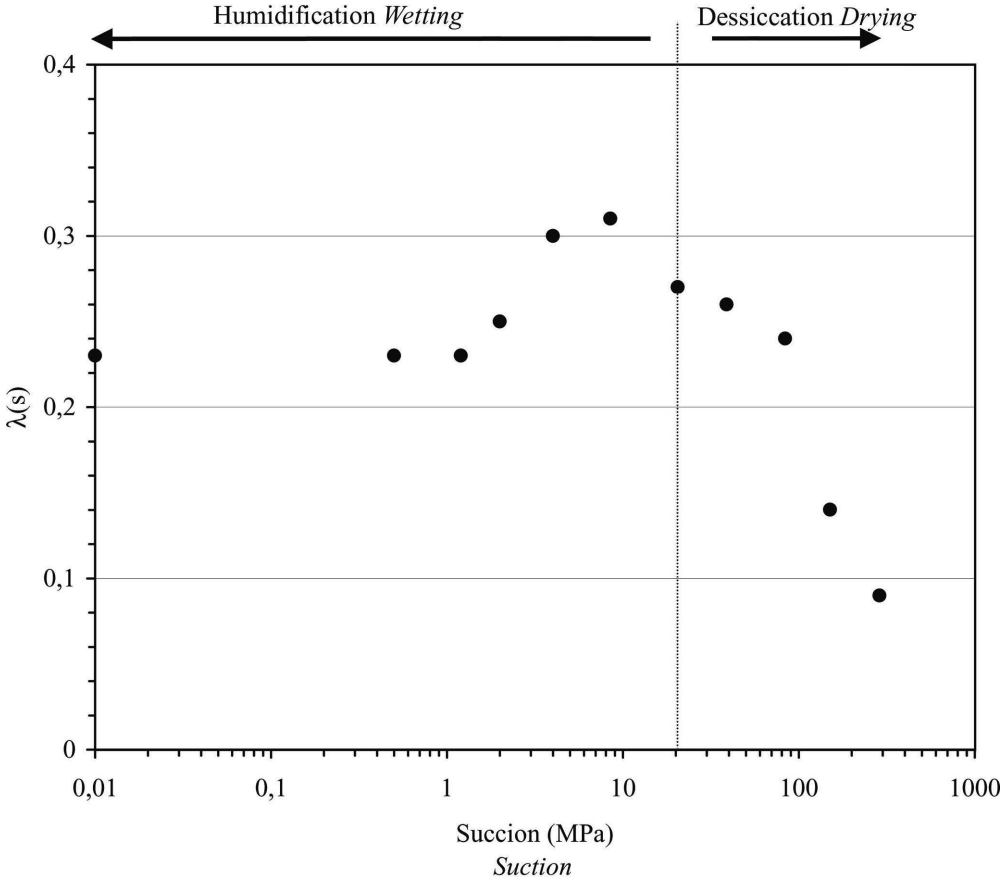

Figure IV.9. Variation de λ(s) avec la succion.

Variation of λ(s) versus suction.

Cette figure montre une variation non monotone de la pente λ(s). Le fait que les courbes de compressibilité des essais OWL3, OWL4 et OWL5 rejoignent la courbe de compressibilité obtenue dans l'essai OWL6 (succion nulle) se traduit ici par une pente λ(s) quasi-constante dans le domaine des succions comprises entre 0 et 2 MPa. Entre 2 et 4 MPa, la compressibilité du matériau augmente en passant d'environ 0,25 pour une succion de 2 MPa à 0,30 pour une succion de 4 MPa. Au-delà de 8,5 MPa, l'augmentation de succion se traduit par une décroissance très importante de la pente λ(s), ce qui signifie une diminution de la compressibilité des éprouvettes dans ce domaine de succion.

La variation de ce paramètre mise en évidence par la figure IV.9 correspond au cas n°2 de la figure I.8., la pente λ(s) étant maximale entre 4 et 8,5 MPa de succion. Ce type de variation du paramètre λ(s) est donc assez différent de ce qu'il est possible de trouver dans la bibliographie sur les sols gonflants (cf. fig. I.20). Il est aussi important de remarquer que la valeur de la pente λ(s) ne se stabilise pas au-delà d'une certaine valeur de succion. Le processus d'imposition de la succion, humidification ou dessiccation, ne semble pas influencer directement les résultats obtenus.

Pression de préconsolidation apparente $p_0(s)$

Les valeurs de la pression de préconsolidation apparente obtenues ont été reportées en fonction de la succion appliquée dans chaque essai sur la figure IV.10.

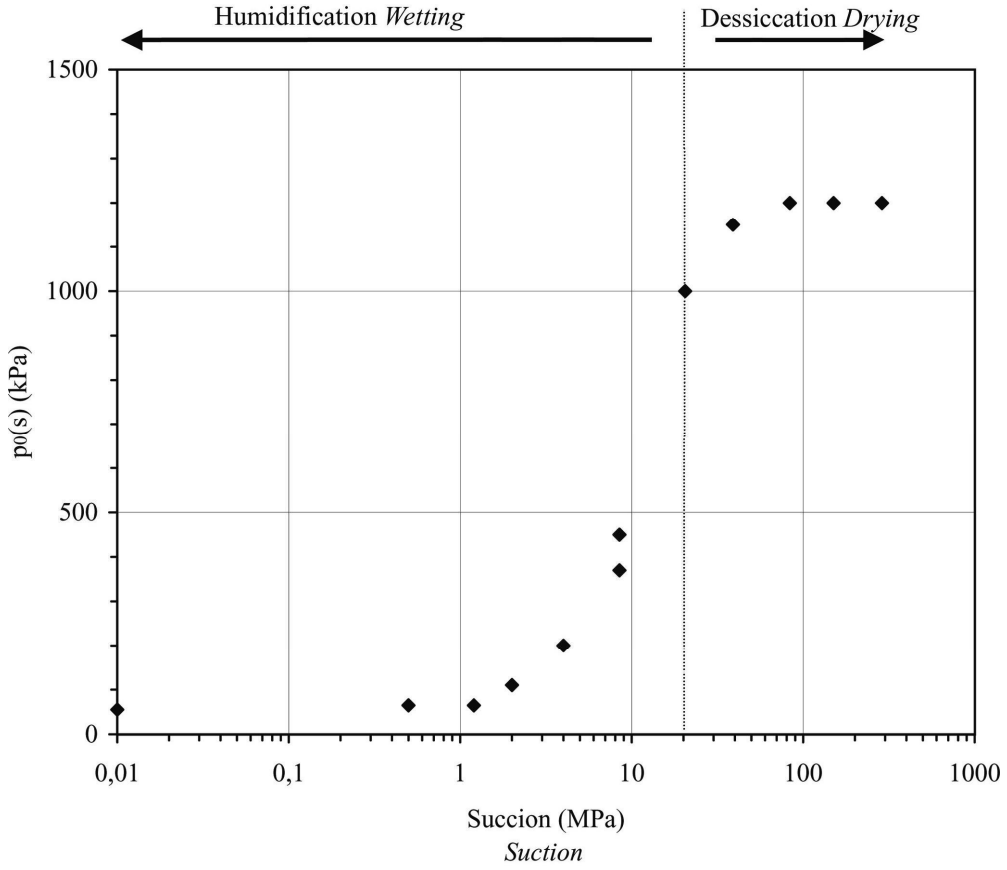

Figure IV.10. Variation de $p_0(s)$ avec la succion.

Variation of $p_0(s)$ versus suction.

L'interprétation des données de la figure IV.10 nécessite de faire la distinction entre les essais où la succion a été augmentée par rapport à la succion initiale et ceux où elle a été diminuée. Ceci permet d'étudier l'influence d'une humidification ou d'une dessiccation sur la pression de préconsolidation apparente.

L'augmentation de la succion de l'éprouvette ne provoque pas de modification importante de la pression de préconsolidation apparente. Ainsi, l'imposition d'une succion de 83,6 MPa induit une pression $p_0(s)$ de 1 200 kPa, soit 200 kPa de plus que la pression $p_0(s)$ initiale. Au-delà de cette succion, la valeur de $p_0(s)$ se stabilise.

Le processus d'humidification occasionne en revanche une très forte baisse de la pression de préconsolidation qui se déroule en deux étapes. Entre la succion initiale et 4 MPa environ, la pression $p_0(s)$ passe de 1 000 à 200 kPa. Au-dessous de 4 MPa de succion imposée, la pression $p_0(s)$ varie de 200 à 55 kPa.

Les résultats ci-dessus sont assez similaires aux données équivalentes dans la bibliographie, à savoir une stabilisation de la pression $p_0(s)$ au-dessus d'un certain seuil de succion, qui est ici de 83,6 MPa. Il est cependant intéressant de remarquer que, dans le cas du matériau étudié, la valeur de la pression $p_0(s)$ est quasiment constante entre 0 et 2 MPa de succion.

Commentaires

Les résultats obtenus montrent que le changement de structure qui a lieu lorsque la succion appliquée est inférieure à 4 MPa est associé à une modification du comportement mécanique des éprouvettes. À partir de cette observation, il est possible d'avancer quelques hypothèses sur la relation entre comportement mécanique et structure interne.

L'augmentation de la pente $\lambda(s)$ lorsque la succion est diminuée de 287,9 à 4 MPa serait le résultat de l'augmentation de la compressibilité des agrégats qui s'humidifient et gonflent. Dans le domaine des succions comprises entre 4 et 0 MPa, on peut supposer que les interactions entre particules d'argiles deviennent prédominantes et diminuent la compressibilité du matériau, cette hypothèse demandant cependant à être vérifiée.

Les observations ci-dessus tendent à démontrer le lien entre la structure interne initiale du matériau et de son évolution en fonction de la succion appliquée. Ces hypothèses sont appuyées par les résultats obtenus par Wheeler & Sivakumar (2000) sur un matériau non gonflant compacté (kaolin) (cf. I.3.3). Ces auteurs avaient obtenus en effet une relation entre la pente $\lambda(s)$ et la succion similaire à celle obtenue ici, les auteurs n'établissant malheureusement pas de corrélation entre le maximum de $\lambda(s)$ observé et les autres caractéristiques de leur matériau. De même, le point d'entrée d'air du

matériau étudié, situé entre 2 et 4 MPa de succion, est du même ordre de grandeur que la succion pour laquelle la pente $\lambda(s)$ est maximale, ce qui est similaire aux observations de Geiser (1999).

Le comportement mécanique semble donc dépendre des caractéristiques initiales des éprouvettes et de la méthode de préparation des éprouvettes retenue qui se traduit par une densité relativement faible et une structure interne particulière. Afin de vérifier ce point, quelques essais supplémentaires ont été réalisés pour caractériser l'influence du compactage initial ainsi que celle de la teneur en bentonite du mélange.

Essais complémentaires

L'évaluation de l'influence de la technique de préparation peut être faite de plusieurs manières, par exemple en modifiant les paramètres de compactage. L'option qui a été choisie pour ce travail a été d'entreprendre des essais sur le même matériau mais non compacté, c'est à dire sous forme de poudre ou de pâte. De même, il est possible que le choix des matériaux utilisés ait influencé les résultats. Ces essais ont donc été complétés par des essais réalisés pour déterminer les caractéristiques de chacun des constituants du mélange. Les caractéristiques générales de ces essais avaient été indiquées dans le tableau IV.14.

Influence du compactage initial

Trois essais ont été entrepris sur le mélange de limon de Xeuilley et de bentonite afin d'évaluer l'influence du compactage et de la teneur en eau initiale qui avaient été sélectionnées pour la réalisation des éprouvettes utilisées dans les essais précédents. Il s'agit de deux essais sur du matériau sous forme de poudre et un essai sur le matériau sous forme de pâte.

Pour les essais "poudre", deux dessiccateurs ont été employés, chacun imposant une succion différente. À l'intérieur de chacun d'entre eux 100 g de mélange initialement sec ont été introduits. La poudre a été laissée dans les dessiccateurs plusieurs mois avant son utilisation. Un essai œdométrique a ensuite été réalisé sur chacune des deux poudres, la succion imposée au cours du chargement mécanique étant identique à la succion imposée dans le dessiccateur. Les appareils utilisés sont les œdomètres à solutions salines basses pressions, la hauteur initiale de l'éprouvette testée étant d'environ 1 cm. Les succions imposées choisies correspondent, d'une part, à la succion initiale des éprouvettes compactées, c'est à dire 20,5 MPa (essai SP1), et d'autre part, à la succion maximale qui a été atteinte au cours des essais précédents, c'est à dire 287,9 MPa (essai SP2).

Un essai supplémentaire a été entrepris sur la pâte (essai R) : le mélange initialement totalement sec a été préparé à environ 1,5 fois sa limite de liquidité, puis introduit dans un œdomètre classique et chargé/déchargé mécaniquement.

Les résultats de ces essais sont reportés sur les figures IV.11, IV.12 et IV.13 où chacun de ces nouveaux essais a été comparé à l'essai réalisé sous la même succion mais avec une éprouvette compactée. Les principales caractéristiques des éprouvettes sont regroupées dans le tableau IV.18.

Tableau IV.18. Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour les essais sur matériau non compacté.

Characteristics of the used samples for the test conducted on non compacted material.

Essai	Succion appliquée (MPa)	w_i (%)	γ_{di} (kN.m^{-3})	Sr_i (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
R1	0	131,1	7,1	100	32,6	100
SP1	20,5	14,4	10,5	24,9	14,3	49,8
SP2	287,5	3,1	11,6	6,3	3,2	9,7

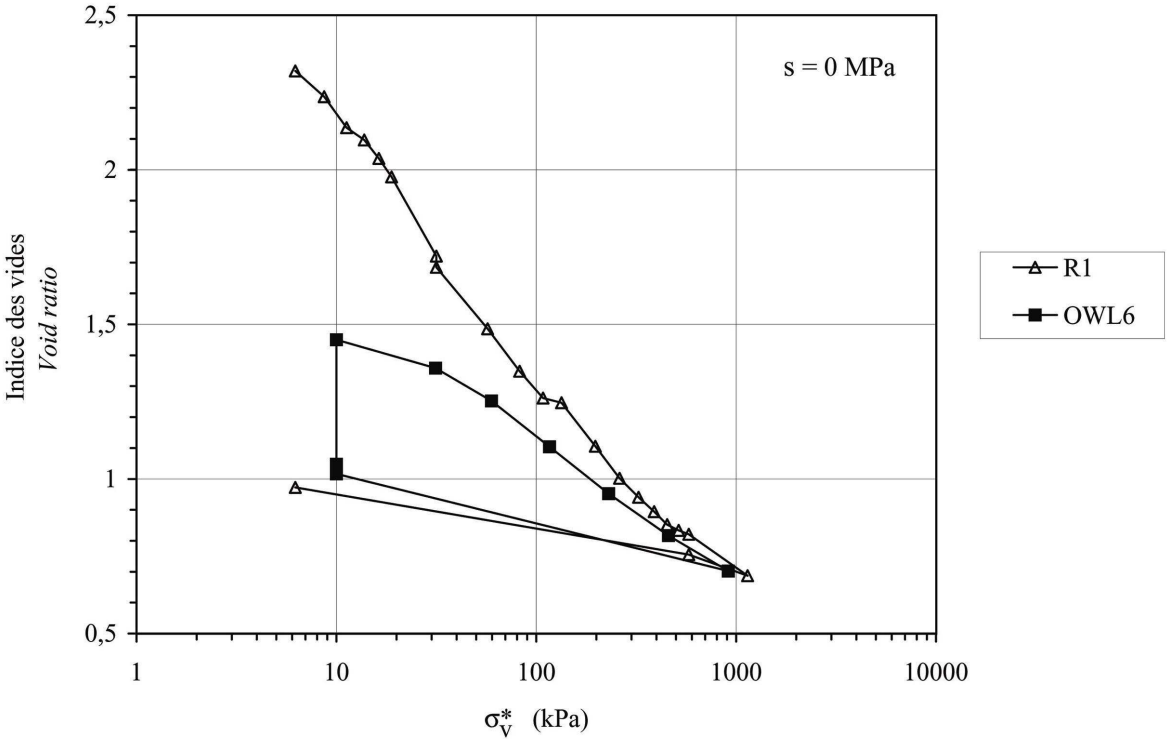

Figure IV.11. Courbes de compressibilité des essais R1 et OWL6 (succion nulle).

Compression curves of tests R1 and OWL6 (null suction).

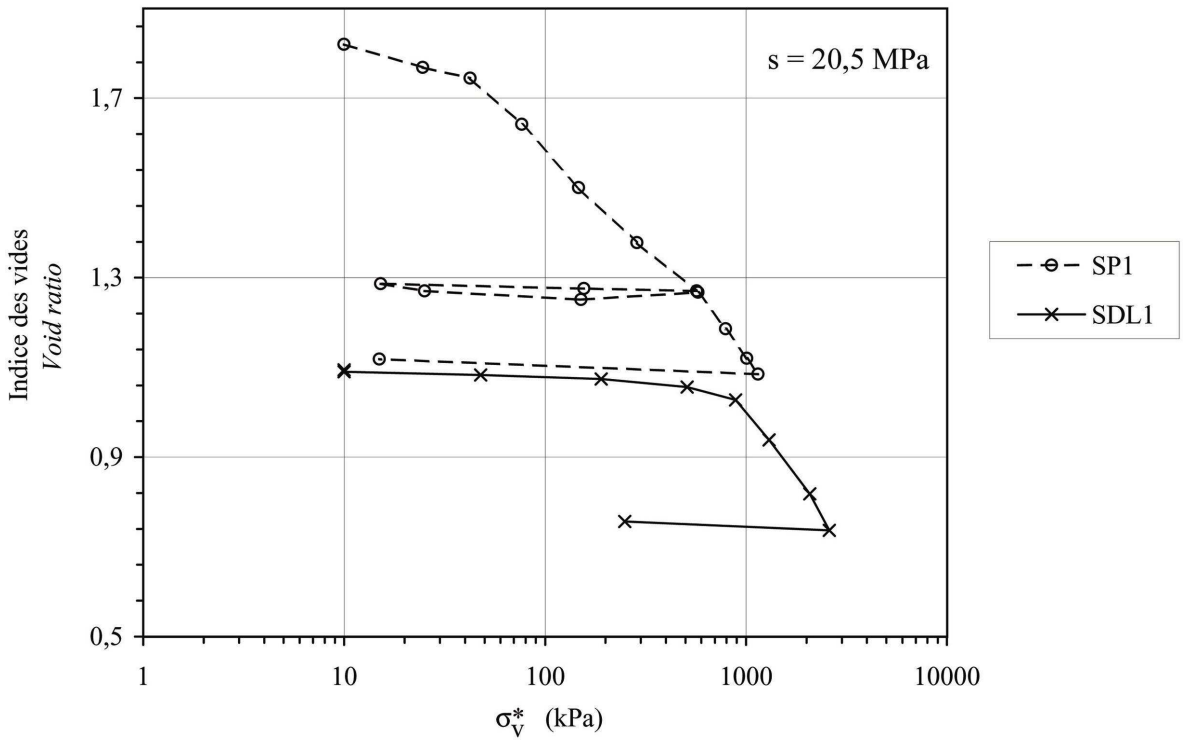

Figure IV.12. Courbes de compressibilité des essais SP1 et SDL1 (succion de 20,5 MPa).

Compression curves of tests SP1 and SDL1 (suction of 20.5 MPa).

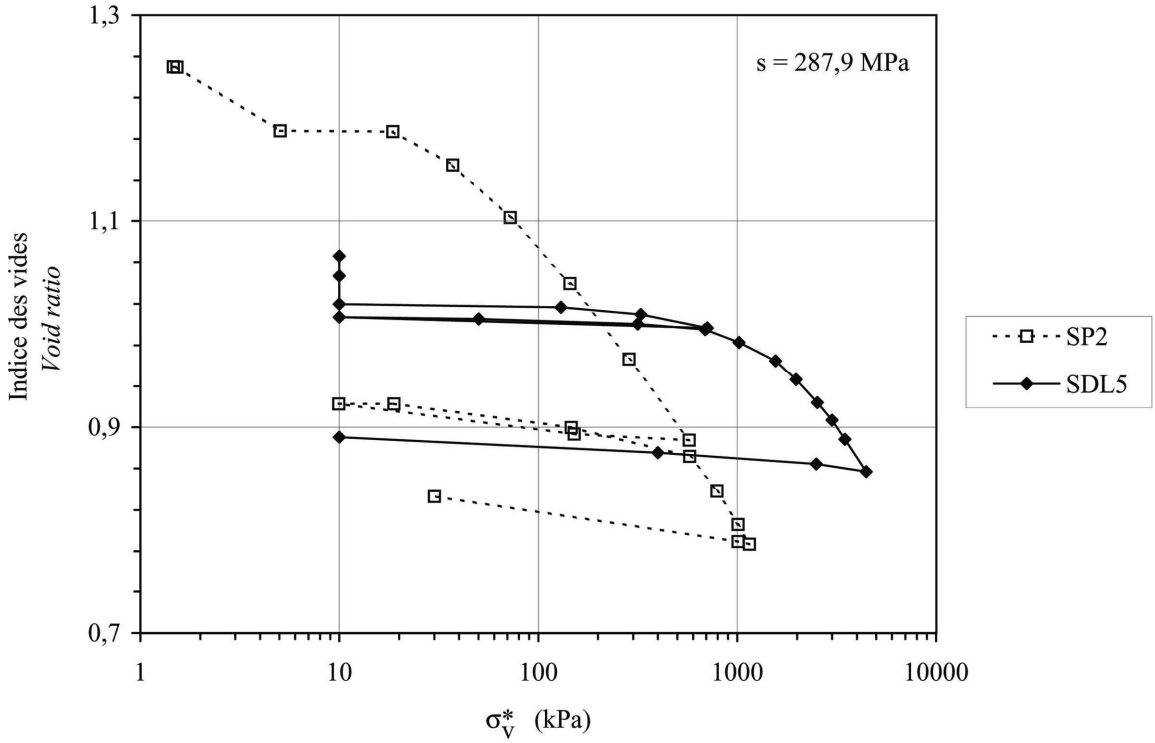

Figure IV.13. Courbes de compressibilité des essais SP2 et SDL6 (succion de 287,9 MPa).

Compression curves of tests SP2 and SDL6 (suction of 287.9 MPa).

Les courbes de compressibilité obtenues ont servi de support pour déterminer différents paramètres mécaniques qui ont été regroupés dans le tableau IV.19. Dans ce tableau, les paramètres mécaniques, déterminés sous les mêmes succions imposées mais avec des éprouvettes compactées, ont été ajoutés.

Tableau IV.19. Influence de l'état initial sur les paramètres mécaniques.

Influence of the initial state on mechanical parameters.

Essai	Succion appliquée (MPa)	κ	$\lambda(s)$	$p_0(s)$ (kPa)
R1	0	/	0,31	/
OWL6	0	0,07	0,23	55
SP1	20,5	0,01	0,24	40
SDL1	20,5	0,03	0,27	1 000
SP2	287,9	0,01	0,12	25
SDL5	287,9	0,005	0,09	1 200

Les essais SP1 et SP2 ont été réalisés sur du matériau non compacté initialement. Dans ces essais, les pressions de préconsolidation apparentes déterminées peuvent être dues à la mise en place du piston au-dessus de l'éprouvette. Il est possible que le capteur de force soit entré en contact avec le piston (cf. fig. II.10), induisant un léger compactage de l'éprouvette lors de la fermeture de l'enceinte. Les pressions exercées sont cependant faibles.

La comparaison des résultats des essais OWL6 et R1 montre que l'effet de la technique de préparation s'estompe au fur et à mesure que la pression verticale appliquée approche de la valeur de 1 000 kPa qui a servi à préparer l'éprouvette de l'essai OWL6. La valeur de $\lambda(s)$ est de l'ordre de 0,31.

La comparaison des essais SP1 et SDL1 (succion de 20,5 MPa) montre que la technique de préparation employée se traduit par l'existence d'un domaine surconsolidé dans le cas de l'essai SDL1. Lorsque la pression de 1 000 kPa est atteinte dans les deux essais, pression équivalente à la pression de compactage des éprouvettes, il est possible de considérer que la technique de préparation employée n'influence plus le résultat des essais, les deux courbes de compressibilité se rejoignant à partir de cette pression verticale. Un élément important est que la pente $\lambda(s)$ ne dépend pas de la technique de préparation employée bien que dans le cas de l'essai SDL1, l'éprouvette ait une structure interne de type double structure.

Dans le cas des essais réalisés sous une succion de 287,9 MPa, on constate que les deux courbes de compressibilité ne se rejoignent pas à partir d'une pression de 1 000 kPa comme précédemment.

Une hypothèse permettant d'expliquer ce point est de considérer le chemin qui a été suivi pour réaliser l'essai SDL5. Le matériau, initialement sous forme de poudre totalement sèche, a été humidifié à une teneur en eau de 15 %, puis compacté à 1 000 kPa, la succion étant alors d'environ 20 MPa. L'éprouvette a ensuite été desséchée jusqu'à une succion de 287,9 MPa puis chargée/déchargée mécaniquement. L'éprouvette a donc subi un cycle hydrique supplémentaire par rapport à l'essai SP2 où le matériau sec a été soumis directement à une succion de 287,9 MPa. Ce cycle hydrique est sans doute à l'origine des différences observées. Un élément intéressant est que, de nouveau, la pente $\lambda(s)$ n'est pas affectée par la technique de préparation dans ces essais.

Ces essais ont donc permis de caractériser l'influence de la technique de préparation. Dans le cas des essais pour des succions de 0 et 20,5 MPa elle se traduit par l'existence d'un domaine surconsolidé. Au-delà de 1 000 kPa, la technique de préparation n'influe plus sur le résultat de l'essai. En revanche, dans le cas des essais sous une succion de 287,9 MPa, la technique de préparation influe sur le résultat de l'essai quelle que soit la contrainte verticale appliquée, ce qui est sans doute dû au cycle hydrique imposée dans l'essai SDL5.

Un autre point intéressant est que si l'on considère l'évolution de la pente $\lambda(s)$ mesurée dans les essais R1 (entre 0 et 200 kPa de pression verticale, soit $\lambda(s) = 0,31$, SP1 et SP2, on constate globalement une décroissance de ce paramètre lorsque la succion augmente, ce qui correspond au cas classique des essais en milieu non saturé (cas n°4, fig. I.8.b).

Comportement mécanique des constituants du mélange

La densité initiale de l'éprouvette de l'essai OWL6 étant supérieure à celle de l'essai R1 en raison du compactage initial peut expliquer la compressibilité initiale plus forte dans l'essai R1. Lorsque la densité devient égale dans les deux essais (même indice des vides), la compressibilité du matériau devient équivalente dans les deux essais. Une hypothèse pour expliquer ce comportement est de relier la compressibilité du matériau aux interactions entre particules argileuses en considérant que sous une faible densité les interactions sont faibles, et donc la compressibilité plus importante qu'à forte densité. Pour que cette hypothèse soit valable il est nécessaire que le comportement mécanique du mélange sous une succion nulle soit voisin de celui de la bentonite pure, ce qui signifierait que le comportement à l'état saturé est bien contrôlé par les interactions entre particules argileuses.

Deux essais ont été entrepris pour évaluer la compressibilité à l'état saturé de la bentonite et du limon. Ces résultats sont utilisés pour évaluer l'influence de chacun des matériaux sur la compressibilité du mélange à l'état saturé.

Dans ces essais, la bentonite et le limon purs sous forme de poudre ont chacun été préparés à une teneur en eau donnée puis compactés statiquement sous une pression de 1 000 kPa dans une cellule œdométrique classique. Ensuite, les matériaux ont été humidifiés sous la charge du piston (5,5 kPa) et chargés et déchargés mécaniquement (AFNOR XP P 94-090-1, 1997). Les courbes de compressibilité obtenues sont indiquées sur la figure IV.14 où elles sont comparées à celle de l'essai OWL6. Les différents paramètres déterminés dans chaque essai sont donnés dans le tableau IV.20.

Tableau IV.20. Influence de la quantité de bentonite sur les paramètres mécaniques à l'état saturé.

Influence of the amount of bentonite the mechanical parameters under a null suction.

Essai	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	$\Delta H/H$ (%)	w_f (%)	κ	$\lambda(s)$	$p_0(s)$ (kPa)
X1	16,2	13,8	3,1	26,3	0,02	0,14	90
B1	20,1	14,5	37,2	49,2	0,08	0,22	75
OWL6	14,6	12,6	17,2	45,6	0,07	0,23	55

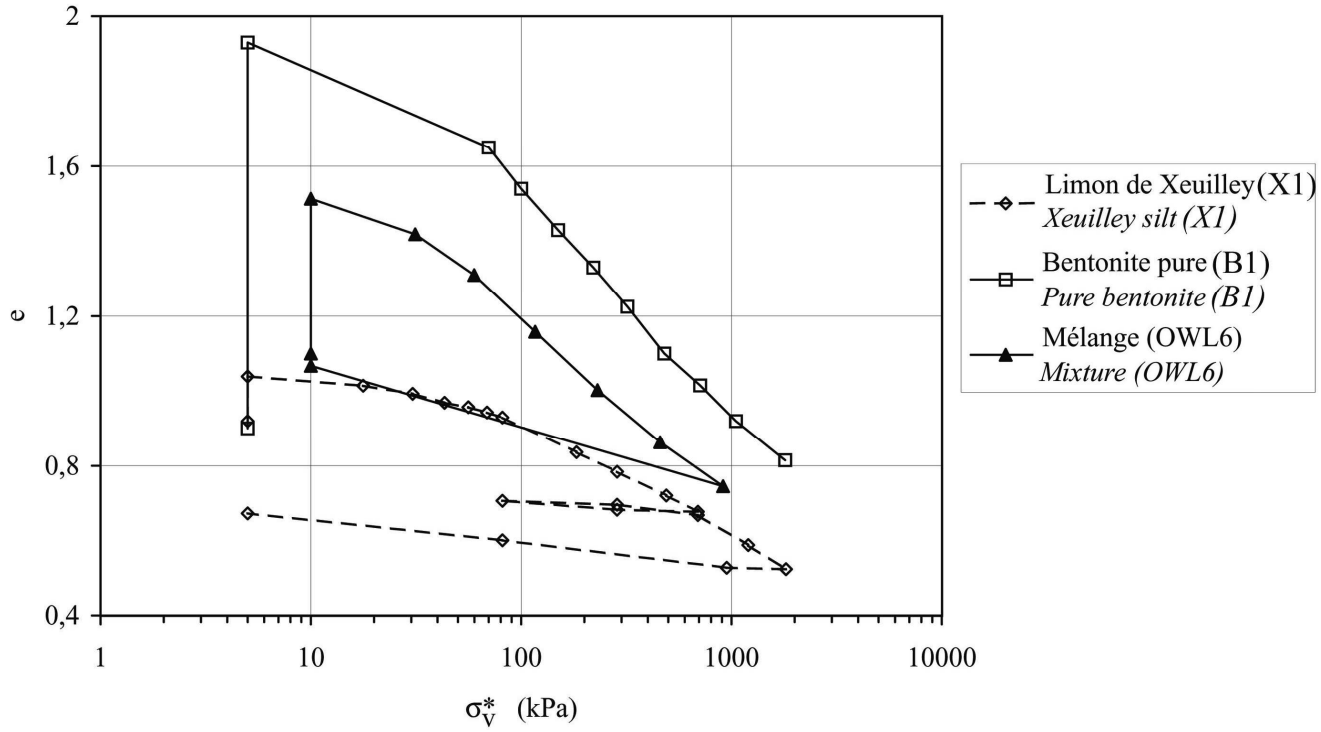

Figure IV.14. Compressibilité des différents constituants du mélange.

Compressibility of the mixture components.

Les résultats obtenus montrent tout d'abord que le limon de Xeuilley est un sol légèrement gonflant, ceci étant dû à la faible quantité de montmorillonite qu'il contient. Le gonflement de la bentonite pure est beaucoup plus important que celui du mélange. Il est intéressant de noter que la pente de compression vierge de la bentonite est sensiblement égale à celle du mélange.

Cette constatation confirme que la compressibilité à l'état saturé est bien contrôlée par les particules argileuses, l'influence de la fraction limoneuse pouvant être considérée comme négligeable. Cette constatation va dans le sens des observations réalisées lors de l'étude du mélange. Cela montre que l'hypothèse avancée d'une compressibilité contrôlée par les interactions argileuses est très probable dans le cas où la succion imposée est faible. Il serait intéressant de procéder à un essai œdométrique sur la bentonite pure mais préparée à 1,5 fois la limite de liquidité. Cela permettrait de comparer la compressibilité de la bentonite remaniée et du mélange remanié.

Conclusion

La caractérisation du comportement hydromécanique d'un matériau gonflant a été réalisée dans un intervalle de succion étendu, entre 0 et 300 MPa de succion. Le comportement qui a été mis en évidence fait apparaître clairement l'influence de la technique de préparation des éprouvettes testées. Ainsi, deux domaines en fonction de la succion appliquée peuvent être identifiés :

- au-dessous de 4 MPa, les éprouvettes ont une structure interne homogène au début du chargement. Dans ce domaine, la pente $\lambda(s)$ est indépendante de la succion mais légèrement inférieure à celle qui a été mesuré dans les essais où la succion imposée était supérieure à 4 MPa.
- au-dessus d'une succion de 4 MPa, les éprouvettes ont une double structure au début du chargement mécanique. Dans ce domaine, la pente $\lambda(s)$ diminue lorsque la succion est augmentée.

CARACTÉRISATION DES COUPLAGES HYDROMÉCANIQUES

Les résultats qui viennent d'être présentés ont été obtenus à partir d'essais qui n'incluaient pas de sollicitations hydriques complexes. Dans cette partie, quelques essais comportant de telles sollicitations vont être présentés avec pour objectif de caractériser les couplages hydromécaniques qui prennent place au sein d'un matériau gonflant compacté. Leurs principales caractéristiques ont été indiquées dans le tableau IV.13.

Tous les résultats d'essais qui vont être décrits ont été obtenus en utilisant le mélange de limon et de bentonite compacté à une pression de 1 000 kPa. Les éprouvettes testées ont toutes été préparées

selon la technique décrite au chapitre III. Pour la conduite des essais, les œdomètres osmotiques ainsi que les œdomètres à solutions salines basses pressions ont été utilisés.

Influence du chemin de contrainte sur le résultat d'un essai

Dans le cas des sols non saturés non gonflant, il est classiquement admis que le résultat d'un essai ne dépend pas du chemin de contrainte si la succion n'est pas augmentée au cours de l'essai (cf. chapitre I). Cette hypothèse a été testée dans le cas des sols gonflants en réalisant deux essais incluant une humidification en cours d'essai. Dans le but de donner un point de comparaison, deux essais supplémentaires incluant chacun une phase de dessiccation ont été entrepris. Les chemins de contrainte suivis sont indiqués sur la figure IV.15. Uniquement une partie des résultats des essais SDL2 et SLDWl sera exploitée dans cette partie, la partie qui n'est pas utilisée est indiquée entre parenthèses.

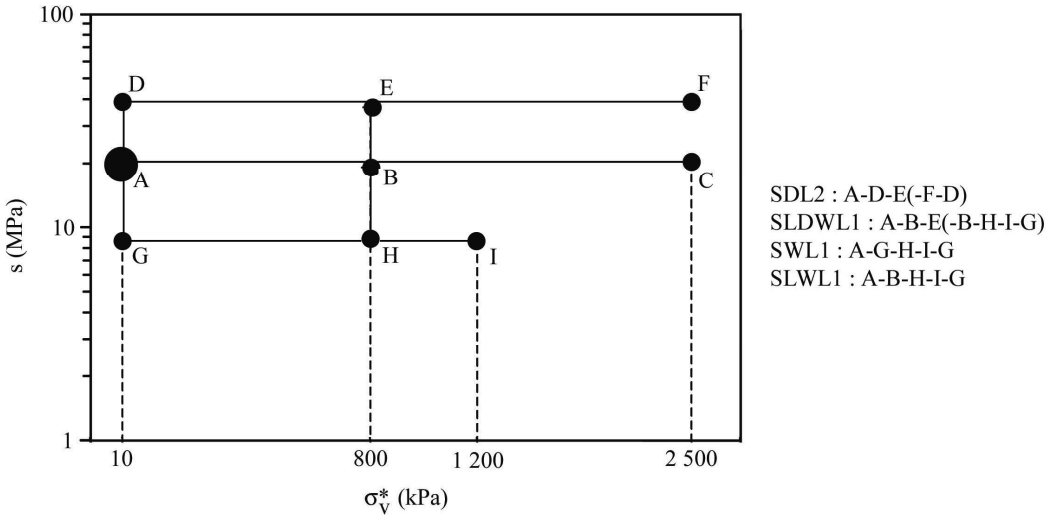

Figure IV.15. Essais réalisés pour caractériser le rôle du chemin de contrainte.

Performed tests to characterize the stress path influence.

Les essais SWL1 et SLWL comprennent tous les deux une phase de réduction de succion de la succion initiale vers 8,5 MPa. Dans le cas de l'essai SWL1, elle a lieu sous une pression verticale constante de 10 kPa alors que dans l'essai SLWL, la pression verticale est maintenue à 800 kPa durant l'humidification. La figure IV.15 permet de voir que les chemins suivis dans ces deux essais se rejoignent au point H, point où les indices des vides atteints dans chacun des essais peuvent être comparés (fig. IV.16). Les résultats obtenus montrent que l'indice des vides atteint dépend du chemin de contrainte qui a été suivi, les différences constatées étant très supérieures aux incertitudes sur l'indice des vides.

Afin de compléter ces résultats et de donner une base de comparaison, deux essais comprenant une dessiccation, chacun sous une pression verticale différente, ont été comparés. Il s'agit des essais SDL2 et SLDWL qui comprennent tous les deux une phase d'imposition d'une succion de 38,9 MPa, sous une pression verticale de 10 et 800 kPa respectivement. Les chemins de contrainte suivis dans chacun de ces essais passent tous les deux par le point E (fig. IV.15), point pour lequel les indices des vides atteints dans chacun des essais peuvent être comparés. Il apparaît ainsi que l'indice des vides dans l'essai SDL2 est significativement supérieur à celui dans l'essai SLDWL (fig. IV.17).

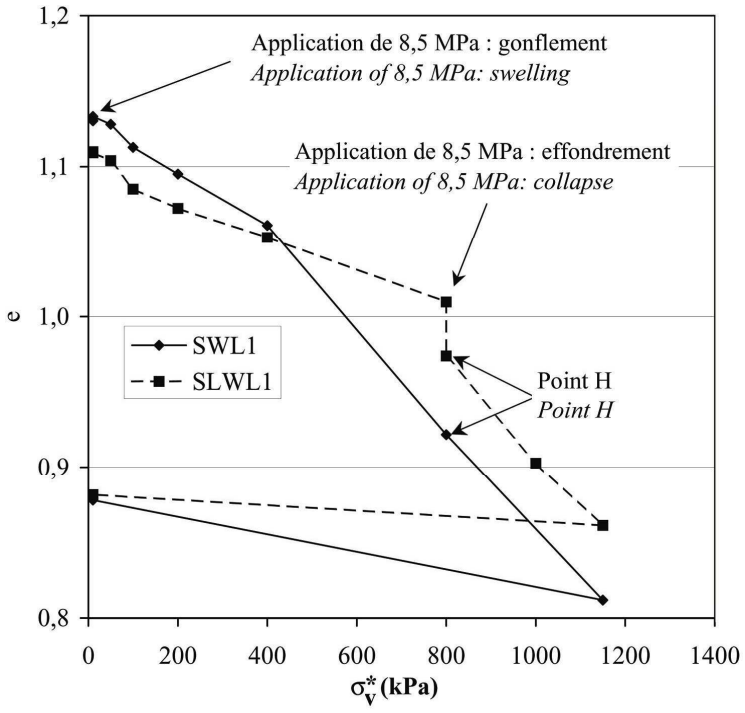

Figure IV.16. Comparaison des résultats des essais SWL1 et SLWL41.

Comparison of the obtained results in tests SWL1 and SLWL1.

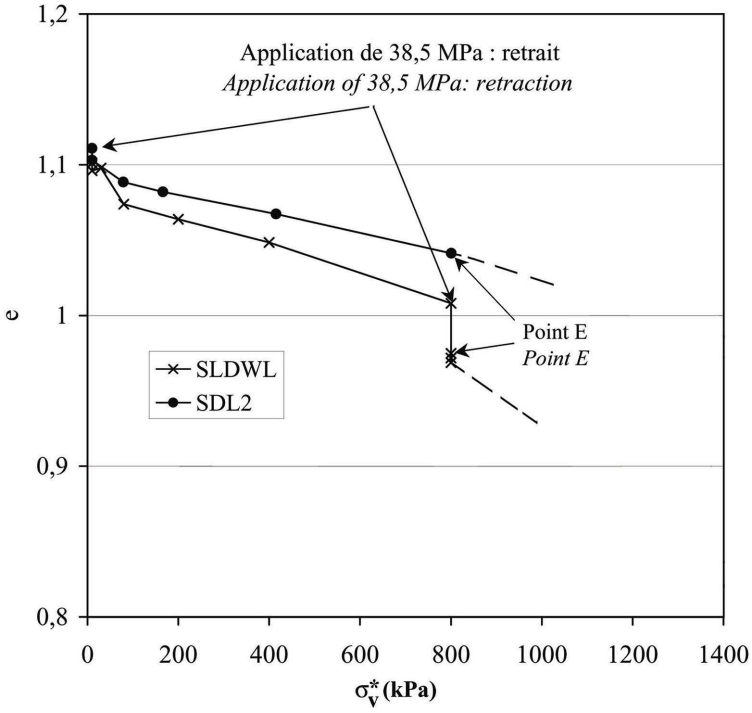

Figure IV.17. Comparaison des essais SLDWL et SDL2.

Comparison of a part of tests SLDWL and SDL2.

Les différences constatées sont du même ordre de grandeur pour les deux types de chemin suivis. Ce résultat est très intéressant car il marque une différence importante entre les sols gonflants et non gonflants. Pour ces derniers en effet, le résultat d'un essai est indépendant du chemin de contrainte suivi si la succion n'est pas augmentée au cours d'un essai (Alonso *et al.*, 1990 ; Vicol, 1990). Ces quatre essais permettent de voir que, quel que soit le type de sollicitation imposée à un matériau gonflant, humidification ou bien dessiccation, l'indice des vides atteint au cours d'un essai dépend du chemin de contrainte suivi. Ces conclusions rejoignent les résultats obtenus par Villar (1999) (cf. I.4.5.2).

Influence d'un cycle hydrique

Les cycles d'humidification/dessiccation provoquent des déformations irréversibles associées à des modifications de la structure interne des matériaux (cf. chapitre I). Il n'existe cependant que peu de résultats dans la bibliographie sur la relation entre ce type de sollicitation hydrique et le comportement mécanique d'un matériau gonflant. Dans cette partie, plusieurs essais intégrant un cycle hydrique conduit sous différentes charges verticales seront introduits pour donner quelques éléments de réponse à cette question.

Chemins de contrainte suivis

Les chemins de contrainte des essais qui seront présentés dans cette partie sont reportés sur la figure IV.18. Les essais SLWL et SLDWL ont déjà été partiellement interprétés précédemment. Les cycles qui ont été réalisés l'ont été dans la gamme de succion comprise entre 8,5 et 38,9 MPa.

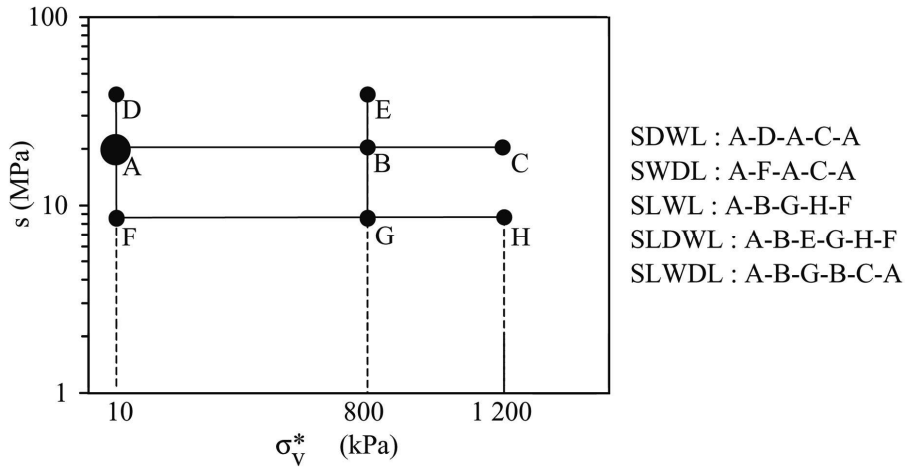

Figure IV.18. Chemins de contrainte des essais incluant un cycle hydrique.

Stress paths followed during the tests that include a suction cycle.

Cycle hydrique sous faible charge

Les essais SWDL et SDWL incluent un cycle hydrique sous une faible pression verticale avant un chargement mécanique sous une succion imposée constante de 20,5 MPa. Dans le cas de l'essai SWDL, une succion de 8,5 MPa est d'abord appliquée. Après équilibre, la succion est ramenée à 20,5 MPa. Dans l'essai SDWL, l'éprouvette est soumise à une dessiccation par l'imposition d'une succion de 38,9 MPa, la succion étant ensuite ramenée à 20,5 MPa. Dans les deux essais les cycles hydriques ont lieu sous une pression verticale maintenue constante de 10 kPa. Le chargement mécanique qui suit le cycle est effectué dans les deux essais sous une succion imposée constante de 20,5 MPa. Les caractéristiques initiales et finales des éprouvettes dans chacun des essais sont reportées dans le tableau IV.21.

Tableau IV.21. Paramètres des éprouvettes des essais SDWL et SWDL.

Parameters of the samples in tests SDWL and SWDL.

Essai	w_i (%)	γ_{di} (kN.m^{-3})	Sr_i (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
SDWL	14,7	12,7	35,5	14,6	39,7
SWDL	14,9	12,6	35,4	14,3	38,3

La variation de l'indice des vides en fonction du temps dans chacun de ces essais est donnée sur la figure IV.19. Dans le cas de l'essai SWDL, la réduction de succion imposée provoque un gonflement qui est suivi d'un retrait de l'éprouvette lorsque la succion de 20,5 MPa a été appliquée. Le cycle hydrique a provoqué l'apparition de déformations irréversibles de type gonflement. Dans l'essai SDWL, la dessiccation a induit un retrait de l'éprouvette, suivie d'un gonflement lors l'imposition de la succion de 20,5 MPa. La figure IV.19 permet de voir que le cycle hydrique a provoqué l'apparition de déformations irréversibles de type retrait.

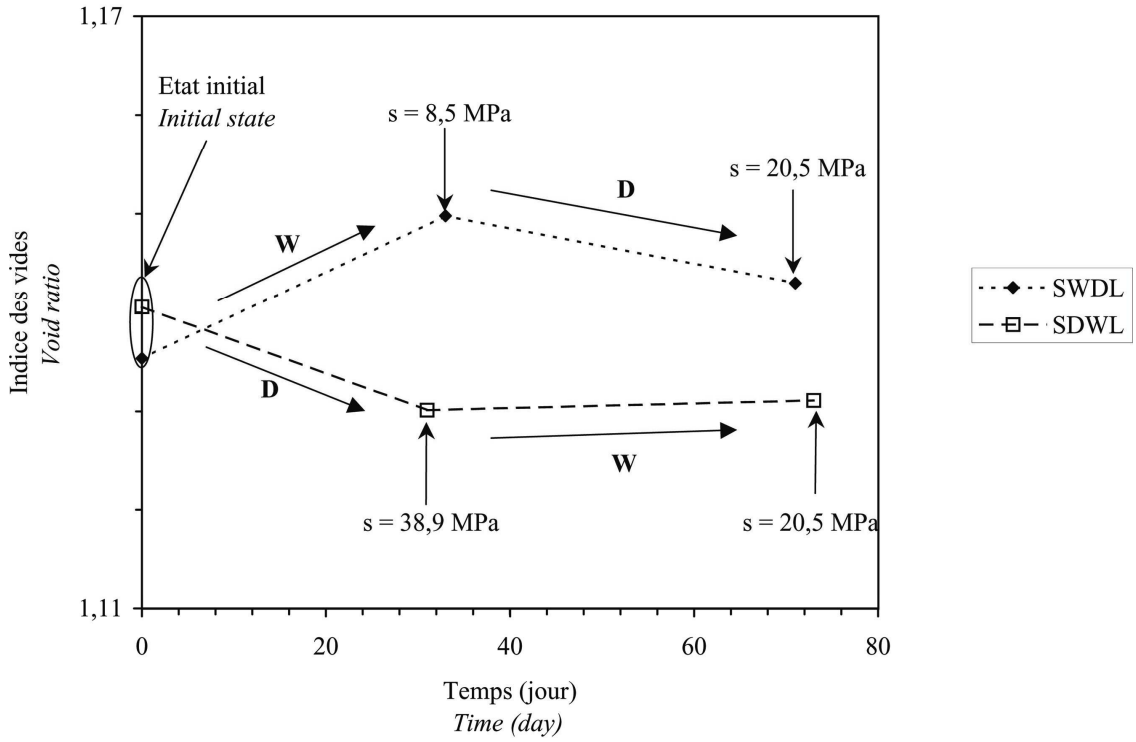

Figure IV.19. Variations de l'indice des vides au cours d'un cycle hydrique conduit sous une pression verticale de 10 kPa (D : dessiccation ; W : humidification).

Void ratio variation during the suction cycle performed under a vertical pressure of 10 kPa (D: drying; W: wetting).

On peut donc conclure qu'un cycle d'humidification/dessiccation provoque l'apparition de déformations irréversible de type gonflement alors qu'un cycle de dessiccation/humidification induit des déformations irréversibles de type retrait. La question se pose de caractériser les conséquences de chacun de ces cycles hydriques sur le comportement mécanique du matériau.

Tableau IV.22. Paramètres mécaniques déterminés dans les essais SDWL, SWDL et SDL1.

Mechanical parameters determined in tests SDWL, SWDL and SDL1.

Essai	κ	λ(s)	p_0(s) (kPa)
SDWL	0,03	0,19	1 100
SWDL	0,03	0,29	950
SDL1	0,03	0,27	1 000

Après le cycle hydrique les deux éprouvettes ont été chargées et déchargées mécaniquement sous une succion imposée constante de 20,5 MPa. Les deux courbes de compressibilité obtenues sont reportées sur la figure IV.20. Les paramètres mécaniques déterminés à partir de ces courbes sont reportés dans le tableau IV.22 où ils sont comparés à ceux déterminés dans l'essai SDL1 dans lequel l'éprouvette était chargée sous une succion imposée de 20,5 MPa mais sans cycle hydrique préalable.

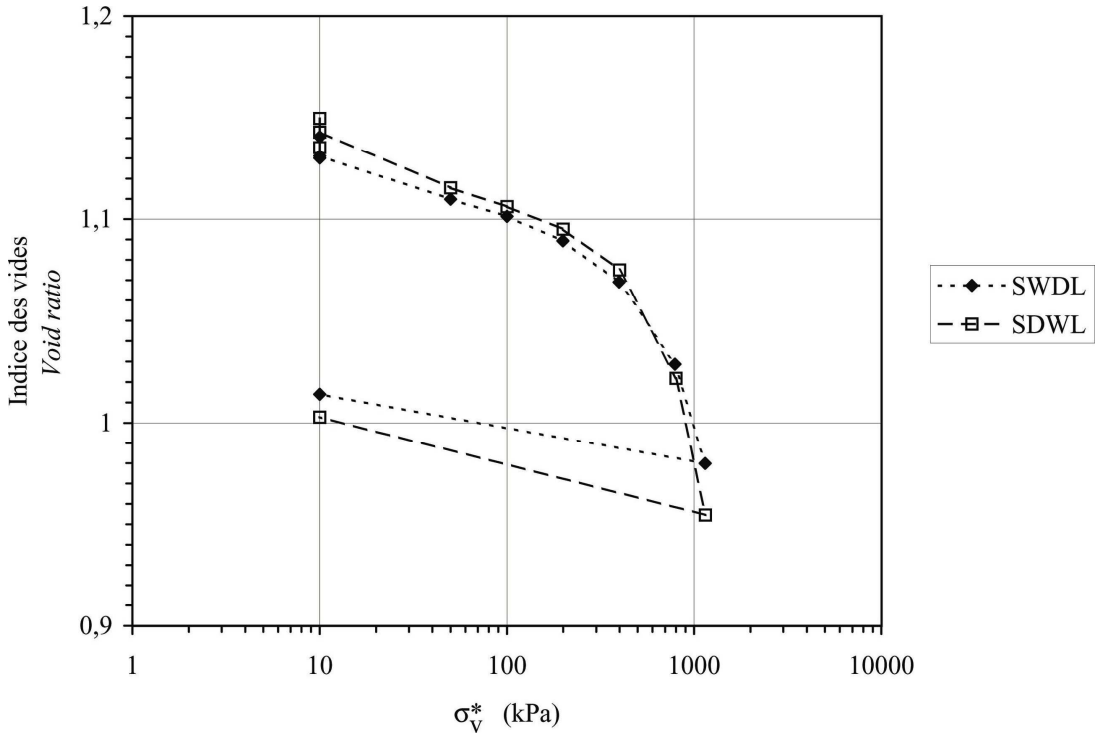

Figure IV.20. Courbes de compressibilité des éprouvettes ayant subi un cycle hydrique sous une pression verticale de 10 kPa.

Compression curves of samples submitted to a suction cycle under a vertical pressure of 10 kPa.

Ces résultats montrent que les cycles hydriques conduits n'affectent pas la valeur de la pente κ. En revanche, le cycle de dessiccation/humidification tend à réduire la pente λ(s) de manière significative au contraire du cycle d'humidification/drainage qui augmente légèrement la pente λ(s). Le même type d'observation peut être fait sur la pression p_0(s) qui est diminuée par un cycle d'humidification/dessiccation et augmentée par un cycle de dessiccation/humidification.

Cycle hydrique sous forte charge

Essai SLWDL

Dans l'essai SLWDL, l'éprouvette a été chargée jusqu'à une pression verticale de 800 kPa sous une succion constante de 20,5 MPa. Ensuite, sa succion a été diminuée jusqu'à 8,5 MPa puis ramenée à 20,5 MPa. Après équilibre, le chargement mécanique a été poursuivi jusqu'à la pression maximale atteignable dans les appareils œdométriques basses pressions. Le résultat de cet essai est reporté sur la figure IV.21 et les caractéristiques de l'éprouvette dans le tableau IV.23.

Tableau IV.23. Caractéristiques de l'éprouvette utilisée lors de l'essai SLWDL.

Characteristics of the used sample in test SLWDL.

Essai	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	Sr_i (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
SLWDL	15,4	12,8	37,7	15,0	42,8

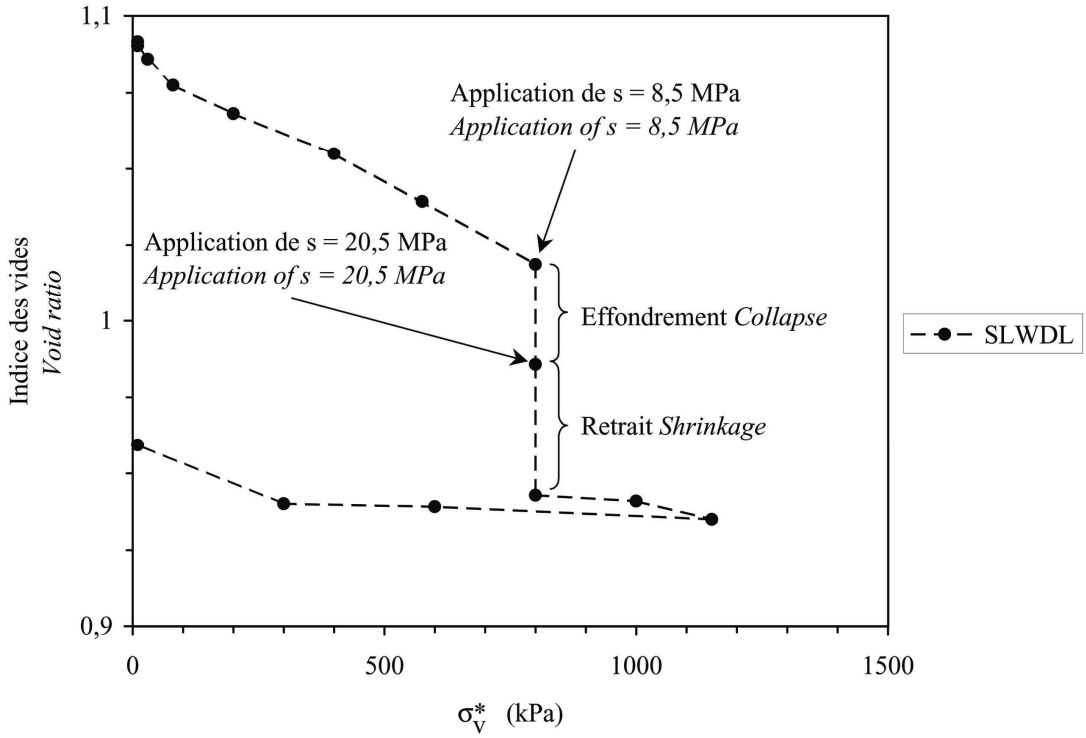

Figure IV.21. Courbe de compressibilité de l'essai SLWDL.

Compressibility curve of test SLWDL.

La réduction de succion de 20,5 à 8,5 MPa a provoquée un effondrement de l'éprouvette, ce qui est similaire à ce qui avait été observé dans l'essai SLWL (fig. IV.16). Le retour vers la succion initiale s'est accompagné d'une rétraction importante de l'éprouvette. Le cycle d'humidification/dessiccation a

donc entraîné la création de déformations irréversibles de type retrait. Ce résultat peut être comparé à celui de l'essai SWDL où le même cycle hydrique, mais réalisé sous une pression verticale de 10 kPa, avait conduit à des déformations irréversibles de gonflement. Ceci montre que le type de déformations irréversibles généré par un cycle hydrique dépend de la pression verticale appliquée pendant le cycle. Ces conclusions sont similaires à celles émises par Alonso *et al.* (1995) (cf. I.4.5.2).

Après ce cycle hydrique, l'éprouvette se comporte de manière élastique durant la fin du chargement/déchargement mécanique. Le cycle hydrique d'humidification/dessiccation a donc provoqué une augmentation de la pression $p_0(s)$ si l'on compare le résultat de l'essai SLWDL à celui de l'essai SDL1 (chargement sous une succion de 20,5 MPa mais sans cycle hydrique).

Essai SLDWL

Dans cet essai l'éprouvette a été chargée mécaniquement jusqu'à 800 kPa, la succion imposée étant égale à 20,5 MPa. Ensuite un cycle hydrique divisé en deux étapes a été entrepris sous une pression verticale maintenue constante de 800 kPa. La première partie du cycle correspond à une dessiccation jusqu'à une succion de 38,9 MPa suivi d'un retour à la succion de 20,5 MPa. Ensuite une succion de 8,5 MPa a été imposée, ce qui correspond à la deuxième partie du cycle hydrique. Après cette phase, l'éprouvette a été chargée et déchargée mécaniquement, sous une succion imposée de 8,5 MPa. Les caractéristiques de l'éprouvette sont reportées dans le tableau IV.24.

Tableau IV.24. Caractéristiques de l'éprouvette utilisée lors de l'essai SLDWL.

Characteristics of the used sample in test SLDWL.

Essai	w_i (%)	γ_{di} (kN.m^{-3})	Sr_i (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
SLDWL	15,4	12,9	38,3	16,6	49,3

La figure IV.22 donne la variation de l'indice des vides durant le cycle hydrique. L'augmentation de succion de 20,5 à 38,9 MPa a provoqué un retrait de l'éprouvette. Le retour à la succion de 20,5 MPa s'est accompagné d'un léger gonflement du matériau. La première partie du cycle hydrique a induit un retrait irréversible du matériau.

Le passage d'une succion imposée de 20,5 à 8,5 MPa s'accompagne d'un effondrement de l'éprouvette. Cet essai peut être comparé à l'essai SLWL dans lequel la réduction de succion de 20,5 vers 8,5 MPa s'accompagnait aussi d'un effondrement du matériau. La dessiccation imposée dans le cas de l'essai SDWL n'a donc pas affecté la tendance à l'effondrement du matériau, elle a juste réduit

son amplitude : dans le cas de l'essai SLWL, l'humidification provoquait une réduction de l'indice des vides de l'ordre de 0,06 (fig. IV.16).

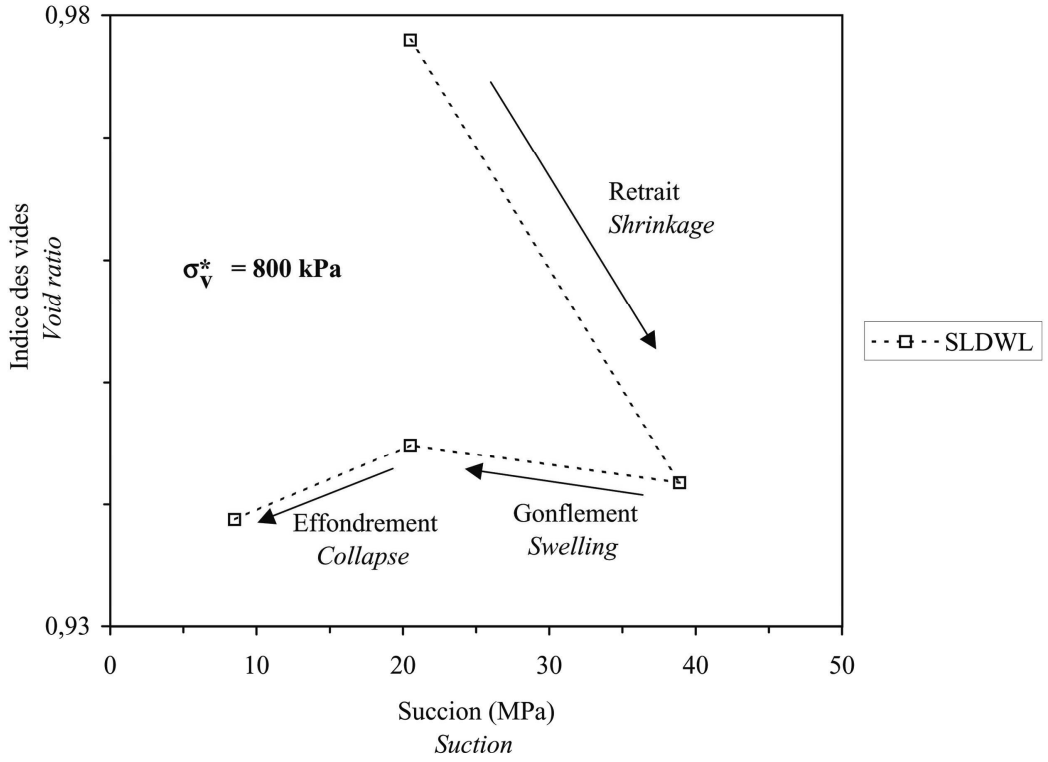

Figure IV.22. Variation de l'indice des vides au cours du cycle hydrique de l'essai SLDWL sous une pression verticale constante de 800 kPa.

Void ratio variation during the drying/wetting cycle performed under a constant vertical pressure of 800 kPa in test SLDWL.

Le résultat de l'essai SLDWL est comparé à ceux des essais SWL1 et SLWL sur la figure IV.22 car le chargement mécanique final de l'essai SLDWL a été réalisé sous une succion de 8,5 MPa comme dans les essais SWL1 et SLWL. Cette figure montre que dans la phase finale de chargement/déchargement, l'éprouvette se comporte de manière plastique. Les valeurs des pentes λ(s) déterminées dans chacun de ces essais peuvent être comparées entre elles puisqu'elles correspondent toutes à un chargement vierge sous une succion de 8,5 MPa (tab. IV.25). La partie des courbes ayant servi de support à cette détermination est indiquée sur la figure IV.22. Il apparaît que la dessiccation imposée dans le cas de l'essai SLWDL a pour conséquence une diminution de la pente λ(s) qui a été déterminée dans la phase finale de chargement sous une succion de 8,5 MPa.

Tableau IV.25. Influence du chemin de contrainte suivi sur la pente λ(s) lors d'un chargement mécanique (s = 8,5 MPa).

Influence of the followed stress path on slope λ(s) during a mechanical loading (s = 8.5 MPa).

Essai	λ(s)

SWL1	0,31
SLWL	0,30
SLDWL	0,19

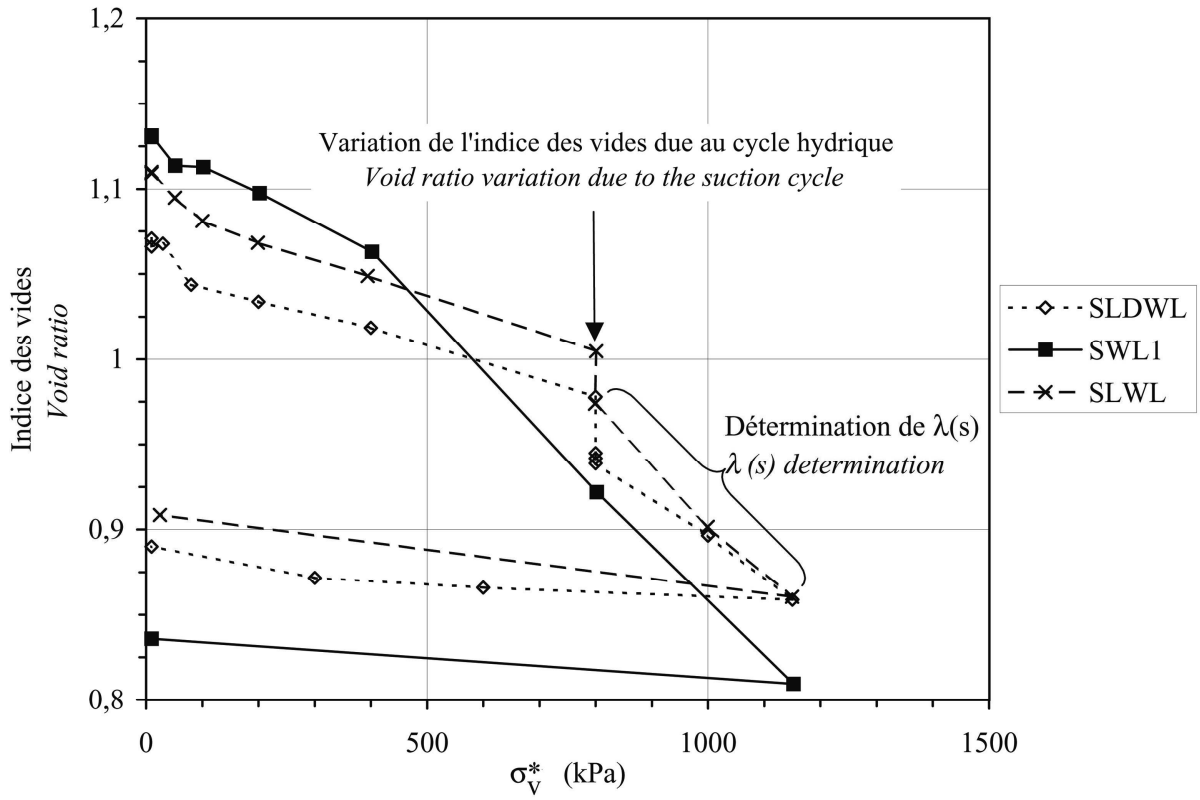

Figure IV.23. Comparaison des courbes de compressibilité obtenues dans les essais SLDWL, SWL1 et SLWL.

Comparison between the obtained compression curves in tests SLDWL, SWL1 and SLWL.

Essais d'effondrement

Les essais précédents ont mis en évidence que le matériau testé s'effondrait lorsque sa succion était réduite de 20,5 à 8,5 MPa sous une charge verticale de 800 kPa. Afin de préciser la relation entre la pression verticale et la succion pour laquelle le matériau s'effondre, deux essais supplémentaires ont été réalisés. Ces essais ont été conduits dans des cellules œdométriques osmotiques sur le mélange limon bentonite préparé comme indiqué au chapitre III.

Les chemins de contrainte suivis sont reportés sur la figure IV.24. La première phase de ces essais a consisté à appliquer la pression verticale sous laquelle l'humidification devait être conduite. Durant cette phase, il n'a pas été possible d'imposer une succion constante voisine de la succion initiale en raison de l'utilisation des œdomètres osmotiques. Des précautions spéciales ont été prises pour éviter l'évaporation de l'eau contenue dans l'éprouvette. Lorsque l'humidification a commencé, il

est donc possible que la succion des éprouvettes ait été légèrement inférieure à leur succion initiale, ce qui a été traduit sur la figure IV.24 par un tracé incliné des segments A-B et A-C. Les pressions choisies sont de 100 (essai OLWL1) et 200 kPa (essai OLWL2). La réduction de succion s'est effectuée en plusieurs étapes, les succions imposées étant successivement 10, 5, 2, 1, 0,5 et enfin 0 MPa. Les caractéristiques des éprouvettes sont indiquées dans le tableau IV.26.

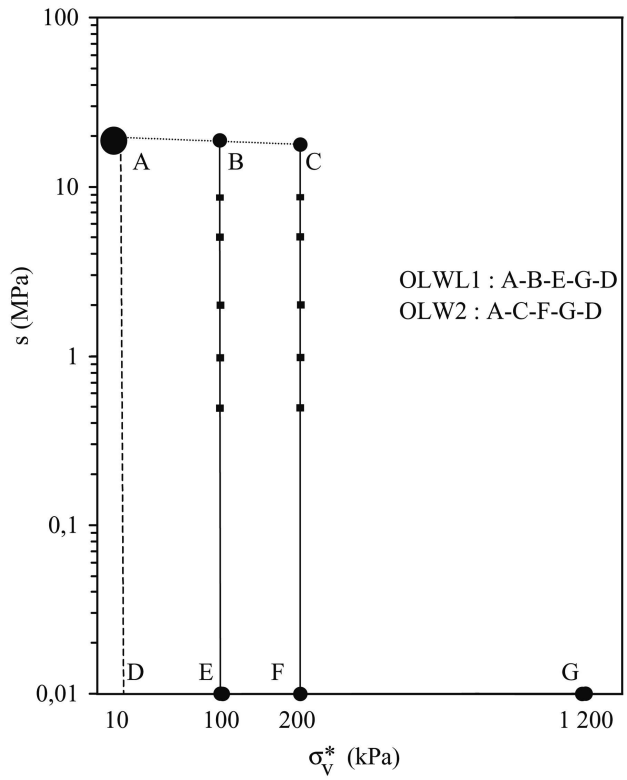

Figure IV.24. Chemins de contrainte suivis pour étudier l'effondrabilité des éprouvettes.

Stress path followed to study the collapse behaviour of the samples.

Tableau IV.26. Caractéristiques des éprouvettes testées.

Characteristics of the tested samples.

Essai	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	Sr_i (%)	$\Delta H/H^a$ (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
OLWL1	15,0	12,7	36,2	2,4	32,9	100
OLWL2	15,0	12,7	36 ,2	-3,8	33,2	100

a : le gonflement correspond ici à la variation de hauteur lors de l'humidification sous charge

Le gonflement des éprouvettes enregistré au cours de la phase d'humidification conduite dans chacun des essais est reporté sur la figure IV.25. Sur cette figure, les données de gonflement libre issues de la figure IV.5 ont été ajoutées. Elles correspondent au gonflement d'une éprouvette soumise à une pression verticale constante de 10 kPa.

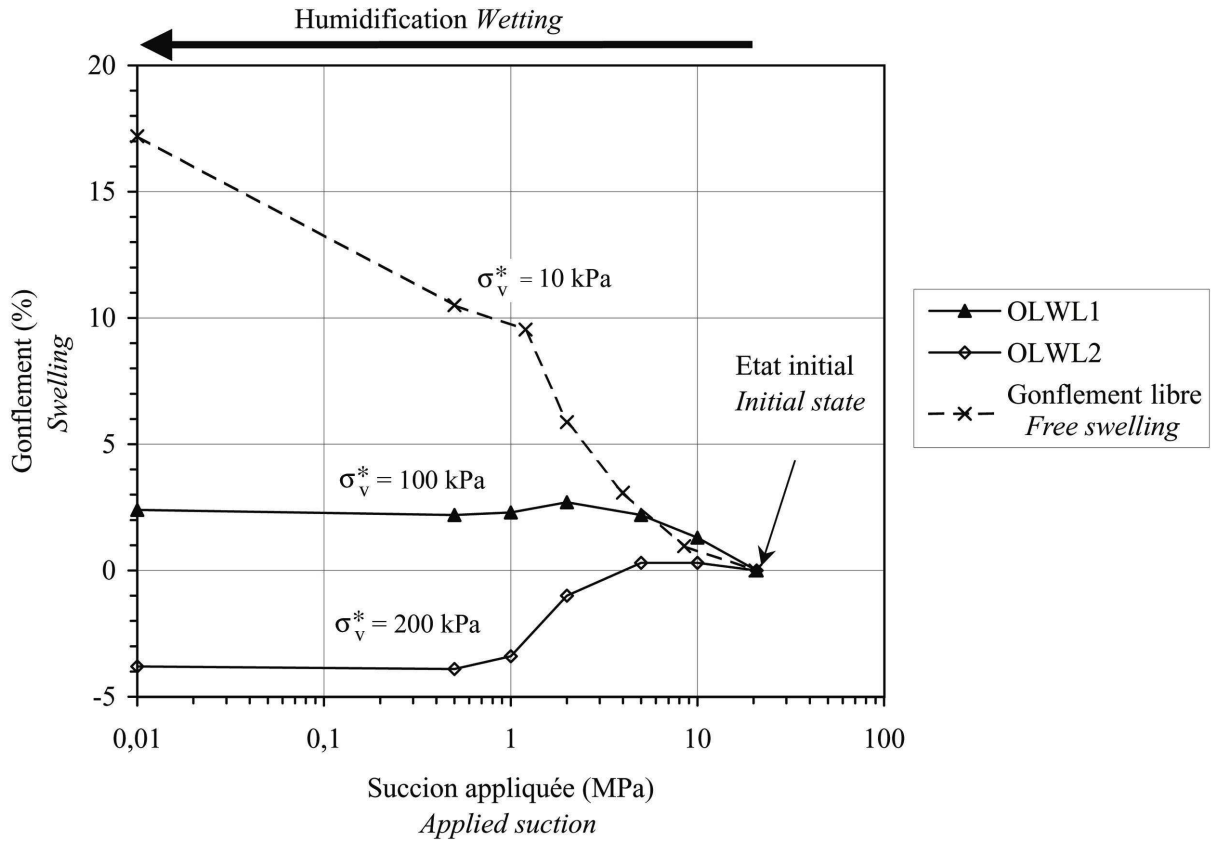

Figure IV.25. Variation de hauteur des éprouvettes soumises à une humidification sous différentes pressions verticales constantes.

Height variation of samples submitted to a wetting under different vertical pressures.

Le gonflement observé dans l'essai OLWL1 est similaire à celui obtenu sous une pression verticale de 10 kPa jusqu'à une succion appliquée de 5 MPa. L'imposition d'une succion inférieure à 2 MPa provoque l'effondrement de l'éprouvette OLWL1. Il est intéressant de noter que les réductions de succion ultérieures ne provoquent pas de variation de volume supplémentaire.

Dans le cas de l'essai OLWL2, avec une charge verticale de 200 kPa, la réduction de succion jusqu'à 5 MPa n'a pas provoqué de gonflement significatif de l'éprouvette. Lorsqu'une succion de 2 MPa a été appliquée, l'éprouvette s'est effondrée de manière significative. Cet effondrement progresse jusqu'à une succion imposée de 0,5 MPa, les variations de volume étant stables dans la dernière étape d'imposition de succion.

Ces résultats permettent donc d'estimer la relation qui existe entre la charge verticale et la succion pour laquelle se produit l'effondrement dans le cas du matériau étudié. Les données des essais OWL1 et OWL2 peuvent être complétées avec celles de l'essai SLWL dans lequel un effondrement de

l'éprouvette a été observé sous une charge verticale de 800 kPa lorsque la succion a été réduite de 20 à 8,5 MPa. Ces données sont regroupées dans le tableau IV.27.

Tableau IV.27. Changement de succion qui provoque l'effondrement de l'éprouvette.

Suction changes that induce the sample to collapse.

	OLWL1	OLWL2	SLWL
Charge verticale (kPa)	100	200	800
Palier de succion pour lequel l'éprouvette s'effondre (MPa)	2 → 1	5 → 2	20 → 8,5

Une fois la succion ramenée à 0 MPa, les éprouvettes ont été chargées et déchargées mécaniquement sous une succion nulle, les résultats sont indiqués sur la figure IV.26 où ils sont comparés à ceux de l'essai OWL6. À partir de chacune de ces courbes les pentes $\lambda(s)$ et κ ont été calculées (tab. IV.28). On constate que les chemins de contrainte suivis n'influencent pas la valeur de la pente $\lambda(s)$. En revanche, la pente κ est légèrement inférieure dans le cas des essais OLWL1 et OLWL2.

Tableau IV.28. Comparaison des paramètres mécaniques des essais OLWL1, OLWL2 et OWL6.

Comparison between the obtained mechanical parameters in tests OLWL1, OLWL2 and OWL6.

Essai	Charge verticale (kPa)	κ	$\lambda(s)$
OLWL1	100	0,05	0,23
OLWL2	200	0,04	0,21
OWL6	10	0,07	0,23

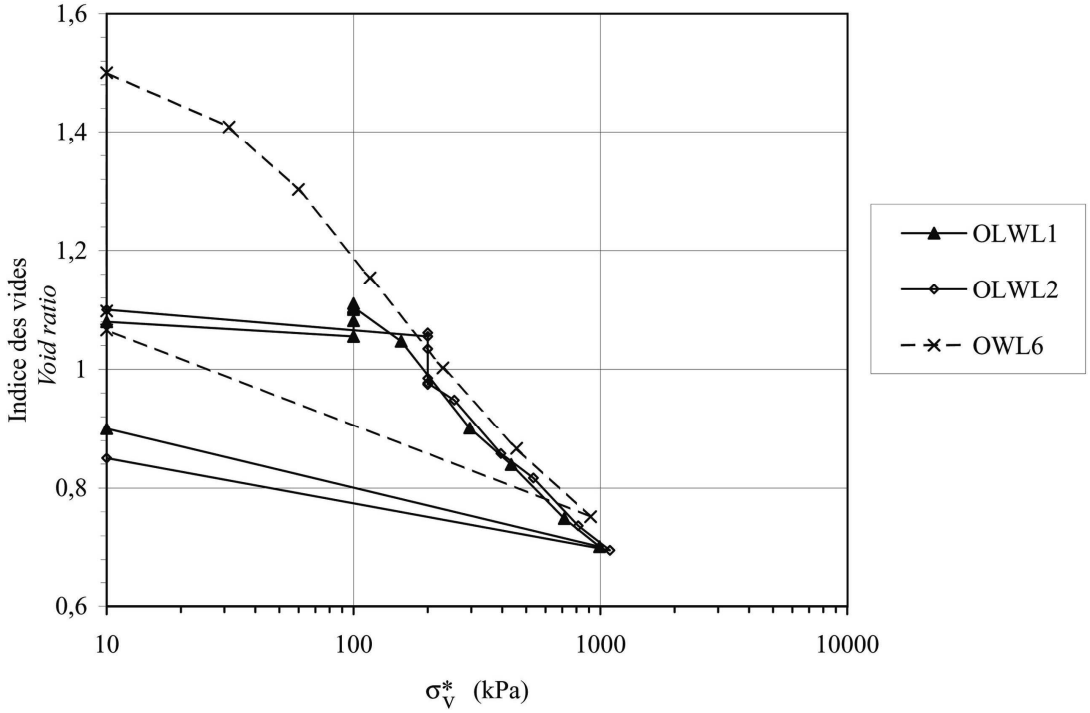

Figure IV.26. Courbes de compressibilité des essais OLWL1 et OLWL2 comparées à celle de l'essai OWL6.

Compression curves of tests OLWL1 and OLWL2 compared to the one obtained in test OWL6.

Pression de gonflement

La pression de gonflement du mélange compacté a été déterminée par la méthode à volume constant (cf. I.4.3.1). Ce essai est l'essai V_c. Une éprouvette a été préparée directement dans une cellule spécialement conçue pour ce type d'essai. Elle permet d'enregistrer la variation de la pression exercée par le matériau lors de son humidification. Un essai d'humidification à succion contrôlée et volume constant a aussi été entrepris mais en raison d'un problème d'acquisition, il n'a pas été possible d'exploiter les résultats de cet essai et uniquement les données de l'essai à succion non contrôlée seront discutées dans cette partie.

La variation de la pression de gonflement en fonction du temps écoulé depuis l'humidification est donnée sur la figure IV.27 et les caractéristiques de l'éprouvette sont regroupées dans le tableau IV.29. Les résultats de cet essai montrent que la pression de gonflement passe par un maximum, environ 58 kPa, avant de décroître pour atteindre une valeur finale de 49 kPa au cours du temps. Ces observations sont similaires à celles qui avait été obtenues par différents auteurs cités dans le premier chapitre (Brackley, 1973 ; Push, 1982 ; Alonso *et al.*, 1999).

Il est important de remarquer qu'à la fin de l'essai, le degré de saturation de l'éprouvette est légèrement inférieur à 100 %. Ceci est peut être dû à la présence d'air piégé dans l'éprouvette,

l'humidification se faisant par la bas de l'éprouvette, le capteur de pression étant fixé de manière hermétique au sommet de l'éprouvette.

Tableau IV.29. Caractéristiques de l'éprouvette V_C.

Characteristics of the sample V_C.

Essai	w_i (%)	γ_{di} ($kN.m^{-3}$)	Sr_i (%)	w_f (%)	Sr_f (%)
VC	14,3	12,7	34,5	40,7	98,3

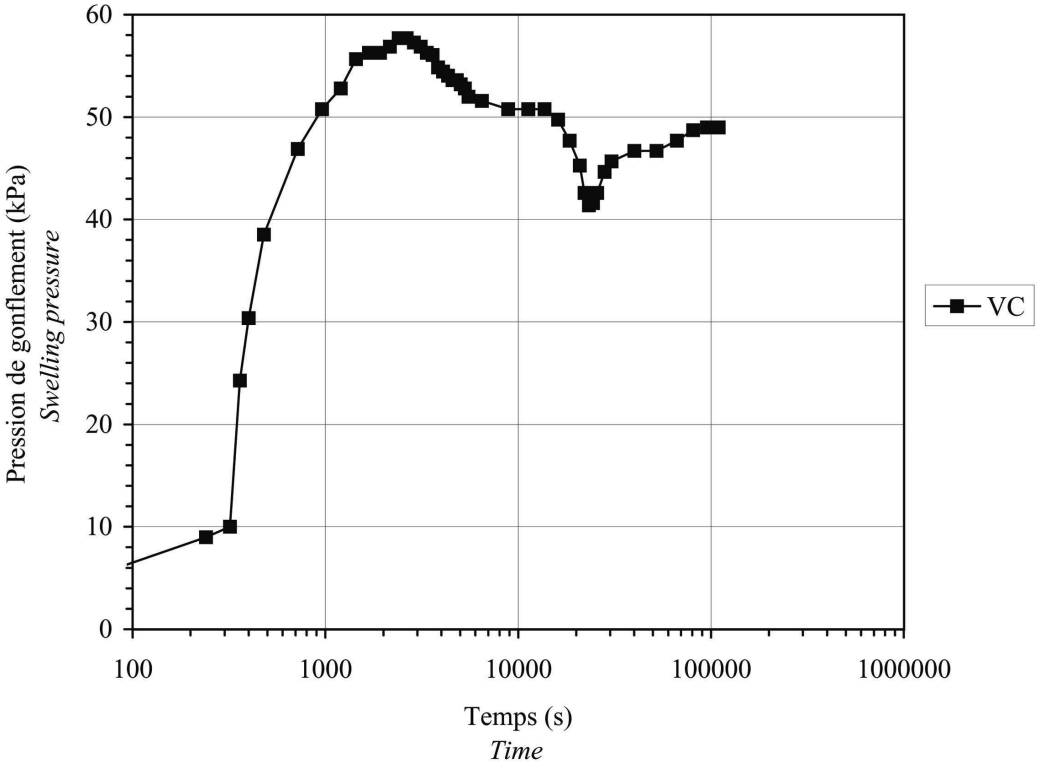

Figure IV.27. Variation de la pression de gonflement lors de l'humidification à succion non contrôlée (Péron, 2002).

Swelling pressure variation during a non suction controlled wetting (Péron, 2002).

Conclusion

Cette partie a permis de faire ressortir un caractère particulier du comportement hydromécanique des sols gonflants par rapport aux sols non saturés non gonflants. En effet, le résultat d'un essai dépend du chemin de contrainte suivi quel que soit le type de sollicitation hydrique imposée au cours de l'essai.

Les essais conduits tendent aussi à mettre en évidence une influence du chemin de contrainte suivi sur la pente $\lambda(s)$ du matériau. Il apparaît ainsi que si deux éprouvettes sont chargées sous la

même succion imposée, la valeur de $\lambda(s)$ semble être une fonction de la plus grande succion connue par l'éprouvette au cours de l'essai.

L'effondrement dépend en premier lieu de la pression verticale appliquée au cours de l'humidification. L'essai SLDWL a aussi permis de voir qu'une faible dessiccation conduite avant l'humidification ne modifiait pas la tendance à l'effondrement du matériau lorsque celui-ci est humidifié sous une pression verticale de 800 kPa.

Ces résultats d'essais permettent de faire ressortir la complexité des phénomènes qui gouvernent le comportement mécanique d'un matériau gonflant. Dans la partie suivante, ils seront interprétés dans la cadre du modèle de Barcelone afin de vérifier les capacités du modèle à reproduire le comportement qui a été mis en évidence.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DANS LE CADRE DU MODÈLE DE BARCELONE

Le modèle de Barcelone pour sols gonflants (BExM) est une évolution du modèle de Barcelone développé initialement pour sols non saturés non gonflants (BBM). Bien que le modèle BBM ne prenne pas en compte tous les aspects spécifiques au comportement des sols gonflants, les résultats seront d'abord interprétés avec ce modèle afin de faciliter l'utilisation et la compréhension des interprétations réalisées à l'aide du modèle BExM. Cela permettra aussi de mettre en évidence les avantages et les limites de chacun des modèles.

Le préalable à l'utilisation de ces deux modèles est la détermination du domaine élastique initial des éprouvettes. Une fois ce travail réalisé, les prévisions de chacun des modèles pour tous les chemins de contraintes suivis ont été comparées aux résultats expérimentaux. Les essais d'effondrement seront traités avant d'aborder le cas des essais comportant un cycle hydrique. En guise de conclusion, quelques propositions d'essais à réaliser qui permettraient une meilleure interprétation de nos données seront faites.

Détermination des surfaces de charge initiales

Les deux modèles, BBM et BExM, sont établis à partir de deux variables indépendantes, la contrainte moyenne nette p*, et la succion. Les essais ayant tous été réalisés avec des œdomètres sans mesure de la contrainte radiale, il n'est pas possible de calculer la pression moyenne nette à partir des données disponibles. Les résultats seront donc considérés en fonction de la contrainte verticale

nette σ_v^*, ce qui constitue une approche simplifiée par rapport au modèle de Barcelone mais qui permet cependant de reproduire les principaux traits de comportement des sols considérés.

Modèle de Barcelone pour sols non saturés non gonflant (BBM)

Dans le modèle BBM, le domaine élastique est délimité par la courbe SI, qui correspond à la succion la plus élevée connue par le sol, et par la courbe LC, qui donne la relation entre la pression de préconsolidation apparente et la succion appliquée (cf. I.5.3).

La succion initiale des éprouvettes est d'environ 20 MPa (cf. III.2.4), qui est la succion maximale connue par les éprouvettes au cours de leur histoire. La droite d'équation s = 20 MPa correspond donc à la courbe SI initiale des éprouvettes. La courbe LC doit être déterminée en utilisant les pressions de préconsolidation apparente $p_0(s)$ déterminées dans les essais impliquant seulement une humidification sous une faible pression verticale suivie d'une augmentation de la pression appliquée. En effet, d'après le modèle BBM, une dessiccation au-delà de la succion initiale provoque une augmentation de la taille du domaine élastique et donc une modification de la position de la courbe LC.

Le domaine élastique du matériau compacté a été tracé en respectant ces considérations (fig. IV.28). Les essais utilisés pour déterminer la LC initiale sont SDL1, SWL1 et OWL1 à OWL6. Dans le cas du modèle BBM, la valeur de la pression de préconsolidation apparente pour une succion nulle, notée p_0^* dans le modèle (cf. I.5.3.2), est d'environ 55 kPa.

Alonso *et al.* (1990) proposent une expression de la courbe LC (équation I.7) dans laquelle l'augmentation de la pression de préconsolidation est contrôlée par la variation de la pente $\lambda(s)$ qui est supposée diminuer de manière monotone avec la succion dans le modèle BBM (équation I.10), ce qui n'est pas le cas dans les essais qui ont été présentés dans ce mémoire (cf. p. 121). Il n'est donc pas possible d'utiliser l'expression initiale de la LC proposée par Alonso *et al.* (1990).

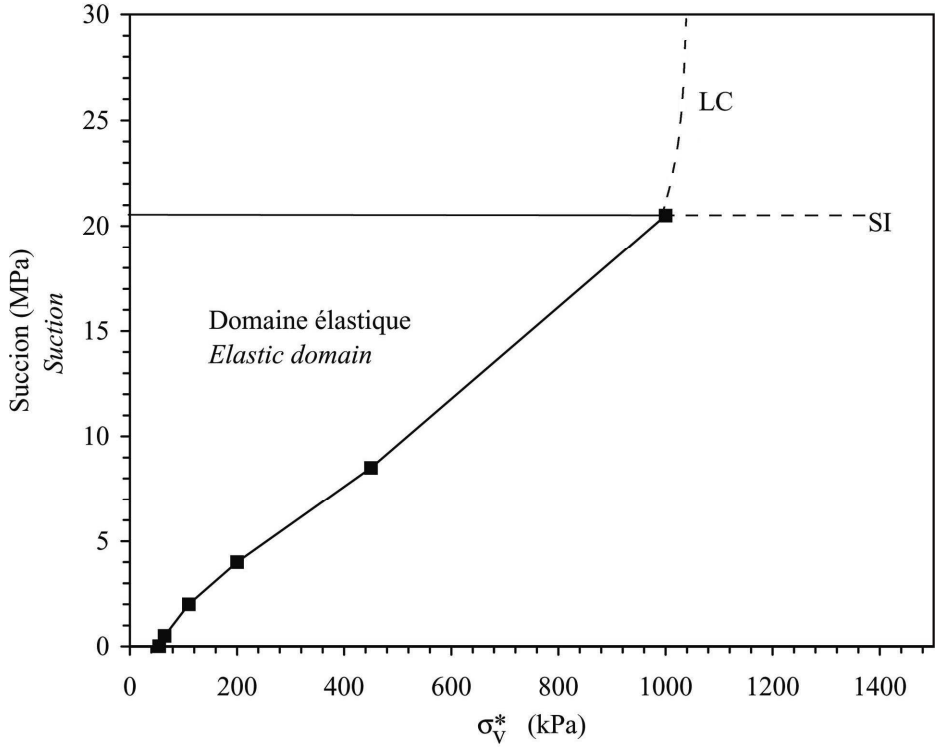

Figure IV.28. Courbes LC et SI initiales dans le cas où les essais sont interprétés en utilisant le modèle BBM.

Initial LC and SI curves in the case of the tests interpreted with the BBM model.

Modèle de Barcelone pour sols non saturés gonflants (BExM)

Par rapport au modèle BBM, le modèle BExM intègre une surface de charge supplémentaire, la SD. Les hypothèses posées pour caractériser le domaine élastique initial avec modèle BBM ne sont donc plus valables ici.

Le cycle de dessiccation/humidification conduit sous une pression verticale de 10 kPa lors de l'essai SDWL avait induit des déformations irréversibles (cf. p. 135), indiquant ainsi que la courbe SI avait été atteinte au cours du cycle hydrique. Le même raisonnement peut être fait à partir des résultats de l'essai SDWL (cf. p. 135), ce qui montre que la courbe SD est atteinte lors d'un cycle d'humidification/drainage conduit entre 20,5 et 8,5 MPa de succion. Si l'on utilise les équations de SI et SD proposées par Alonso *et al.* (1999) (cf. I.5.4), il vient dans le cas du matériau testé :

$$\text{SD} : \sigma_v^* + s - s_h = 0 \text{ avec } 8{,}5 \le s_h \le 20 \text{ MPa} \qquad 7\text{I.19}$$

$$\text{SI} : \sigma_v^* + s - s_0 = 0 \text{ avec } 20 \le s_O \le 38{,}9 \text{ MPa} \qquad 8\text{I.20}$$

La modification de succion s'effectuant par étapes successives, il n'est pas possible de connaître précisément les valeurs de s_h et de s_o. Une détermination exacte de ces paramètres nécessiterait la réalisation d'essais comportant un nombre accru de paliers hydriques. Les deux courbes ont été tracées sur la figure IV.29 où la valeur de s_h a été fixée à 14 MPa et celle de s_o à 30 MPa.

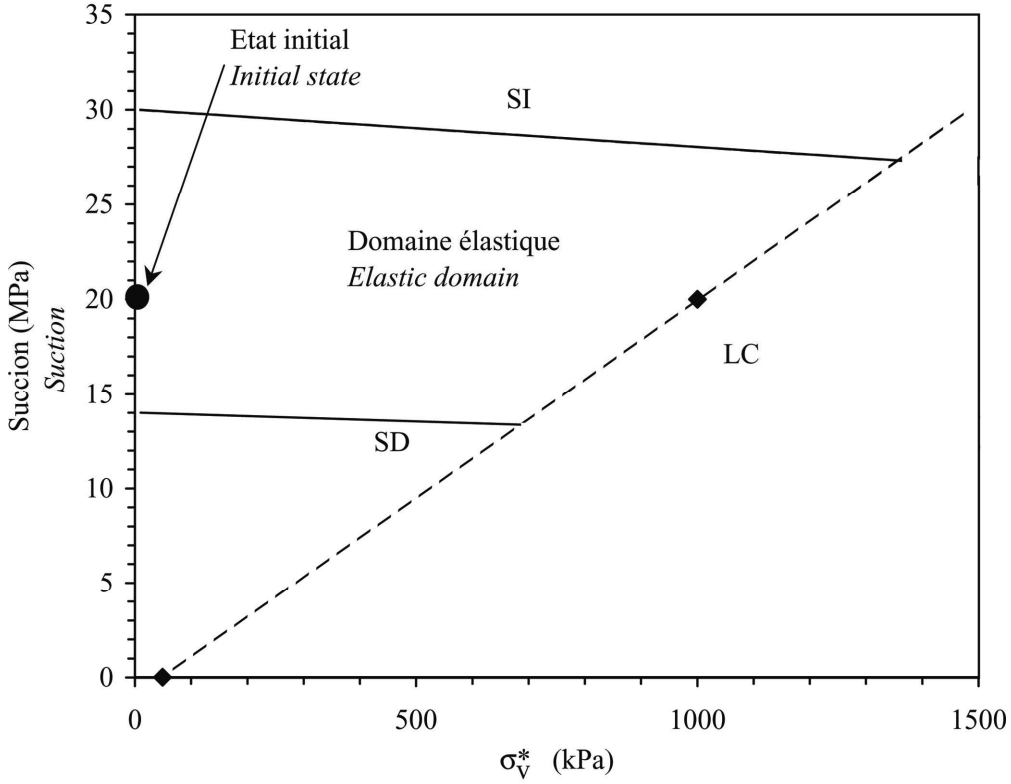

Figure IV.29. Courbes LC, SI et SD initiales dans le cas où les essais sont interprétés en utilisant le modèle BExM.

Initial LC and SI, SD curves in the case of the tests are interpreted with the BBM model.

L'utilisation des pressions $p_0(s)$ pour déterminer la courbe LC initiale comme cela a été fait avec le modèle BBM n'est plus possible dans le cas du BExM qui suppose en effet que dès qu'une des surfaces de charge hydriques est dépassée, la position de la courbe LC est modifiée. Dans ces conditions, la détermination de la LC initiale doit être entreprise avec des essais dont le chemin de contrainte est entièrement compris dans le domaine élastique défini par les courbes SD et SI. Deux essais qui ont été réalisés dans ce travail peuvent répondre à cette condition.

Il s'agit tout d'abord de l'essai SDL1, qui correspond à un chargement mécanique sous une succion proche de la succion initiale. La valeur de la pression $p_0(s = 20$ MPa) est donc de 1 000 kPa. L'autre essai répondant à cette considération est l'essai de gonflement à volume constant VC (cf. p. 145). En effet, pour déterminer la courbe LC initiale d'un sol gonflant, Alonso *et al.* (2001) utilisent un essai similaire. Ces auteurs supposent que la phase d'augmentation de la pression de gonflement se

déroule dans le domaine élastique défini par les trois surfaces de charge. Le pic de pression de gonflement traduit le début d'une plastification de l'éprouvette au cours de l'humidification : la courbe LC est atteinte. Le reste du chemin de contrainte est ensuite confondu avec la courbe LC initiale. La valeur finale de la pression de gonflement correspond donc à la valeur de la pression $p_0(s = 0)$. Si la même démarche est utilisée pour l'essai VC, cela signifie que la pression $p_0^* = 49$ kPa (fig. IV.27).

On dispose donc de deux points de la LC initiale des éprouvettes, qui ont été reliés par une droite sur la figure IV.29, la forme précise de la courbe LC n'étant pas connue. L'équation de la LC proposée par Alonso *et al.* (1999) dans le modèle BExM est identique à l'équation de la LC dans le modèle BBM et n'a donc pas pu être appliquée ici. Pour être améliorée, la détermination des surfaces de charge dans le cas du modèle BExM nécessiterait :

- la réalisation d'essais comportant des cycles hydriques d'une plus grande amplitude pour déterminer avec plus de confiance les paramètres s_0 et s_h ;
- la conduite d'un essai similaire à l'essai VC mais avec une humidification contrôlée afin de vérifier que ni la courbe SD ni la courbe SI ne sont traversées lors de l'humidification à volume constant.

Interprétation des essais d'effondrement

Il est possible de prévoir à partir du domaine élastique défini selon chacun des modèles la succion pour laquelle les éprouvettes doivent s'effondrer en fonction de la charge verticale qui leur est appliquée. L'objet de cette partie est de comparer ces données aux données expérimentales obtenues lors des essais d'effondrement (essais OLWL1, OLWL2 et SLWL) (cf. p. 141).

Les chemins de contrainte suivis dans le cas des essais d'effondrement ont été reportés sur la figure IV.30a sur laquelle est aussi représentée le domaine élastique initial des éprouvettes tel que défini dans le modèle BBM. Dans chacun des essais conduits, le chemin de contrainte suivi amène à franchir la courbe LC_1, ce qui se traduit par un effondrement de l'éprouvette. Les valeurs de succion pour lesquelles l'éprouvette commence à s'effondrer ont été reportées dans le tableau IV.30 où sont aussi indiquées les données expérimentales. Ceci permet de constater le bon accord entre données expérimentales et prévisions du BBM. La position de la courbe LC après l'humidification serait LC_2 dans le cas de l'essai OLWL1, LC_3 dans le cas de l'essai OLWL2 et LC_4 dans le cas de l'essai SLWL.

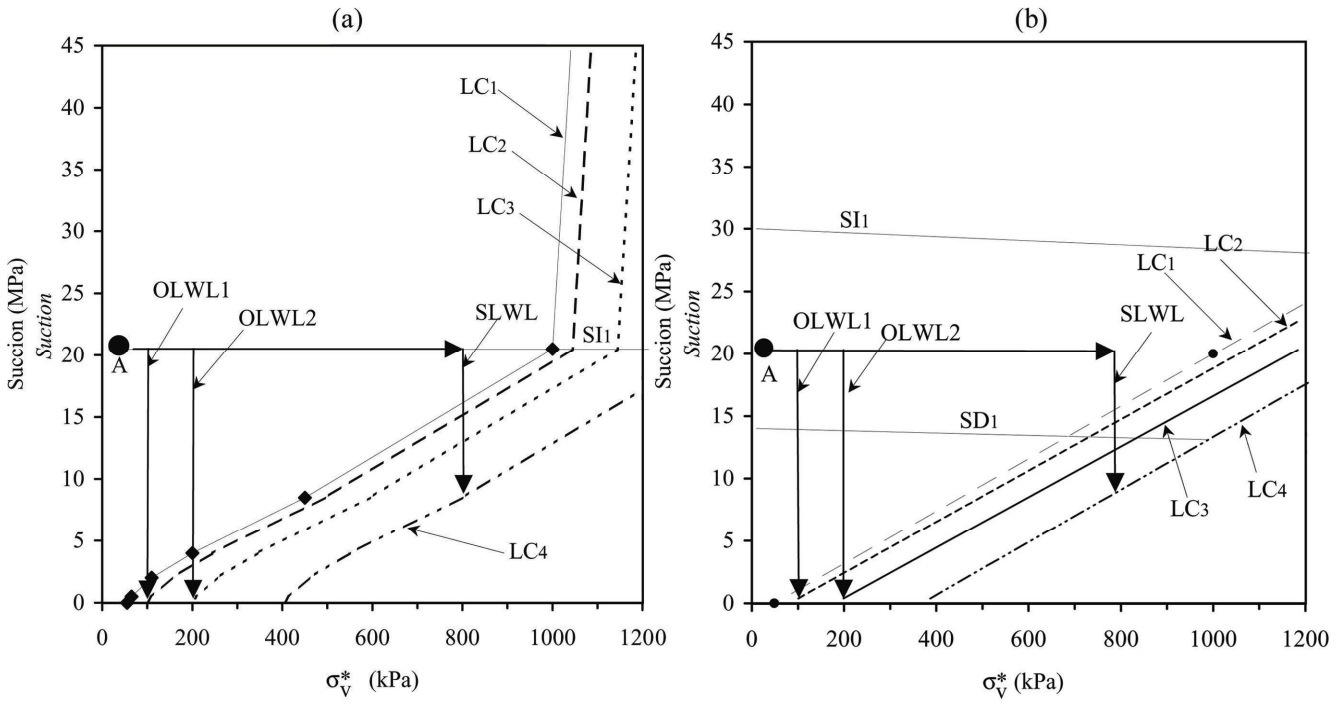

Figure IV.30. Interprétation des essais d'effondrement : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM.

Interpretation of collapse tests: (a) BBM model; (b) BExM model.

Tableau IV.30. Succions pour lesquelles l'éprouvette s'effondre.

Suction at which the samples collapse.

	OLWL1	OLWL2	SLWL
Charge verticale (kPa)	100	200	800
Palier de succion pour lequel l'éprouvette s'effondre (MPa)	2 → 1	5 → 2	20 → 8,5
Succion estimée par la courbe LC (BBM)	1,8	2	15

L'interprétation de ces mêmes essais dans le cadre du modèle BExM est reproduite sur la figure IV.30b. Dans certains essais, l'humidification conduit à franchir la courbe SD, ce qui se traduit par une réduction de la taille du domaine élastique. Il n'est pas possible de prévoir à partir du modèle BExM les succions pour lesquelles le matériau s'effondre, le couplage entre humidification et déplacement de la courbe LC n'étant pas connu. De plus, les prévisions sont totalement dépendantes de la forme de la courbe LC qui n'est pas connue avec suffisamment de précision dans le cas du BExM, ce qui constitue la seconde raison pour laquelle il n'est pas possible de prévoir les succions pour lequel le matériau s'effondre. On peut cependant positionner approximativement la courbe LC à la fin de la phase d'humidification conduite dans chacun des essais. Dans l'essai OLWL1, la position finale est LC_2, dans l'essai OWL2, LC_3, et dans l'essai SLWL, LC_4.

Cette partie permet de voir que l'interprétation à partir du modèle BBM permet de prévoir le comportement lors de l'humidification même si elle ne prend pas en compte toutes les particularités du comportement des sols gonflants. L'interprétation avec le modèle BExM est plus délicate en raison de l'existence de la courbe SD, dont le couplage avec la courbe LC n'est pas quantifiable dans l'état actuel des connaissances sur le matériau.

Interprétation des essais comportant un cycle hydrique

Dans cette partie les essais comportant un cycle hydrique sont interprétés de manière qualitative à partir de chacun des deux modèles. Lorsque les chemins de contrainte seront reportés sur les différentes figures, les lettres majuscules correspondent aux lettres utilisées sur la figure IV.18.

Cycle hydrique sous faible charge mécanique

Essai SDWL

Le cycle hydrique conduit dans cet essai avait provoqué un agrandissement de la taille du domaine élastique, ce qui s'était traduit par une pression de pression de préconsolidation apparente d'environ 1 100 kPa, soit une valeur supérieure à la valeur initiale pour les éprouvettes (1 000 kPa).

L'interprétation du résultat de l'essai SDWL dans le cadre du modèle BBM est donnée sur la figure IV.31a sur laquelle les courbes SI_1 et LC_1 délimitent le domaine élastique initial. L'application d'une succion de 38,9 MPa sous une pression verticale de 10 kPa (chemin A-D) provoque un déplacement de la surface SI_1 vers la position SI_2, ce qui est couplé à un mouvement de la courbe LC_1 vers la position LC_2. Le retour vers la succion initiale (chemin D-A) se produit dans la zone élastique, ce qui n'affecte donc pas la position des surfaces de charge. Lorsque la limite de la zone élastique est atteinte pendant le chargement mécanique (chemin A-C), il se produit une plastification de l'éprouvette qui entraîne un déplacement de la courbe LC vers la position LC_3. Le fait que la pression $p_0(s)$ mesurée dans l'essai SDWL soit plus que grande que la pression $p_0(s)$ initiale des éprouvettes s'explique par l'agrandissement de la zone élastique consécutive à l'application d'une succion de 38,9 MPa au début du cycle.

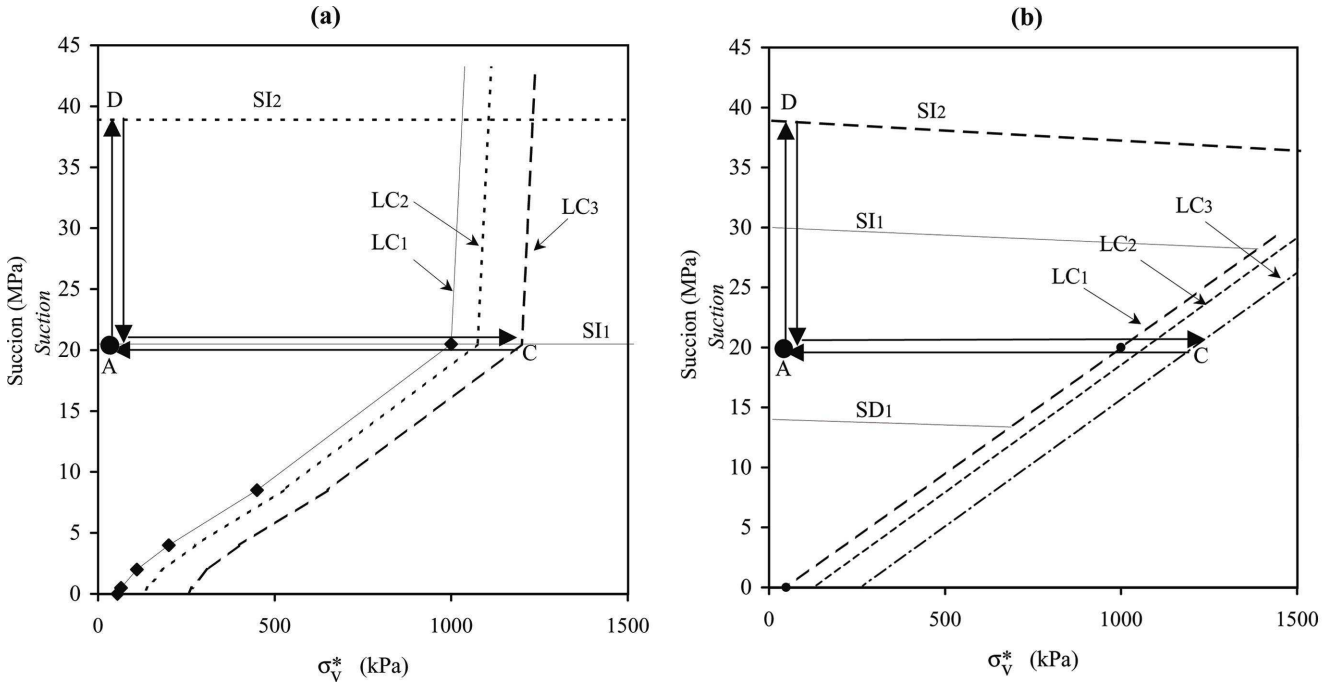

Figure IV.31. Interprétation de l'essai SDWL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM.

Interpretation of collapse test SDWL: (a) BBM model; (b) BExM model.

Le cas du modèle BExM est détaillé sur la figure IV.31b, sur laquelle SI_1, SD_1 et LC_1 sont les surfaces de charge initiales des éprouvettes. L'augmentation de la succion jusqu'à 38,9 MPa provoque un déplacement de la courbe SI_1 vers une position SI_2, déplacement qui est couplé à un mouvement de la courbe LC de la position LC_1 vers LC_2. Le chargement mécanique dans le cas du BExM s'interprète de la même manière qu'avec le BBM. La position finale de la courbe LC étant LC_3.

Dans le domaine de succion où le cycle hydrique a été effectué, il est vraisemblable que l'augmentation de succion n'affecte pas la position de la courbe SD, la conséquence finale du cycle étant un agrandissement de la taille du domaine élastique initial. On peut donc supposer que la position de la surface SD reste inchangée, ce qui a été représenté sur la figure IV.31b.

Essai SWDL

La conséquence du cycle hydrique dans le cas de l'essai SWDL est une diminution de la taille du domaine élastique. En effet, dans cet essai, la pression $p_0(s)$ mesurée lors du chargement mécanique est de 950 kPa, la valeur initiale étant de 1 000 kPa.

L'interprétation de l'essai SDWL dans le cadre du modèle BBM est donnée sur la figure IV.32a sur laquelle SI_1 et LC_1 sont les surfaces de charge initiales des éprouvettes. Le cycle d'humidification/dessiccation (chemin A-F-A) est effectué entièrement à l'intérieur du domaine

élastique. D'après le BBM, la pression $p_0(s)$ déterminée lors du chargement sous une succion de 20 MPa doit être égale à la valeur initiale soit 1 000 kPa. Cette prévision n'est pas en accord avec le résultat de l'essai SWDL.

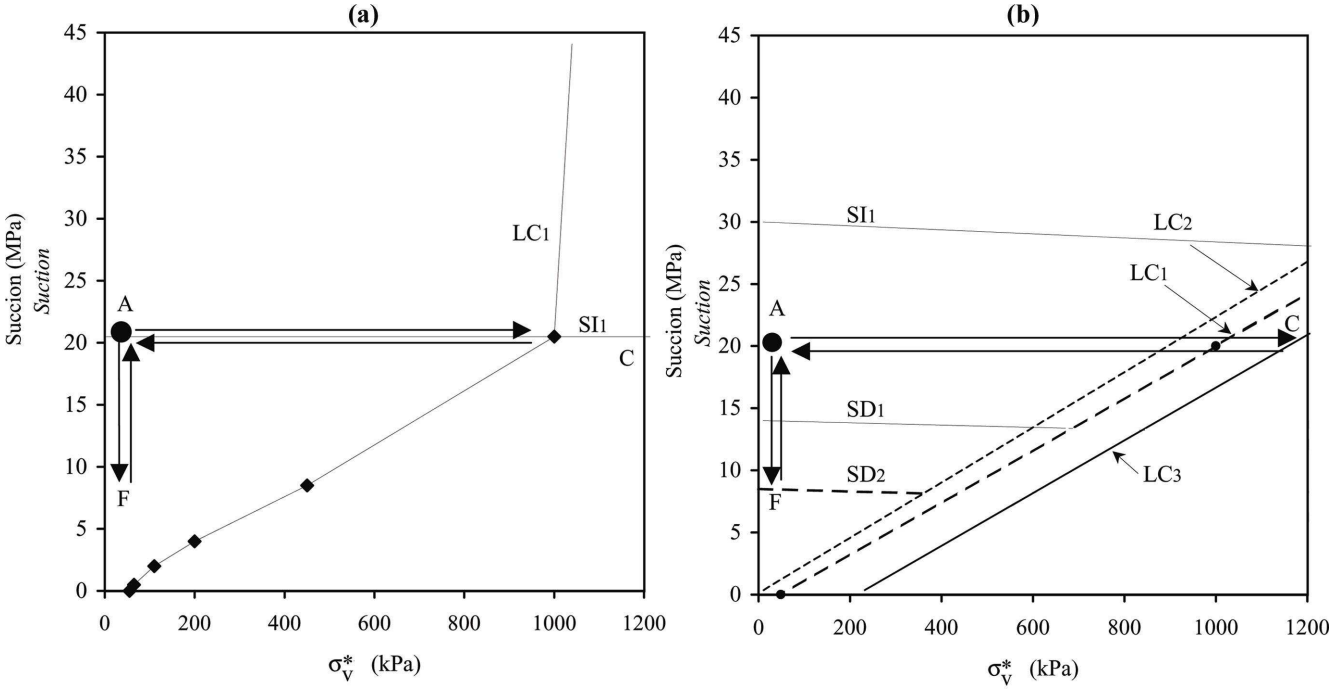

Figure IV.32. Interprétation de l'essai SWDL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM.

Interpretation of collapse test SWDL: (a) BBM model; (b) BExM model.

L'interprétation de cet essai dans le cadre du modèle BExM est proposée sur la figure IV.32b. L'application d'une succion de 8,5 MPa (chemin A-F) provoque un déplacement de la SD vers la position SD_2. Ce déplacement de la SD est couplé à un mouvement de la courbe LC vers la position notée LC_2. Il y a donc une réduction du domaine élastique.

La question se pose de connaître le comportement de la courbe SI en réponse au déplacement de la courbe SD. Le fait que la pression $p_0(s)$ déterminée lors du chargement mécanique sous une succion de 20,5 MPa soit inférieure à la pression $p_0(s)$ indique que l'effet de la dessiccation sur le comportement mécanique est limité. La SI pourrait donc être supposée fixe au cours de l'essai sans que cela ait de conséquence sur l'interprétation des résultats, ce qui a été représenté sur la figure IV.32b. Le chargement mécanique provoque un déplacement de la courbe LC vers sa position finale LC_3.

Conclusion

L'interprétation comparée de ces deux essais permet de montrer que les deux modèles, BBM et BExM, peuvent prévoir le comportement d'un matériau gonflant lorsqu'un cycle de dessiccation est réalisé. En revanche, seul le modèle BExM permet de rendre compte de la réduction du domaine élastique induit par le cycle d'humidification/dessiccation dans l'essai SWDL.

Cycle hydrique sous forte charge

Essai SLWDL

Dans cet essai, l'éprouvette s'est comportée de manière élastique après le cycle hydrique qui a donc provoqué un agrandissement de la taille du domaine élastique par rapport à l'état initial.

Dans le cas du BBM (fig. IV.33a), le chargement mécanique jusqu'à la pression de 800 kPa (chemin A-B) s'effectue à l'intérieur du domaine élastique. L'humidification de 20,5 jusqu'à 8,5 MPa sous cette pression verticale induit un effondrement qui est correctement prédit par le modèle (chemin B-G). L'humidification provoque un déplacement de la courbe LC vers la position LC_2. Le fait que la phase de chargement finale (chemin B-C) n'induise pas de déformations plastiques indique que la courbe LC est située au-delà de 1 200 kPa pour une succion de 20 MPa (cf. fig. IV.21).

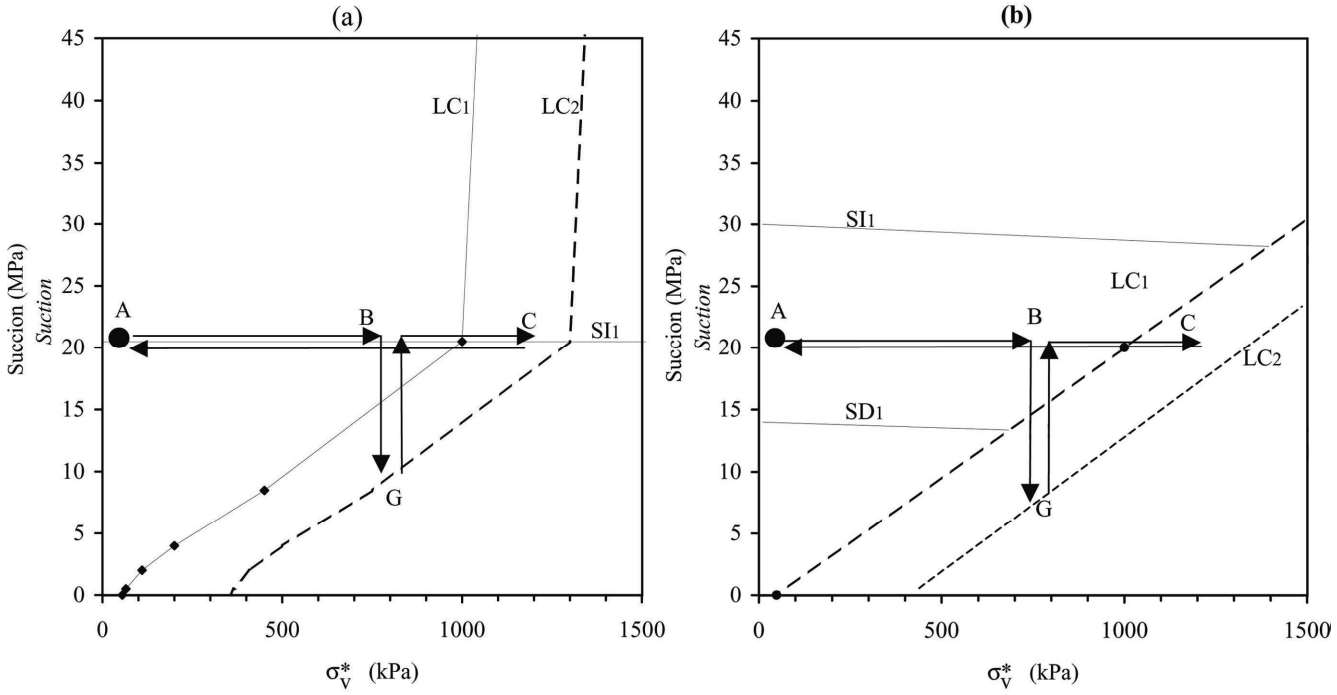

Figure IV.33. Interprétation de l'essai SLWDL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM.

Interpretation of collapse test SLWDL: (a) BBM model; (b) BExM model.

Dans le cas du BExM (fig. IV.33b), le chargement jusqu'à 800 kPa se produit dans le domaine élastique. L'interprétation des résultats du cycle d'humidification/drainage est confrontée au manque de données expérimentales, comme dans le cas de l'essai SLWL (cf. 0). On peut cependant supposer que la courbe LC se déplace en LC_2 suite à l'humidification (chemin B-G), sans pouvoir indiquer de manière précise l'influence de cette humidification sur la position de la courbe SD.

Essai SLDWL

Dans cet essai, le cycle hydrique de dessiccation/humidification mené entre 20,5 et 38,9 MPa de succion sous une pression verticale de 800 kPa n'a pas affecté la tendance à l'effondrement du matériau lors de la réduction de succion de 20,5 vers 8,5 MPa qui a suivi le premier cycle.

Dans le cas du BBM (fig. IV.34a), le chargement initial jusqu'à 800 kPa s'effectue dans la zone élastique, ce qui ne modifie donc pas la position de la taille du domaine élastique. L'augmentation de succion provoque un déplacement de la courbe SI vers la position SI_2. Le déplacement de la courbe LC vers la position LC_2 est associé à ce phénomène. Le fait que le sol s'effondre entre B et G indique que la courbe LC_2 est franchie entre ces deux succions. L'effondrement provoque un déplacement de la courbe LC vers la position LC_3. La phase finale de chargement mécanique (chemin G-H) induit un déplacement de la courbe LC vers la position LC_4.

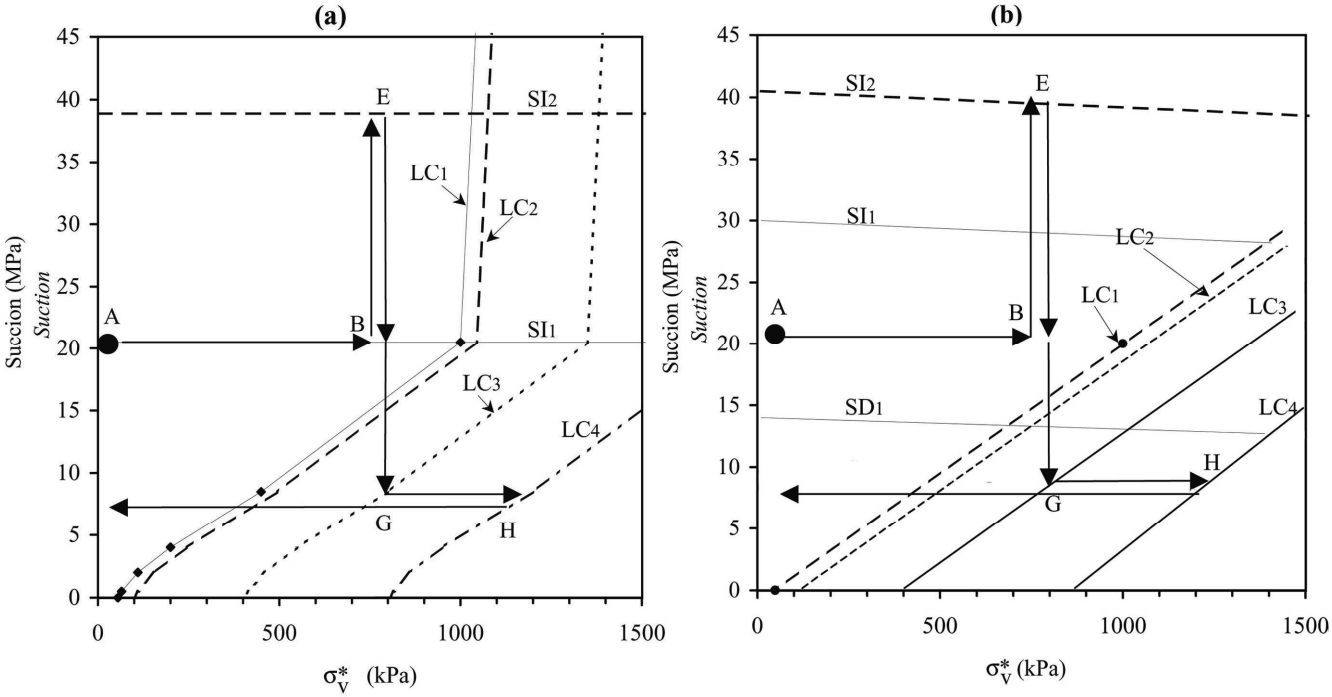

Figure IV.34. Interprétation de l'essai SLDWL : (a) modèle BBM ; (b) modèle BExM.

Interpretation of collapse test SLDWL: (a) BBM model; (b) BExM model.

Selon le modèle BExM (fig. IV.34b), le chargement mécanique initial s'effectue dans le domaine élastique initial qui n'est donc pas modifié durant cette phase (chemin A-B). L'augmentation de succion (chemin B-E) provoque un déplacement de la courbe SI vers la position SI_2. L'effondrement entre B et G peut être interprété de la même manière que l'effondrement constaté lors de l'essai SLWDL, sans pouvoir dans le cas de cet essai non plus prévoir la position de la courbe SD après l'humidification. Le franchissement de la courbe SD_1 entraîne un déplacement de la courbe LC de la position LC_2 vers la position LC_3. Le chargement mécanique final amenant la LC jusqu'à la position LC_4.

Conclusion

Cette interprétation dans la cadre du modèle BExM est très simplifiée en raison notamment de l'absence de données expérimentales sur le couplage qui pourrait exister entre la courbe SI et la courbe SD. L'évolution de la forme du domaine élastique est donc mal connue. Cependant, même avec ces simplifications, le modèle BExM permet d'interpréter correctement les résultats des essais SLWDL et SLDWL.

Conclusion

Cette partie a été l'occasion de comparer l'interprétation à partir des modèles BBM et BExM de plusieurs résultats d'essais conduits sur un matériau gonflant compacté. Ce travail montre l'efficacité des deux modèles pour interpréter le comportement hydromécanique lorsqu'une dessiccation est réalisée en cours d'essai. En revanche, seul le modèle BExM prédit le comportement observé lors de l'essai SWDL, ce qui démontre l'intérêt des modifications apportées au modèle pour prendre en compte les particularités du comportement des sols gonflants.

Cependant, le modèle BExM s'avère d'une utilisation plus délicate que le BBM en raison de l'introduction de la surface SD. Un autre élément important est le manque de connaissance des couplages entre SI et SD, les données expérimentales disponibles à ce jour ne permettent pas de les caractériser.

Les deux modèles sont cependant confrontés à certains problèmes communs comme par exemple le fait que l'équation de la courbe LC proposée dans le modèle initial est inadaptée dans les deux cas aux résultats obtenus, ce en raison de la variation de $\lambda(s)$ mise en évidence dans les essais présentés. De plus, la dépendance des paramètres mécaniques vis-à-vis du chemin de contrainte qui a été mise en évidence par les résultats des essais présentés n'est pas intégrée dans ces modèles.

L'interprétation des essais qui a été réalisée avec le modèle BExM a fait apparaître le besoin d'essais supplémentaires qui n'ont pu être entrepris durant cette thèse, en raison des temps d'essais extrêmement long associés à la complexité des chemins de contrainte nécessaires. Dans le cas du modèle BExM, il est possible de proposer quelques chemins de contrainte additionnels qui permettraient de préciser notamment les couplages entre les deux surfaces de charge hydriques (SD et SI). Quelques-uns des chemins de contrainte qui permettraient de répondre à ces questions sont reportés sur la figure IV.35. Il s'agirait d'essais comportant un cycle hydrique sous deux pressions verticales. Les essais n°1 et 2 compléteraient les résultats déjà obtenus dans le cadre des essais SDWL et SWDL, les essais n°3 et 4 étant destinées à affiner les informations recueillies avec les essais SLWDL, SLWL et SLDWL. Un essai indispensable serait l'essai d'humidification à succion contrôlée et à volume constant pour préciser la forme de la courbe LC initiale et ainsi permettre une meilleure définition du domaine élastique initial.

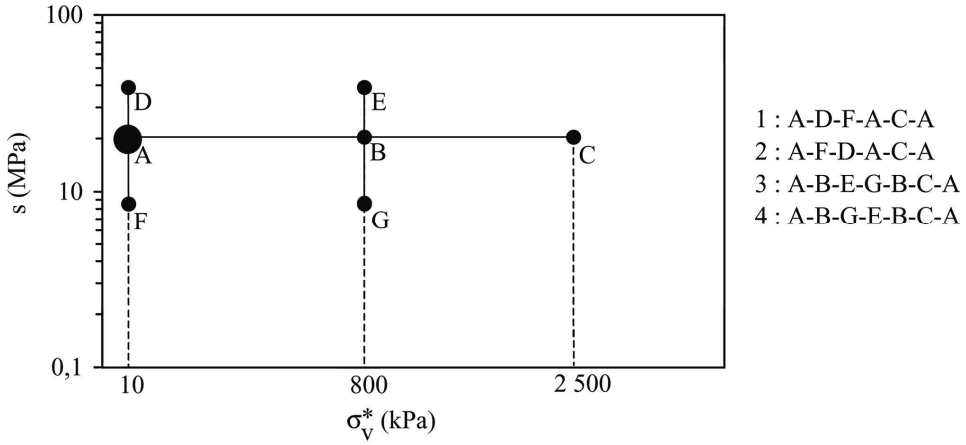

Figure IV.35. Essais supplémentaires proposés.

Additional proposed tests.

Une équation de la courbe LC qu'il serait peut être possible d'utiliser pour le matériau étudié est celle proposée par Josa *et al.* (1992). Ces auteurs ont suggéré cette équation pour les sols qui présentent un maximum d'effondrement :

$$p_0 = (p_0^* - p_c) + p_c\left[(1-m)e^{\alpha s} + m\right] \qquad 9IV.21$$

avec :

p_c : pression de référence ;
p_0 : pression de préconsolidation apparente sous la succion s ;
p_0^* : pression de préconsolidation apparente sous une succion nulle ;

α : paramètre qui contrôle la forme de la courbe LC ;

m : paramètre qui est relié à la différence entre la pression de préconsolidation apparente lorsque la succion tend vers l'infini et la pression p_0^*.

La détermination du paramètre m nécessite la réalisation d'un certain nombre d'essais d'effondrement similaires à ceux présentés dans ce travail (cf. p. 141). Cela permettrait d'utiliser l'équation IV.3 pour le matériau étudié, et ainsi de compléter l'interprétation des résultats d'essais obtenus.

CONCLUSION

L'utilisation des appareils œdométriques décrits dans les chapitres précédents a permis la caractérisation du comportement hydromécanique d'un matériau gonflant dans une gamme de succion comprise entre 0 et 300 MPa. Ces résultats permettent donc de compléter la connaissance du comportement hydromécanique des sols gonflants. Ils montrent que deux domaines au comportement différent peuvent être identifiés en fonction de la succion appliquée au moment du chargement mécanique. L'existence de ces deux domaines semble très liée à la technique de préparation qui a été retenue pour élaborer les éprouvettes testées, cette préparation contrôlant leurs caractéristiques initiales (densité, structure, …). Ces résultats mettent en avant l'intérêt qu'il y a de disposer d'un maximum d'informations sur les propriétés hydriques et structurales du matériau étudié pour rendre possible l'interprétation des données mécaniques.

Le deuxième point de ce chapitre a été consacré à l'étude des conséquences de sollicitations hydriques complexes sur le comportement hydromécanique d'un matériau gonflant. Il semble ressortir des résultats obtenus que la pression de préconsolidation ainsi que la pente de compression vierge sont reliées directement au chemin de contrainte suivi. De même, le chemin de contrainte hydrique apparaît déterminant sur le résultat final d'un essai, ce qui marque la particularité des matériaux gonflants par rapport aux matériaux non gonflants.

L'ensemble des résultats obtenus a été interprété dans le cadre des modèles de Barcelone pour sols non saturés gonflants ou non dans la dernière partie de ce chapitre. L'utilisation du modèle BExM s'est avérée difficile dans le cas des essais présentés ici. Ceci tient au fait que la caractérisation des couplages entres les sollicitations hydriques, humidification ou dessiccation, nécessite la réalisation d'un nombre important d'essais additionnels qui n'ont pu être réalisés ce travail. Quelques chemins de

contrainte qui permettrait de préciser l'interprétation dans le cadre du modèle BExM ont été proposés dans la dernière partie de ce chapitre.

L'ensemble de cette étude démontre l'extrême sensibilité des propriétés hydromécaniques des sols gonflants à toute variation de succion. La mise en œuvre de ces matériaux gonflants étant envisagée dans des contextes d'utilisation très sensibles, stockage de déchets nucléaires ou bien bassin de rétention, il semble important de poursuivre les investigations entreprises. Celles-ci devront porter sur une meilleure définition des couplages hydromécaniques à partir de la réalisation d'essais comportant plusieurs cycles hydriques d'amplitudes variables, sous différentes contraintes verticales ainsi que des états initiaux des éprouvettes variables. De plus, un élément important de cette étude était l'état initial particulier de nos éprouvettes. Il serait intéressant de poursuivre le travail en utilisant des éprouvettes préparées d'une manière différente.

Conclusion générale

Cette thèse s'inscrit dans le cadre général de l'étude du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés. Plus particulièrement, l'objet du travail était de développer des techniques expérimentales afin de caractériser le comportement hydromécanique d'un sol gonflant dans une gamme étendue de succion. Ces recherches présentent un intérêt certain pour toutes les applications en géotechnique de l'environnement, qu'il s'agisse de stockage de déchets ménagers, industriels ou nucléaires. Mais ces travaux présentent aussi un intérêt plus vaste, les matériaux argileux compactés étant utilisés dans de nombreux contextes en génie civil et en géotechnique (digues, barrages, bassins de rétention, etc.).

La première partie du chapitre I était consacrée à la définition de la notion de succion et à la présentation des techniques expérimentales qui peuvent être utilisées dans ce domaine de recherche. Un bref aperçu des résultats majeurs existants sur les sols non saturés non gonflants a ensuite été proposé, ces considérations étant en effet indispensables pour appréhender l'étude des sols non saturés gonflants. Cette étape était d'autant plus nécessaire que la troisième partie a permis de montrer que la quantité de données disponibles sur le comportement hydromécaniques des sols gonflants était limitée et qu'il restait un grand nombre de questions en suspens. Ces interrogations portent notamment sur l'étude des ces matériaux dans la gamme des succions supérieures à quelques MPa et sur l'influence des sollicitations hydriques complexes.

Le second chapitre a été l'occasion de s'interroger sur les différentes techniques expérimentales d'imposition de succion disponibles, avec l'objectif de déterminer les plus adaptées au cas des sols gonflants. La méthode osmotique et la technique des solutions salines ont été sélectionnées. Les conditions d'une utilisation optimale de chacune des méthodes ont ensuite été définies. Ainsi, l'emploi

de la méthode des solutions salines nécessite des conditions de température et de pression extrêmement strictes. Ce travail a permis de montrer qu'il était préférable de limiter l'usage de la technique des solutions salines au domaine des succions supérieures à 8,5 MPa. La capacité de la méthode osmotique a été portée jusqu'à une succion de 8,5 MPa. Deux types d'œdomètres à succion contrôlée ont été présentés dans cette partie, dont ceux utilisant les solutions salines qui ont entièrement été développés pour ce travail. Une technique originale de préparation des éprouvettes pour l'étude de leur structure interne a aussi été détaillée.

Le troisième chapitre avait deux objectifs : présenter la validation des dispositifs expérimentaux puis les principales caractéristiques des matériaux utilisés. La pertinence des choix effectués pour développer les deux types d'œdomètre a été vérifiée. La continuité des deux techniques expérimentales a été testée pour une succion de 8,5 MPa, ce qui a permis de montrer que la composante osmotique de la succion jouait un rôle non négligeable sur le comportement mécanique d'un matériau gonflant. La suite de ce chapitre a été consacrée à la caractérisation avancée des différentes propriétés des éprouvettes, notamment en ce qui concerne leur structure interne et leur propriétés de gonflement. Les investigations conduites ont permis de montrer que l'humidification conduisait à une destruction de la double structure initiale des éprouvettes entre 4 et 2 MPa, le point d'entrée d'air des éprouvettes appartenant aussi à cette gamme de succion.

Tous ces travaux ont permis la réalisation de l'étude du comportement mécanique du matériau gonflant sélectionné qui a fait l'objet du quatrième chapitre, qui a été divisé en trois parties. La première a consisté à étudier l'influence d'une dessiccation ou d'une humidification sur les propriétés mécaniques d'éprouvettes préparées de manière identique. Les essais réalisés montrent que la pression de préconsolidation apparente atteint une valeur constante dans le domaine des fortes succions lorsque la succion dépasse 38,5 MPa. Par contre la pente de compression plastique $\lambda(s)$ varie de manière non monotone en fonction de la succion appliquée. Lorsque la succion passe de 0 à 4 MPa, la pente $\lambda(s)$ augmente pour diminuer par la suite lorsque la succion est augmentée de 4 à 287,9 MPa. Ce comportement particulier est sans doute lié à l'état initial des éprouvettes, ce qui tend à être confirmé par une série d'essais réalisée sur le même matériau mais préparé sous forme de poudre ou de pâte.

La deuxième partie de ce quatrième chapitre a été consacrée à la caractérisation de la relation qui existe entre des sollicitations hydriques complexes et la compressibilité d'un matériau gonflant. Les premiers résultats ont permis de montrer que le résultat d'un essai mené sur un sol gonflant dépendait

du chemin de contrainte hydrique suivi lorsqu'une humidification était réalisée en cours d'essai, ce qui est un trait de comportement spécifique aux sols gonflants par rapport aux sols non gonflants. Un autre élément important est la dépendance de la pente $\lambda(s)$ par rapport au chemin de contrainte suivi : la compressibilité semble être fonction de la plus grande succion qu'a connue l'éprouvette au cours de son histoire. Une série d'essais d'effondrement a été réalisée pour caractériser la relation entre la pression verticale appliquée et la succion pour laquelle le sol s'effondre. L'ensemble de ces résultats d'essais fait apparaître l'extrême sensibilité des propriétés mécaniques d'un matériau gonflant compacté vis-à-vis de toute variation de succion.

La fin du quatrième chapitre est une interprétation comparée à l'aide des modèles de Barcelone BBM et BExM des résultats obtenus. L'utilisation du modèle BExM apparaît complexe en raison du nombre élevé d'essais nécessaire à la définition des différentes surfaces de charge qu'il propose. Ce modèle permet cependant de prendre en compte les particularités des sols gonflants, ce qui a été démontré notamment lorsque le chemin de contrainte de l'essai comprend une humidification. Les interprétations proposées se sont cependant heurtées à la nécessité de disposer d'un nombre élevé d'essais additionnels pour pouvoir faire des interprétations précises avec le modèle BExM.

Cependant, il reste encore de nombreuses questions en suspens, questions qui n'ont pu qu'être effleurées lors de ce travail. En effet, les processus par nature très lents qui entrent en jeu lors de l'étude des sols gonflants obligent l'expérimentateur à des choix qui, il le sait, limiteront le champs de son investigation et donc, de sa compréhension. Les conclusions formulées tout au long de ce mémoire permettent la suggestion de quelques pistes pour la poursuite du travail engagé depuis longtemps au laboratoire.

Concernant les techniques expérimentales employées, il serait souhaitable de modifier le mode de chargement mécanique. En effet, l'application d'un palier de chargement d'une manière rapide provoque une modification immédiate de la succion, qui doit être compensée par la suite, par le système d'imposition de la succion. Ce phénomène est peut être à l'origine d'un écart à la condition "chargement sous succion constante" qui été supposée vraie à plusieurs reprises dans ce mémoire. Le passage à un mode de chargement quasi continu serait conseillé.

Afin de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de l'influence de la structure initiale liée à la faible densité des éprouvettes utilisées sur le comportement mécanique, une solution simple serait de réaliser

quelques essais similaires à ceux décrits sur la figure IV.1 mais avec un matériau compacté à l'optimum. La caractérisation simultanée de la structure interne du matériau ainsi préparée, comme cela a été réalisé dans ce travail, donnerait un bon élément de comparaison. Il n'est pas nécessaire d'envisager un nombre élevé d'essais, la courbe de gonflement à succion contrôlée donnerait une bonne indication des modifications de structure provoquées par l'humidification.

Parmi les autres perspectives qu'il serait possible de donner à ce travail, la poursuite de la modélisation de l'ensemble des résultats dans le cadre du modèle BExM apparaît intéressante. Il serait profitable d'entreprendre des essais comportant des cycles hydriques d'amplitudes plus importantes que ce qui a été proposé dans la fin du chapitre IV en travaillant notamment avec les œdomètres osmotiques. Il serait également souhaitable d'utiliser un matériau avec une succion initiale comprise dans la gamme accessible avec la méthode osmotique ou bien de tester les possibilités de la méthode osmotique dans le domaine des succions supérieures à 8,5 MPa. Cela permettrait d'étudier la réalisation de cycle(s) comportant une humidification suivi d'un retour à la succion initiale, ce qui n'est pas possible actuellement avec le matériau utilisé et la gamme accessible avec la méthode osmotique.

Ces quelques propositions ne représentent cependant qu'un nombre restreint de ce qu'il faudrait accomplir pour atteindre une connaissance meilleure des sols gonflants.

Bibliographie

ABDULJAUWAD, S.N. & AL-SULAIMANI, G., 1993. *Determination of swell potential of Al-Qatif clay*. Geotechnical Testing Journal, vol. 16, pp. 469-484.

ABOUSHOOK, M., 1984. *Contribution à l'étude quantitative du gonflement des sols argileux : application à des sols intacts de la zone urbaine du Caire*. Thèse de Docteur-Ingénieur, INPL, Nancy, 152 p.

AFNOR XP P 94-091, 1995. *Essai de gonflement à l'œdomètre. Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes.* 13 p.

AFNOR XP P 94-090-1, 1997. *Essai œdométrique*. 23 p.

AFNOR NF X 15-119, 1999. *Mesure de l'humidité de l'air. Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres*. 22 p.

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS (ANDRA), 2002. Site internet : http:// www.andra.fr/.

AITCHISON, G.D., 1959. *The strength of quasi-saturated and unsaturated soils in relation to the pressure deficiency in the pore water*. Proc. of the 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Londres, pp. 135-139.

AITCHISON, G.D., 1961. *Relationship of moisture, stress and effective stress functions in unsaturated soils*. Pore Pressure and Suction in Soils. Butterworth : Londres, pp. 47-52.

AL-HOMOUD, A., BASMA, A., HUSEIN MALKAWI, A. & AL BASHABSHEH, M., 1995. *Cyclic swelling behavior of clays*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 121, pp. 562-565.

AL-MUKHTAR, M., BELANTEUR, N., TESSIER, D. & VANAPALLI, S.K., 1996. *The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states*. Applied Clay Science, vol. 11, pp. 99-115.

AL-MUKHTAR, M., QI, Y., ALCOVER, J.F. & BERGAYA, F., 1999. *Oedometric and water retention behavior of highly compacted unsaturated smectites*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 36, pp. 675-684.

ALONSO, E.E., GENS, A. & HIGHT, D.W., 1987. *Special problem soils. General report*. Proc. of the 9th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 5.1-5.60.

ALONSO, E.E., GENS, A. & JOSA, A., 1990. *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, vol. 40, pp. 405-430.

ALONSO, E.E., VAUNAT, J. & GENS, A., 1999. *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*. Engineering Geology, vol. 54, pp. 173-183.

ALONSO, E.E., LLORET, A., GENS, A. & YANG, D.Q., 1995. *Experimental behaviour of highly expansive double-structure clay*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 1, pp. 11-16.

ALONSO, E.E., ROMERO, E., HOFFMANN, C. & GARCÍA-ESCUDERO, E., 2001. *Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting*. 6th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, ENPC, pp. 513-542.

ALSHIABI, O., SHAHROUR, I. & MIEUSSENS, C., 2002. *Experimental study of the influence of suction and drying/wetting cycles on the compressibility of a compacted soil*. In JUCÁ *et al.* (eds), Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brésil. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-371-9. Vol. 2, pp. 541-545.

AMRAOUI, N., 1996. *Étude de l'infiltration dans les sols fins non saturés*. Thèse de l'INPL, 325 p.

ASTM D 4546 – 90, 1990. *One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*. ISBN : 0-8031-2129-6. Vol. 4.08, pp. 693-699.

ASTM D 5298 – 94, 1995. *Measurement of soil potential (suction) using filter paper*. ISBN : 0-8031-2129-6. Vol. 4.09, pp. 154-159.

BARBOUR, S.L. & FREDLUND, D.G., 1989. *Mechanisms of osmotic flox and volume change in clay soils*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 26, pp. 551-562.

BARDEN, L., Mc GOWN, A. & COLLINS, K., 1973. *The collapse mechanism in partly saturated soil*. Engineering Geology, vol. 7, pp. 49-60.

BASMA, A.A., AL-HOMOUD, A.S., HUSEIN MALKAWI, A.I. & AL-BASHABSHEH, M.A., 1996. *Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays*. Applied Clay Science, vol. 11, pp. 211-227.

BÉLANTEUR, N., TACHERIFET, S. & PAKZAD, M., 1997. *Étude des comportements mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles gonflantes fortement compactées*. Revue Française de Géotechnique, n° 78, pp. 31-50.

BEN RHAIEM, H., TESSIER & D., PONS, CH.C., 1986. *Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation : partie I. Cas des montmorillonites calciques*. Clay Minerals, vol. 21, pp. 9-29.

BERNIER, F., VOLCKAERT, G., ALONSO, E.E. & VILLAR, M.V.M., 1997. *Suction-controlled experiments on Boom clay*. Engineering Geology, vol. 47, pp. 325-338.

BIAREZ, J., FLEUREAU, J.M., ZERHOUNI, M.I. & SOEPANDJI, B.S., 1988. *Variations de volume des sols argileux lors de cycles de drainage-humidification*. Revue Française de Géotechnique, n° 41, pp. 63-71.

BISHOP, A.W. & BLIGHT, G.E., 1963. *Some aspects of effective stress in unsaturated and saturated soils*. Géotechnique, vol. 13, pp. 177-197.

BOCKING, K.A. & FREDLUND, D.G., 1979. *Use of the osmotic tensiometer to measure negative pore water pore pressure*. Geotechnical Testing Journal, vol. 2, pp. 3-10.

BOLT, G.H., 1956. *Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays*. Géotechnique, vol. 6, pp. 86-93.

BRACKLEY, I.J., 1973. *Swell pressure and free swell in compacted clay*. Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa, vol. 1, pp. 169-176.

BURLAND, J.B., 1990. *Thirtieth Rankine lecture : on the compressibility and shear strength of natural clays*. Géotechnique, vol. 40, pp. 327-378.

CABOT, L. & LE BIHAN, J.P., 1993. *Quelques propriétés d'une argile sur la "ligne optimale de compactage"*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 30, pp. 1033-1040.

CAROF, C., 2002. *Étude du gonflement d'un mélange bentonite-limon. Influence de la teneur en eau, de la pression de compactage et de la succion*. Rapport de DEA PAE3S de l'ENSG-INPL, 84 p.

CASES, J.M., BEREND, I., DELON, J.F., FRANCOIS, M., GRILLET, Y., MICHOT, I., POIRIER, J.E. & YVON J., 1990. *Quelques aspects de l'étude des propriétés texturales des argiles*. In : DECARREAU A. Matériaux argileux : structures, propriétés et applications, Société Française de Minéralogie, Groupe français des argiles, pp. 309-342.

CHAPMAN, N. & TASSONI, E., 1985. *Feasibility studies for a radioactive waste repository in a deep clay formation*. Rapport n° EUR 10061 EN. Luxembourg : office for official publications of the European communities. ISBN : 92-825-5675-1. 200 p.

CHEN, F.H., 1975. *Foundations on expansive soils.* Amsterdam : Elsevier. ISBN : 0-444-41393-6. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 12., 280 p.

CHEN, Z.H., FREDLUND, D.G. & GAN, K.M., 1999. *Overall volume change, water volume change, and yield associated with an unsaturated compacted loess*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 36, pp. 321-329.

CHU, T.Y. & MOU, C.H., 1973. *Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests*. Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haïfa, vol. 2, pp. 177-185.

COLEMAN, J.D., 1962. *Stress-strain relations for partly saturated soils*. Géotechnique, vol. 12, pp. 348-350.

COLLINS, K. & McGOWN, A., 1974. *The form and function of microfabric features in a variety of natural soils*. Géotechnique, vol. 24, pp. 223-254.

CRONEY, D., COLEMAN, J.D. & BLACK, W.P.M., 1958. *The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance*. Highway Res. Board Special Report, Washington DC, n° 40, pp. 226-252.

CUI, Y.J., 1993. *Étude du comportement d'un limon compacté non saturé et de sa modélisation dans un cadre élastoplastique*. Thèse de l'ENPC, 280 p.

CUI, Y.J., DELAGE, P., YAHIA-AISSA, M. & DE LAURE, E., 1996. *L'apport de la technique osmotique du contrôle de la succion à l'étude des sols non saturés et gonflants*. 5ème séminaire de la recherche sur l'innovation dans le bâtiment, le génie civil et les industries associées. Casablanca, Maroc, pp. 1-8.

CUI, Y.J., YAHIA-AISSA, M. & DELAGE, P., 1998. *A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays*. 5th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, UPC, Barcelone, vol. 1, pp. 1-26.

CUI, Y.J., LOISEAU, C. & DELAGE, P., 2002. *Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration*. In JUCÁ *et al.* (eds), Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brésil. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-371-9. Vol. 2, pp. 593-598.

CUISINIER, O. & MASROURI, F., 2001. *Study of the hydromechanical behaviour of a swelling soil from low to very high suctions*. 6th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, pp. 61-70.

DAY, R.W., 1994. *Swell-shrink behavior of compacted clay*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 120, pp. 618-623.

DELAGE, P. & LEFEBVRE, G., 1984. *Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 21, pp. 21-35.

DELAGE, P., SURAJ DA SILVA, G.P.R. & DE LAURE, E., 1992. *Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer*. Proc. of the 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, pp. 206-211.

DELAGE, P., HOWAT, M.D. & CUI, Y.J., 1998. *The relationship between suction and the swelling properties in a heavily compacted swelling clay*. Engineering Geology, vol. 50, pp. 31-48.

DERRICHE, Z., IGUECHTAL, L. & TAS, M., 1999. *Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas*. Revue Française de Géotechnique, n° 89, pp. 55-65.

DIDIER, G., LAREAL, P. & GIELLY, J., 1973. *Prévision du potentiel et de la pression de gonflement des sols*. Comptes rendus du congrès de mécanique des sols et des travaux de fondations, vol. 2-3, pp. 67-72.

DIF, A.E. & BLUEMEL, W.F., 1991. *Expansive soils under cyclic drying and wetting*. Geotechnical Testing Journal, vol. 14, pp. 96-102.

DI MAIO, C., 1996. *Exposure of bentonite to salt solutions: osmotic and mechanical effects*. Géotechnique, vol. 46, pp. 695-707.

DI MARIANO, A., VAUNAT, J. & ROMERO, E., 2002. *Insights into the elastic behavior of unsaturated soils*. In JUCÁ *et al.* (eds), Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brésil. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-371-9. Vol. 2, pp. 473-479.

DINEEN, K. & BURLAND, J.B., 1995. *A new approach to osmotically controlled oedometer testing*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 2, pp. 459-465.

DJEDID, A., BEKKOUCHE, A. & AISSA MAMOUNE, S.M., 2001. *Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie)*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 233, pp. 67-75.

DUECK, A., BÖRGESSON, L. & WADSÖ, L., 2001. *Constant volume tests with suction control performed on a swelling clay*. 6th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, ENPC, pp. 83-101.

EDIL, T.B.& MOTAN, S.E., 1984. *Laboratory evaluation of soil suction components*. Geotechnical Testing Journal, vol. 7, pp. 173-181.

EDIL, T.B. & ALANAZY, A.S., 1992. *Lateral swelling pressures*. Proc. of the 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, vol. 1, pp. 272-323.

ELSASS, F., BEAUMONT, A., PERNES, M., JAUNET, A.M. & TESSIER, D., 1998. *Changes in layer organization of Na- and Ca-exchanged smectites during solvent exchanges for embedment resin*. The Canadian Mineralogist, vol. 36, pp. 1475-1483.

EROL, O., DHOWIAN & YOUSSEF, 1987. *Assessment of oedometer methods for heave prediction*. Proc. of the 6th Int. Conf on Expansive Soils, New Delhi, pp. 99-103.

ESCARIO, V. & SAEZ, J., 1973. *Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction*. Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa, vol. 2, pp. 195-200.

FLEUREAU, J.M., KHEIRBEK-SAOUD, S., SOEMITRO, R. & TAIBI, S., 1993. *Behavior of clayey soils on drying-wetting paths*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 30, pp. 287-296.

FOSTER, R.H. & DE, P.K., 1971. *Optical and electron microscopic investigation of shear induced structures in lightly consolidated (soft) and heavily (hard) kaolinite*. Clays and Clay Minerals, vol. 42, pp. 31-47.

FOUCAULT, A. & RAOULT, J.F., 1995. *Dictionnaire de géologie – 4ème édition*. Paris : Masson. ISBN : 2-225-84635-9. 324 p.

FREDLUND, D.G. & MORGENSTERN, N.R., 1977. *Stress state variables for unsaturated soils*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 103, pp. 447-466.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H., 1993. *Soils mechanics for unsaturated soils*. New York : John Wiley & Sons. ISBN : 0-471-85008-X. 517 p.

FUTAI, M.M., ALMEIDA, M., CONCIANI, W. & FILHO, F., 2002. *Experimental and theoritical evaluation of plate load test in collapsible soil*. In JUCÁ *et al.* (eds), Proc. 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brésil. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-371-9. Vol. 2, pp. 721-726.

GARDNER, R., 1937. *A method for measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range*. Soil Science, vol. 43, pp. 227-283.

GEISER, F., 1999. *Comportement mécanique d'un limon non saturé – Étude expérimentale et modélisation constitutive*. Thèse de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), 224 p.

GENS, A. & ALONSO, E.E., 1992. *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 29, pp. 1013-1032.

GENS, A. & OLIVELLA, S., 2001. *Clay barriers in radioactive waste disposal*. Revue Française de Génie Civil, vol. 5-6, pp. 845-856.

GENS, A., ALONSO, E.E., SURIOL, J. & LLORET, A., 1995. *Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 1, pp. 83-88.

GILLIOT, J.E., 1979. *Fabric composition and properties of sensitive soils from Canada, Alaska and Norway*. Engineering Geology, vol. 14, pp. pp. 149-172.

GRAHAM, J., GRAY, M.N., SUN, B.C.C. & DIXON, D.A., 1986. *Strength and volume change charcteristics of a sand-bentonite buffer*. Proc. 2nd Int. Conf. on Radioactive Waste Management, Winnipeg, pp. 188-194.

GRIFFITHS, F.J. & JOSHI, R.C., 1989. *Change in pore size distribution due to consolidation of clays*. Géotechnique, vol. 39, pp. 159-167.

GUAN, Y. & FREDLUND, D.G., 1997. *Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 34, pp. 604-614.

GUIRAS-SKANDAJI, H., 1996. *Déformabilité des sols argileux non saturés : étude expérimentale et application à la modélisation*. Thèse de l'INPL, 315 p.

GULHATI, S.K. & SATIJA, B.S., 1981. *Shear strength of partially saturated soils*. Proc. of the 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Stockholm, pp. 609-612.

HABIB, S.A. & KARUBE, D., 1993. *Swelling pressure behavior under controlled suction*. Geotechnical Testing Journal, vol. 16, pp. 271-275.

HILLEL, D., 1988. *L'eau et les sols, principes et processus physiques*. Louvain-la-Neuve : Academia. ISBN : 2-87209-015-0. Collection PEDASUP. 288 p.

HOUSTON, S.L., HOUSTON, W. & WAGNER, A.M., 1994. *Laboratory filter paper suction measurements*. Geotechnical Testing Journal, vol. 17, pp. 185-194.

HUDER, J. & AMBERG, G., 1970. *Quellung in mergel, opalinuston und anhydrit*. Schweizerische Bauzeitung, n° 43, pp. 975-980.

ISO 483, 1999. *Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses pour maintenir l'humidité relative à une valeur constante*. 7 p.

JOSA, A., BALMACEDA, A., GENS, A. & ALONSO, E.E., 1992. *An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse*. Proc. 3rd Int. Conf. Computational Plasticity, Barcelone, vol. 1, pp. 815-826.

JENNINGS, J.E.B., 1961. *A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils*. Pore Pressure and Suction in Soils. Butterwoths : Londres, pp. 26-30.

JENNINGS, J.E.B & BURLAND, J.B., 1962. *Limitations to the use of effective stresses concept in partly saturated soils*. Géotechnique, vol. 12, pp. 125-144.

JOSA, A., BALMACEDA, A., GENS, A. & ALONSO, E.E., 1992. *An elastoplastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse*. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Computational Plasticity, Barcelone, pp. 815-826.

KASSIF, G. & BEN SHALOM, A., 1971. *Experimental relationship between swell pressure and suction*. Géotechnique, vol. 21, pp. 245-255.

KIM, J.W., PEACOR, D.R., TESSIER D. & ELSASS, F., 1995. *A technique for maintaining texture and permanent expansion of smectites interlayers for TEM observations*. Clays and clay minerals, vol. 43, pp. 51-55.

KJELLANDER, R., MARCELJA, S., PASHLEY, R.M., & QUIRK, J.P., 1988. *Double layer ion correlation forces restrict Calcium-clay swelling*. J. Phys. Chem., vol. 92, pp. 6489-6492.

KOCH, D., 2001. *Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls*. Applied Clay Science, vol. 21, pp. 1-11.

KOGHO, Y., ASANO, I. & TAGASHIRA, H., 2001. *Modelling of state surfaces of unsaturated soils*. In Adachi & Fukue (eds), Clay Science for engineering. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-175-9, pp. 467-474.

KOMINE, H. & OGATA, N., 1996. *Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 33, pp. 11-22.

KOMORNIK, A., LIVNEH, M. & SMUCHA, S., 1980. *Shear strength and swelling of clays under suction*. Proc. of the 4th Int. Conf. on Expansive Clays, vol. 1, pp. 206-226.

LAGNY, C., 1996. *Comportement mécanique des sols fins sous fortes contraintes et fortes pressions négatives*. Thèse de l'École Centrale de Paris.

LAIRD, D.A., 1996. *Model for crystalline swelling of 2:1 phyllosilicates*. Clays and Clay Minerals, vol. 44, pp. 553-559.

LAMBE, T.W., 1960. *A mechanistic picture of shear strength in clay*. Proc. of the ASCE Conf. on Shear of Cohesive Soils, Colorado, pp. 555-580.

LI, Z.M., 1995. *Compressibility and collapsibility of compacted unsaturated loessial soils*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 1, pp. 139-144.

LIDE, D.R. (eds), 2002. *Handbook of chemistry and physics*. 82ème edition, CRC press. ISBN : 0-8493-0482-2. pp. 8.108 – 8.116 et 15.25 – 15 – 26.

LLORET, A. & ALONSO, E.E., 1985. *State surfaces for partially saturated soils*. Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, San Fransisco, vol. 2, pp. 557-562.

LONDRES, S., 2001. *Propriétés hydromécaniques d'un sol gonflant compacté*. Rapport de 3ème année de l'ENSG, 29 p.

LOW, P.F., 1980. *The swelling of clays : I. Montmorillonites.* Soil science society of america journal, vol. 44, pp. 667-676.

MARCIAL, D., DELAGE, P. & CUI, Y.J., 2001. *Compressibility of two swelling clays under high pressure*. In Adachi & Fukue (eds), Clay Science for engineering. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5809-175-9, pp. 571-576.

MATYAS, E.L. & RADHAKRISHNA, H.S., 1968. *Volume change characteristics of partially saturated soils*. Géotechnique, vol. 18, pp. 432-448.

MOLLINS, L.H., STEWART, T.I. & COUSENS, T.W., 1996. *Predicting the properties of bentonite-sand mixtures*. Clay Minerals, vol. 31, pp. 243-252.

OLSEN, H.W., 1985. *Osmosis: a cause of apparent deviations from Darcy's law*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 22, pp. 238-241.

OLSON, R.E. & MESRI, G., 1971. *Consolidation characteristics of montmorillonite*. Géotechnique, vol. 21, pp. 341-352.

OSIPOV, V.I., NGUEN NGOK BIK & RUMJANTSEVA, N.A., 1987. *Cyclic swelling of clays*. Applied Clay Science, vol. 2, pp. 363-374.

OTEO MAZO, C., SAEZ AUÑON, J. & ESTEBAN, F, 1995. *Laboratory tests and equipment with suction control*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 3, pp. 1509-1515.

PÉRON, H., 2002. *Comportement hydromécanique d'un sol compacté déformable saturé et non saturé*. Rapport de DEA PAE3S de l'ENSG-INPL, 77 p.

PHILIPPONAT, G., 1991. *Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie*. Revue Française de Géotechnique, n° 57, pp. 5-22.

PUSH, R., 1982. *Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na-bentonite*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 19, pp. 381-387.

PUSH, R., MUURINNEN, A., LEHIKOINEN, J., BORS, J. & ERIKSEN, T., 1999. *Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency*. Rapport n° EUR 18950 EN. Luxembourg : office for official publications of the European communities. ISBN : 92-828-7312-9. 121 p.

QI, Y., AL-MUKHTAR, M., ALCOVER, J.F. & BERGAYA, F., 1996. *Coupling analysis of macroscopic and microscopic behaviour in highly consolidated Na-laponite clays*. Applied Clay Science, vol. 11, pp. 185-197.

RAMPINO, C., MANCUSO, C. & VINALE, F., 2000. *Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 37, pp. 748-763.

RICHARDS, L.A., 1935. *Capillary conduction of liquids through porous medium*. Physics, vol. 1, pp. 318-333.

RICHARDS, L.A. & GARDNER, W., 1938. *Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water*. Journal of American Society of Agronomy, vol. 28, pp. 352-358.

RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B., 1993. *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Géotechnique, vol. 43, pp. 321-324.

RIDLEY, A.M. & WRAY, W.K., 1995. *Suction measurement : a revue of current theory and practices*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 3, pp. 1293-1322.

ROBINET, J.C., PASQUIOU, A., JULLIEN, A., BELANTEUR, N. & PLAS, F., 1997. *Expériences de laboratoire sur le comportement thermo-hydro-mécanique de matériaux argileux remaniés gonflants et non gonflants*. Revue Française de Géotechnique, n° 81, pp. 53-80.

ROLLAND, S., 2002. *Transfert hydrique dans des sols argileux gonflants : influence du confinement*. Thèse de l'INPL, Nancy, 200 p.

ROMERO, E., 1999. *Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay : an experimental study*. Thèse de l'Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone, 405 p.

ROMERO, E., GENS, A. & LLORET, A., 1998. *Thermo-mechanical behavior of a heavily overconsolidated unsaturated clay as observed in suction controlled oedometer tests*. Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Beijing (Chine). Beijing : Int. Academic Publishers. ISBN : 7-80003-422-4. Vol. 1, pp. 426-431.

ROMERO, E., GENS, A. & LLORET, A., 1999. *Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay*. Engineering Geology, vol. 54, 117-127.

SAIYOURI, N., 1996. *Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées*. Thèse de l'École Centrale, Paris, 228 p.

SAIYOURI, N., HICHER, P.Y. & TESSIER, D., 1998. *Microstructural analysis of highly compacted clay swelling*. Proc. 2nd Int. Conf. on Unsaturated Soils, Beijing (Chine). Beijing : Int. Academic Publishers. ISBN : 7-80003-422-4. Vol. 1, pp. 119-124.

SEED, H.B., WOODWARD, R.J. & LUNDGREN, R., 1962. *Prediction of swelling potential for compacted clay*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, vol. 88, pp. 107-131.

SIVAKUMAR, V. & WHEELER, S.J., 2000. *Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1 : wetting and isotropic compression*. Géotechnique, vol. 50, pp. 359-368.

SOEMITRO, R.A.A., 1994. *Contribution à l'étude du rôle de la pression interstitielle négative dans le gonflement et d'autres aspects du comportement des sols non saturés*. Thèse de l'ECP, Paris, 347 p.

SOGAMI, I., 1983. *Effective potential between charged spherical particles in dilute suspension*. Physics-Letters-A, vol.96, pp.199-203.

SPANNER, D.C., 1951. *The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure*. J. Experimental Botany, vol. 2, pp. 145-168.

SPOSITO, G., 1973. *Volumes changes in swelling soils*. Soil Sciences, vol. 115, pp. 315-320.

SRIDHARAN, A. & VENKATAPPA RAO, G., 1973. *Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept*. Géotechnique, vol. 23, pp. 359-382.

SRIDHARAN, A. & JAYAVEDA, M.S., 1982. *Double layer theory and compressibility of clays*. Géotechnique, vol. 32, n° 2, pp. 133-144.

SRIDHARAN, A., SREEPADA, R. & SIVAPULLAIAH, P.V., 1986. *Swelling pressure of clays*. Geotechnical Testing Journal, vol. 9, pp. 24-33.

STANNART, D.I., 1992. *Tensiometers – Theory, construction, and use*. Geotechnical Testing Journal, vol. 15, pp. 48-58.

TABANI, P, 1999. *Transfert hydrique dans des sols déformables*. Thèse de l'INPL, Nancy, 173 p.

TAIBI, S., 1994. *Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative – Étude expérimentale et modélisation*. Thèse de l'ECP, Paris, 374 p.

TESSIER, D., 1984. *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux – Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 362 p.

TESSIER, D., 1991. *Behaviour and microstructure of clay minerals*. In De Boodt *et al.* (eds). Soil colloids and their association in aggregates. Plenum Press : New York, pp. 387-415.

TESSIER, D. & GRIMALDI, M., 1993. *Comportement et organisation des pâtes d'argiles. Importance des cycles de dessiccation-humectation*. Sciences Géologiques Bulletin, vol. 46, pp. 243-256.

TESSIER, D., PÉDRO, G. & CAMARA, L., 1980. *Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Série D, vol. 290, n° 17, pp. 1169-1172.

TESSIER, D., DARDAINE, M., BEAUMONT, A. & JAUNET, A., 1998. *Swelling pressure and microstructure of an activated swelling clay with temperature*. Clay Minerals, vol. 33, pp. 255-267.

VANDANGEON, P., 1992. *Exemples de sinistres en région parisienne*. Revue Française de Géotechnique, n° 58, pp. 892-898.

VICOL, T., 1990. *Comportement hydraulique et mécanique d'un sol fin non saturé. Application à la modélisation*. Thèse de l'ENPC, 257 p.

VILLAR, M.V., 1995. *Firsts results of suction controlled oedometer tests in highly expansive montmorillonite*. In Alonso & Delage (eds), Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-583-6. Vol. 1, pp. 207-213.

VILLAR, M.V., 1999. *Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests*. Engineering Geology, vol. 54, pp. 67-73.

VILLAR, M.V. & MARTÍN, P.L., 1996. *Suction-controlled oedometer tests in montmorillonite clay: preliminary results*. Engineering Geology of Waste Disposal, vol. 11, pp.309-312.

VIVARAT-PERRIN, M.P., 1998. *Les mesures d'humidité dans l'air méritent mieux*. Mesures, le magazine de l'instrumentation et des automatismes industriels (ISSN : 0755-219X), vol. 701, pp. 42-46.

WHEELER, S.J., 1994. *General report: engineering behaviour and properties of arid soils*. In Fookes & Parry (eds), Proc. of the 1st Int. Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils, Londres. Rotterdam : Balkema. ISBN : 90-5410-365-5. Vol. 1, pp. 161-172.

WHEELER, S.J., 1997. *Modélisation des changements de volume élastique dans les sols non saturés*. Proc. of the 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hambourg, vol. 1, pp. 427-430.

WHEELER, S.J. & SIVAKUMAR, V., 1995. *An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil*. Géotechnique, vol. 45, pp. 35-53.

WHEELER, S.J. & SIVAKUMAR, V., 2000. *Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 2 : shearing and constitutive modelling*. Géotechnique, vol. 50, pp. 369-376.

WILLIAMS, J. & SHAYKEWICH, C.F., 1969. *An evaluation of polyethylene glycol (PEG) 6 000 and PEG 20 000 in the osmotic control of soil water matric potential*. Canadian Journal of Soil Science, vol. 49, pp. 397-401.

WROTH, C.P. & HOULSBY, G.T., 1985. *Soil mechanics – Property characterization and analysis procedures*. Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., San Francisco. ISBN : 90-6191-560-0. pp. 1-55.

YAHIA-AISSA, M., 1999. *Comportement hydromécanique d'une argile gonflante fortement compactée*. Thèse de l'ENPC, Paris, 241 p.

YALÇIN, A.B. & NYERETSE, P., 1992. *Total suction of artificial mixtures compacted at optimum water content*. Geotechnical Testing Journal, vol. 15, pp. 65-73.

YONG, R.N., 1999. *Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers*. Engineering geology, vol. 54, pp. 3-13.

YONG, R.N. & MOHAMED, A.M.O., 1992. *A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays*. Revue Canadienne de Géotechnique, vol. 29, pp. 1060-1070.

YONG, R.N. & WARKENTIN, B.P., 1975. *Soil properties and behaviour*. Amsterdam : Elsevier. ISBN : 0-444-41167-4. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 5. 449 p.

ZUR, B., 1966. *Osmotic control of the matric soil-water potential : I. Soil water system*. Soil Science, vol. 102, pp. 394-398.